

## ЗМІСТ

### Секція 1

#### МАТЕМАТИЧНІ ПРОБЛЕМИ УПРАВЛІННЯ ОПТИМІЗАЦІЇ І ТЕОРІЇ ІГОР

<i>Тимофієва Н.К.</i> ЗАЛЕЖНІСТЬ ЦІЛЬОВОЇ ФУНКЦІЇ В ЗАДАЧІ КОМІВОВАЖЕРА ВІД КУТОВОГО КОЕФІЦІЄНТА ФУНКЦІЇ НАТУРАЛЬНОГО АРГУМЕНТУ .....	9
<i>Череватенко А.П.</i> ПАРАМЕТРИЧНА ІДЕНТИФІКАЦІЯ БАГАТОЗОННИХ ДИНАМІЧНИХ СИСТЕМ .....	11
<i>Mokin V.I., Chernova I.O.</i> EQUIVALENT TO THE CRITICAL FREQUENCY MATHEMATICAL MODEL OF MINIMUM ORDER FOR A COMPLEX DYNAMIC OBJECT .....	12
<i>Шафеев Р.А.</i> МОДИФИКАЦІЯ АЛГОРИТМА ПОИСКА С ЗАПРЕТАМИ ПУТЕМ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СТРАТЕГИИ АДАПТИВНОЙ НАСТРОЙКИ ЕГО ПАРАМЕТРОВ В ПРОЦЕССЕ РЕШЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКОЙ ЗАДАЧИ КУРЬЕРСКОЙ СЛУЖБЫ ЭКСПРЕСС-ДОСТАВКИ .....	14
<i>Бойцова І.А.</i> УСЕРЕДНЕННЯ У НЕЛІНІЙНИХ ЗАДАЧАХ ОПТИМАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ ЗІ ШВИДКИМИ ТА ПОВІЛЬНИМИ ЗМІННИМИ .....	16
<i>Кичмаренко О.Д., Карпычева М.Л.</i> УСРЕДНЕНИЕ В ЛИНЕЙНЫХ ПО УПРАВЛЕНИЮ ДИСКРЕТНЫХ ЗАДАЧАХ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ С ПЕРЕМЕННЫМ ЗАПАЗДЫВАНИЕМ .....	18
<i>Куценко А.С.</i> ОЦЕНКА НЕРАВНОМЕРНОСТИ ДЕФОРМАЦИИ ОБЛАСТИ ДОСТИЖИМОСТИ ЛИНЕЙНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ .....	20
<i>Панов А.П.</i> ОБОБЩЕННЫЕ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ УРАВНЕНИЯ ВИДА ЭЙЛЕРА-ГЕССА В ЗАДАЧАХ ДИНАМИКИ И ОРИЕНТАЦИИ ТВЕРДОГО ТЕЛА .....	22
<i>Хлебников М.В., Щербаков П.С.</i> ВЫПУКЛАЯ ОЦЕНКА ОБЛАСТИ ПРИТЯЖЕНИЯ ПРИ ОГРАНИЧЕНИИ НА УПРАВЛЕНИЕ .....	26
<i>Быков А.В., Щербаков П.С.</i> СИНТЕЗ РАЗРЕЖЕННЫХ H <sub>∞</sub> -ОПТИМАЛЬНЫХ РЕГУЛЯТОРОВ .....	28
<i>Быков А.В., Щербаков П.С.</i> СИНТЕЗ ОПТИМАЛЬНОЙ РАЗРЕЖЕННОЙ СВЯЗИ В ЛИНЕЙНЫХ СИСТЕМАХ ДИСКРЕТНОГО ВРЕМЕНИ .....	30

### Секція 2

#### УПРАВЛІННЯ ТА ІДЕНТИФІКАЦІЯ В УМОВАХ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ

<i>Романенко В.Д., Милявский Ю.Л.</i> МОДЕЛИРОВАНИЕ СЦЕНАРИЕВ РАЗВИТИЯ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ УПРАВЛЕНИЯ ИМПУЛЬСНЫМИ ПРОЦЕССАМИ КОГНИТИВНЫХ КАРТ .....	32
<i>Шибаета Н.О.</i> ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ НАДЕЖНОСТЬЮ СУДОВЫХ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ .....	34
<i>Дорофеев Ю.И.</i> АНАЛИЗ УСЛОВИЙ РАЗРЕШИМОСТИ ЗАДАЧИ СИНТЕЗА ОГРАНИЧЕННОГО СТАБИЛИЗИРУЮЩЕГО УПРАВЛЕНИЯ ЗАПАСАМИ С ПОМОЩЬЮ БИЛИНЕЙНЫХ МАТРИЧНЫХ НЕРАВЕНСТВ .....	36
<i>Баган Т.Г.</i> ДОСЯГНЕННЯ РОБАСТНОЇ ЯКОСТІ ДЛЯ ОБ'ЄКТІВ ЗІ ЗМІННИМИ ПАРАМЕТРАМИ .....	38

<i>Горбійчук М.І., Гуменюк Т.В.</i> ОПТИМІЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ ПОГЛИБЛЕННЯ ГЛИБОКИХ СВЕРДЛОВИН В УМОВАХ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ.....	40
<i>Стеценко Д.О., Кільмар Я.С.</i> КЕРУВАННЯ БРАГОРЕКТИФІКАЦІЙНОЮ УСТАНОВКОЮ З ВИКОРИСТАННЯМ МРС-ПІДХОДУ .....	42
<i>Сич М.А.</i> ФРАКТАЛЬНО-ВЕЙВЛЕТНІ МЕТОДИ УПРАВЛІННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМ КОМПЛЕКСОМ ЦУКРОВОГО ЗАВОДУ .....	44
<i>Новаковська Н.Г.</i> КРИТЕРІАЛЬНІ КОНФЛІКТИ ПРИ УПРАВЛІННІ БРАГОРЕКТИФІКАЦІЙНОЮ УСТАНОВКОЮ .....	46
<i>Жулинський О.А., Ладієва Л.Р.</i> ДО ПИТАННЯ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ПРОЦЕСУ МЕМБРАННОЇ ДИСТИЛЯЦІЇ.....	48
<i>Сарычев А.П.</i> ЛИНЕЙНАЯ АВТОРЕГРЕССИЯ СО СЛУЧАЙНЫМИ КОЭФФИЦИЕНТАМИ НА ОСНОВЕ МГУА В УСЛОВИЯХ КВАЗИПОВТОРНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ .....	51
<i>Губарев В.Ф.</i> СЛОЖНЫЕ СИСТЕМЫ. МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИДЕНТИФИКАЦИЯ.....	53
<i>Azarskov V.N., Rudiuk G.I., Kurganskyi O.Yu., Solovchuk K.Yu.</i> ADAPTIVE ROBUST CONTROL OF LINEAR MIMO STATIC PLANT WITH AN ARBITRARY TRANSFER MATRIX AND BOUNDED NOISE: A GENERALIZATION.....	55
<i>Любчик Л.М.</i> ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ДАННЫХ В ИНТЕРНЕТЕ НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ .....	57
<i>Боровська Т.М.</i> РІШЕННЯ ЗАДАЧ УПРАВЛІННЯ ВИРОБНИЧИМИ СИСТЕМАМИ НА БАЗІ АЛГЕБРИ ОПТИМАЛЬНОГО АГРЕГУВАННЯ .....	59
<i>Скринник И.М., Дмитришин Д.В.</i> СТАБИЛИЗАЦИЯ ОРБИТ НЕПРЕРЫВНЫХ ОТОБРАЖЕНИЙ С ХАОТИЧЕСКОЙ ДИНАМИКОЙ .....	61
<i>Мазманишвили А.С., Сидоренко А.Ю.</i> ПОВЫШЕНИЕ ПОРЯДКА СТАЦИОНАРНОГО СТОХАСТИЧЕСКОГО МАРКОВСКОГО ПОЛЯ.....	63
<i>Марченко И.И.</i> ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ МЕТОД ИДЕНТИФИКАЦИИ ПОВЕРХНОСТНОЙ АТОМАРНОЙ СТРУКТУРЫ ДЛЯ АНАЛИЗА РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ .....	65

### Секція 3

#### АВТОМАТИЧНЕ КЕРУВАННЯ В ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМАХ

<i>Кузнецов Б.И., Хоменко В.В.</i> СТОХАСТИЧЕСКАЯ МУЛЬТИАГЕНТНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ АНИЗОТРОПИЙНЫХ РЕГУЛЯТОРОВ КОМБИНИРОВАННЫХ СИСТЕМ РОБАСТНОГО УПРАВЛЕНИЯ .....	67
<i>Іванов В.І.</i> УДОСКОНАЛЕННЯ САР ТЕПЛОВОГО РЕЖИМУ РЕКУПЕРАТИВНИХ НАГРІВАЛЬНИХ КОЛОДЯЗІВ З ОПАЛЮВАННЯМ ІЗ ЦЕНТРУ ПОДУ .....	69
<i>Довгалюк Б.П., Волошин Р.В.</i> АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА ОПТИМІЗАЦІЇ ВИТРАТИ ПИЛОВУГІЛЬНОГО ПАЛИВА НА ДОМЕННУ ПЛАВКУ .....	71
<i>Никулина Е.Н.</i> ЛАБОРАТОРИЯ МОДЕЛЕЙ И МЕТОДОВ АНАЛИЗА И СИНТЕЗА СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ.....	73
<i>Северин В.П.</i> СИНТЕЗ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ЭНЕРГОБЛОКА АЭС В ЛАБОРАТОРИИ ОПТИМИЗАЦИИ ORTLAB .....	75
<i>Саков Р.П., Бунке О.С. Ковриго Ю.М.</i> ІНТЕРАКТИВНИЙ ПРОГРАМНО-ТЕХНІЧНИЙ КОМПЛЕКС МОДЕЛЮВАННЯ САР.....	77
<i>Бігун М.А.</i> РОЗРОБКА ОПТИМАЛЬНИХ МЕТОДІВ УПРАВЛІННЯ СИСТЕМАМИ НУАС В ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ БУДІВЕЛЬ .....	79
<i>Вишневский Л.В., Тумольский А.П.</i> АЛЬТЕРНАТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЕМ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА .....	80

---

<i>Ушкаренко А.О., Халед Омар Ганнам.</i> МОДЕЛИРОВАНИЕ ЦИФРОВЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРНЫМ АГРЕГАТОМ .....	82
<i>Ладанюк А.П., Шумидай Д.А.</i> СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ СКЛАДНИМ ТЕХНОЛОГІЧНИМ КОМПЛЕКСОМ З ВИКОРИСТАННЯМ АЛГОРИТМІВ КООРДИНАЦІЇ .....	84
<i>Сущенко О.А.</i> РОБАСТНАЯ СИСТЕМА СТАБИЛИЗАЦИИ ОБОРУДОВАНИЯ БПЛА .....	87
<i>Дмитриенко В.Д., Заковоротный А.Ю.</i> АВТОМАТИЗАЦИЯ СИМВОЛЬНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ В ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ УПРАВЛЕНИЯ ПРИ СИНТЕЗЕ ЛИНЕЙНЫХ МОДЕЛЕЙ .....	89
<i>Лагерная С.И., Хобин В.А.</i> МОДЕЛЬ СПЕКТРАЛЬНОЙ ПЛОТНОСТИ РЕГУЛИРУЕМОЙ ПЕРЕМЕННОЙ САР .....	91
<i>Пряшников Ф.Д., Пряшникова П.Ф.</i> КРИТЕРИЙ ОПТИМИЗАЦИИ НЕСИММЕТРИЧНЫХ РЕЖИМОВ ТРЕХФАЗНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ В УНИТАРНОМ ПРОСТРАНСТВЕ .....	93
<i>Kushnir V.O., Gerasin O.S.</i> MOBILE ROBOT FOR TECHNOLOGICAL CLEANING OF FERROMAGNETIC SURFACES .....	95
<i>Ладанюк А.П., Школьна О.В.</i> УПРАВЛІННЯ ВИПАРНОЮ СТАНЦІЄЮ ЦУКРОВОГО ЗАВОДУ В СКЛАДІ ТЕПЛОЕНЕРГЕТИЧНОГО КОМПЛЕКСУ .....	97
<i>Копилова Л.О., Балюта С.М., Йовбак В.Д.</i> РОБАСТНА АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА РЕГУЛЮВАННЯ ТОВЩИНИ МЕТАЛОПРОКАТУ .....	99
<i>Корольов Є.О.</i> УПРАВЛІННЯ СПОЖИВАННЯМ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ .....	101
<i>Чернецький М.В.</i> ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА ОБРОБКА ІНФОРМАЦІЇ В ПІДСИСТЕМІ ТЕХНОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ ПРОЦЕСУ ВАРКИ СУСЛА .....	102
<i>Прокопенко Ю.В., Ладанюк А.П.</i> ЗАСТОСУВАННЯ СЦЕНАРНО-СИТУАЦІЙНОГО ПІДХОДУ ПРИ УПРАВЛІННІ КОМПЛЕКСОМ ВАКУУМ-АПАРАТІВ ПЕРІОДИЧНОЇ ДІЇ .....	103
<i>Клименко І.А.</i> АПАРАТНІ ЗАСОБИ ПРИСКОРЕННЯ РЕКОНФІГУРАЦІЇ В РЕКОНФІГУРОВАНІХ ОБЧИСЛЮВАЛЬНИХ СИСТЕМАХ .....	104
<i>Сокол Р.М.</i> ВИКОРИСТАННЯ НЕЧІТКОГО МОДЕЛЮВАННЯ В УПРАВЛІННІ ПРОДУКТОВИМ ВІДДІЛЕННЯМ ЦУКРОВОГО ЗАВОДУ .....	106
<i>Зворыкин В.Б., Михалев А.И., Станчиц Г.Ю.</i> МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ В СИСТЕМАХ РЕГУЛИРОВАНИЯ СКОРОСТИ ПРИ НАЛИЧИИ УПРУГОЙ СВЯЗИ ДВИГАТЕЛЯ С МЕХАНИЗМОМ И БОЛЬШОМ СООТНОШЕНИИ ИНЕРЦИОННЫХ МАСС .....	108
<i>Мезеря А.Ю.</i> ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕГО УПРАВЛЕНИЯ НАГНЕТАТЕЛЬНЫМИ УСТАНОВКАМИ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ .....	109
<i>Цисельская Т.А., Никольский М.В.</i> АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ ЭНЕРГОБЛОКА С ВВЭР-1000 ПРИ МАНЕВРИРОВАНИИ МОЩНОСТЬЮ В РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ ЭКСПЛУАТАЦИИ .....	111
<i>Pankratova N.D.</i> FORESIGHT AND FORECAST FOR PREVENTING AND RECOVERING AFTER SOCIAL DISASTERS DIFFERENT NATURE .....	113
<i>Левинский М.В.</i> СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ОБЪЕКТАМИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ТИПА .....	115
<i>Шевченко С.В.</i> ОПТИМИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫМИ СИСТЕМАМИ .....	117
<i>Кокол Е.А.</i> ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ МОЩНОСТЬЮ ВВЭР-1000 ЗА СЧЕТ ЦЕЛЕВОГО ВЫБОРА ПРОГРАММЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ .....	119
<i>Фоц Т.В.</i> МОДЕЛЬ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЯ В КИСУ ВВЭР-1000 .....	121
<i>Трубіков В.А.</i> ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ ПАРОВИХ ТА ВОДОГРІЙНИХ КОТЛІВ .....	122
<i>Степанов М.Т.</i> УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ СУШКИ ЗЕРНА КВАЗИИНВАРИАНТНОЕ К ЕГО НАЧАЛЬНОЙ ВЛАЖНОСТИ .....	124

---

<i>Гольцов А.С.</i> АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМЫ АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ГИДРОАГРЕГАТОМ С ПОВОРОТНО-ЛОПАСТНОЙ ТУРБИНОЙ.....	126
<i>Голуб Е.Ю.</i> ОТРИМАННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДАНИХ ДЛЯ СПОСОБУ ВИЗНАЧЕННЯ ВОЛОГОСТІ.....	128

**Секція 4****УПРАВЛІННЯ АЕРОКОСМІЧНИМИ,  
МОРСЬКИМИ ТА ІНШИМИ РУХОМИМИ ОБ'ЄКТАМИ**

<i>Алпатов А.П., Фоков А.А., Хорошилов С.В., Закржевский А.Е.</i> ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ФОТОСНИМКОВ МИШЕНИ ПРИ БЕСКОНТАКТНОМ УДАЛЕНИИ КОСМИЧЕСКОГО МУСОРА .....	131
<i>Великодний С.С.</i> РЕІНЖІНІРИНГ СИСТЕМ МОЇТОРИНГУ ТА ДИСТАНЦІЙНОГО УПРАВЛІННЯ СУДНОВИМИ ЕНЕРГЕТИЧНИМИ УСТАНОВКАМИ.....	133
<i>Омельчук А.А., Рудакова А.В., Поливода О.В.</i> ЗАДАЧА ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ СПУСКА-ПОДЪЕМА СУДНА С ПОМОЩЬЮ СЛИПА .....	135
<i>Ефименко Н.В., Меланченко А.Г., Хорошилов В.С.</i> УПРАВЛЕНИЕ ОРИЕНТАЦИЕЙ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ БЕЗ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИНФОРМАЦИИ ИЗМЕРИТЕЛЕЙ УГЛОВЫХ СКОРОСТЕЙ .....	137
<i>Меланченко А.Г.</i> ЦЕЛЕВОЕ УПРАВЛЕНИЕ КОСМИЧЕСКИМИ АППАРАТАМИ В СОСТАВЕ РАЗРЕЖЕННОГО КЛАСТЕРА.....	139
<i>Акуленко Л.Д., Леценко Д.Д., Рачинская А.Л.</i> ОПТИМАЛЬНОЕ ТОРМОЖЕНИЕ ВРАЩАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ ТВЕРДОГО ТЕЛА С ПОЛОСТЬЮ В СРЕДЕ С СОПРОТИВЛЕНИЕМ .....	142
<i>Топалов А.М.</i> КОМП'ЮТЕРИЗОВАНА СИСТЕМА КОНТРОЛЮ ТА УПРАВЛІННЯ ПАРАМЕТРАМИ ПЛАВУЧОГО ДОКУ .....	144
<i>Осадчий С.І., Мельніченко М.М.</i> ОПТИМАЛЬНЕ СПОСТЕРЕЖЕННЯ ЛІНІЙНИХ ПРИСКОРЕНЬ ОБ'ЄКТУ ЗА ДАНИМИ ВІД 3D MEMS АКСЕЛЕРОМЕТРУ .....	146
<i>Тимченко В.Л.</i> ОПТИМИЗАЦИЯ НЕЛИНЕЙНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ МОРСКИМИ ПОДВИЖНЫМИ ОБЪЕКТАМИ.....	147
<i>Зозуля В.А.</i> СТАБІЛІЗАЦІЯ КУТОВОГО ПОЛОЖЕННЯ РУХОМОЇ ПЛАТФОРМИ МЕХАТРОННОЇ МАШИНИ В УМОВАХ СТОХАСТИЧНОЇ ХИТАВИЦІ ЇЇ ОСНОВИ .....	149
<i>Кузнецов Ю.А., Лабазов О.А.</i> БЕЗГИРОСКОПНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ МАЛОГО СПУТНИКА .....	150
<i>Дергачов К.Ю.</i> АЛГОРИТМЫ ВИЗУАЛЬНОЙ НАВИГАЦИИ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ .....	152
<i>Anh Duc Dang, Joachim Horn.</i> STABILITY OF V-FORMATION OF AUTONOMOUS ROBOTS WHILE TRACKING A MOVING TARGET .....	154

**Секція 5****ОБРОБКА ІНФОРМАЦІЇ  
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНЕ УПРАВЛІННЯ**

<i>Анциферов І.О.</i> ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ СУДНОВИМИ ТЕХНІЧНИМИ ЗАСОБАМИ.....	157
<i>Зайченко Ю.П., Зайченко Е.Ю.</i> СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ МАКРОЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ.....	159

---

<i>Горбійчук М.І., Шуфнарівич М.А.</i> СИСТЕМА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ПРИ КЕРУВАННІ ОБ'ЄКТАМИ ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ .....	161
<i>Чайковська Є.С., Молодковець Б.І.</i> ПІДТРИМКА ПРОЦЕСУ ЗДОБУТТЯ БІОГАЗУ У СКЛАДІ ЕКСПЕРТНОЇ КОГЕНЕРАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ .....	163
<i>Семенов Г.Н., Фешанич Л.І.</i> ВИКОРИСТАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ЗЛИТТЯ ДАНИХ НА ОСНОВІ JDL-МОДЕЛІ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ АНТИПОМПАЖНОГО ЗАХИСТУ ГАЗОПЕРЕКАЧУВАЛЬНИХ АГРЕГАТІВ .....	166
<i>Олецкий О.В., Буняк А.О.</i> ПРО ЗАСТОСУВАННЯ DATA MINING ДО ПРОБЛЕМИ АВТОМАТИЧНОГО ФОРМУВАННЯ РЕКОМЕНДАЦІЙ НА НАВЧАЛЬНОМУ ПОРТАЛІ .....	168
<i>Пушкин А.А.</i> ПРИМЕНЕНИЕ РАСТУЩИХ САМООРГАНИЗУЮЩИХСЯ КАРТ КОХОНЕНА ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ ДИАГНОСТИЧЕСКОЙ МОДЕЛЕЙ НОРИИ .....	170
<i>Олійник Г.В.</i> ПРЕДСТАВЛЕННЯ ВХІДНИХ ДАНИХ ПРИ ПЛАНУВАННІ ПОСЛІДОВНОСТІ ВИКОНАННЯ ЕТАПІВ ДОГОВОРІВ .....	171
<i>Романов В.О.</i> МУЛЬТИСЕНСОРНА БЕЗДРОТОВА МЕРЕЖА ДЛЯ ЕКСПРЕСНОГО ВИЗНАЧЕННЯ СТРЕСОВОГО НАВАНТАЖЕННЯ НА СТАН АГРАРНИХ КУЛЬТУР .....	174
<i>Рыбальский О.В., Соловьев В.И., Шабля А.Н., Журавель В.В.</i> СИСТЕМА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПОИСКА ГОЛОСОВ .....	176
<i>Теленик С.Ф.</i> ПРО ЗАСТОСУВАННЯ НЕЙРОМЕРЕЖЕВИХ ТЕХНОЛОГІЙ ПРИ ДІАГНОСТУВАННІ ЕЛЕКТРО-РАДІОКОМПОНЕНТІВ .....	178
<i>Гамаюн І.П., Безменова О.М.</i> РОЗРОБКА ПОКАЗНИКІВ СТУПЕНЯ ЗВ'ЯЗКУ МІЖ НОМІНАЛЬНИМИ ПАРАМЕТРАМИ .....	180
<i>Кривонос Ю.Г., Крак Ю.В., Бармак О.В., Баргій Р.О.</i> ОБРОБКА ТА РОЗПІЗНАВАННЯ ІНФОРМАЦІЇ ДЛЯ СТВОРЕННЯ НОВИХ ЗАСОБІВ КОМУНІКАЦІЇ ЛЮДЕЙ З ОБМЕЖЕННЯМИ .....	182
<i>Стеценко А.М.</i> АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ВОЛОГІСТЮ ҐРУНТУ НА МЕЛІОРАТИВНИХ СИСТЕМАХ З ПІДҐРУНТОВИМ ЗВОЛОЖЕННЯМ НА БАЗІ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ .....	184
<i>Ухина А.В., Ситников В.С.</i> УПРАВЛЕНИЕ ПЕРЕСТРОЙКОЙ ПОЛОСОВОЙ ЧАСТОТНО-ЗАВИСИМОЙ КОМПОНЕНТЫ ВТОРОГО ПОРЯДКА ДЛЯ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОЙ КОМПЬЮТЕРНОЙ СИСТЕМЫ .....	186
<i>Паньков Д.В.</i> КОМП'ЮТЕРНА КВАЛІМЕТРІЯ ПРИ УПРАВЛІННІ ТЕХНОЛОГІЧНИМ КОМПЛЕКСОМ ХЛІБОПЕКАРСЬКОГО ВИРОБНИЦТВА .....	188
<i>Хавина І.П.</i> МАС ОПТИМАЛЬНОГО ВЫБОРА ЗАГОТОВОК .....	190
<i>Кузнецов М.В., Селетков В.Л.</i> ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПО ПОРЯДКОВЫМ СТАТИСТИКАМ СПЕКТРОВ АНАЛИТИЧЕСКИХ РЕЧЕВЫХ СИГНАЛОВ .....	192
<i>Ковриго Ю.М., Степанець О.В., Бунке О.С.</i> УНІВЕРСАЛЬНА ПЛАТФОРМА РОЗРОБКИ НАВЧАЛЬНИХ СТЕНДІВ В ГАЛУЗІ АВТОМАТИЗАЦІЇ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ .....	194
<i>Кавицкая В.С., Любченко В.В.</i> ОСНОВНЫЕ ИНСТРУМЕНТЫ ДЛЯ АНАЛИЗА BIG DATA .....	196

## ПЛЕНАРНІ ДОКЛАДИ

---

<i>Кунцевич В.М., Волосов В.В.</i> ВОССТАНОВЛЕНИЕ ВЕКТОРА СОСТОЯНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПРИ ЕГО НЕПОЛНЫХ ИЗМЕРЕНИЯХ С ОГРАНИЧЕННЫМИ ПОМЕХАМИ .....	198
<i>Александров Е.Е., Александрова Т.Е.</i> АВТОМАТИЗАЦИЯ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ ОБЪЕКТОВ БРОНЕТАНКОВОЙ ТЕХНИКИ .....	200

---

---

<i>Чикрий А.А.</i> ЭКСТРЕМАЛЬНЫЕ СЕЛЕКТОРЫ МНОГОЗНАЧНЫХ ОТОБРАЖЕНИЙ В ИГРОВЫХ ЗАДАЧАХ СБЛИЖЕНИЯ ТРАЕКТОРИЙ ДВИЖУЩИХСЯ ОБЪЕКТОВ .....	202
<i>Житецкий Л.С.</i> РОБАСТНОЕ УПРАВЛЕНИЕ НЕКОТОРЫМИ КЛАССАМИ НЕЛИНЕЙНЫХ ОБЪЕКТОВ В СИСТЕМАХ С ЛИНЕЙНЫМИ ОБРАТНЫМИ СВЯЗЯМИ .....	203
<i>Дмитришин Д.В.</i> МЕТОДЫ ЛОКАЛИЗАЦИИ ПЕРИОДИЧЕСКИХ ОРБИТ .....	205
<i>Кулик А.С.</i> РАЦИОНАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ АВТОНОМНЫМИ ОБЪЕКТАМИ В УСЛОВИЯХ ДЕСТАБИЛИЗИРУЮЩИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ .....	209

---

## Секція 1

# МАТЕМАТИЧНІ ПРОБЛЕМИ УПРАВЛІННЯ

## ОПТИМІЗАЦІЇ І ТЕОРІЇ ІГОР

УДК 519.816

Н.К. Тимофієва, д-р. техн. наук, с.н.с., МННЦ  
ІТiС НАНУ та МОН України, tymnad@gmail.com

### ЗАЛЕЖНІСТЬ ЦІЛЬОВОЇ ФУНКЦІЇ В ЗАДАЧІ КОМІВОЯЖЕРА ВІД КУТОВОГО КОЕФІЦІЄНТА ФУНКЦІЇ НАТУРАЛЬНОГО АРГУМЕНТУ

Доведено, що цільова функція в задачі комівояжера для певного впорядкування перестановок змінюється симетрично в залежності від кутового коефіцієнта функції натурального аргументу, якою моделюються вхідні дані. Це пов'язано з тим, що множині комбінаторних конфігурацій властива симетрія.

*Ключові слова:* комбінаторна оптимізація, розв'язні задачі, комбінаторна конфігурація, функція натурального аргументу, цільова функція, перестановка.

Доказано, что целевая функция в задаче коммивояжера для заданного упорядочения перестановок изменяется симметрично в зависимости от углового коэффициента функции натурального аргумента, которой моделируются входные данные. Это связано с тем, что множеству комбинаторных конфигураций характерна симметрия.

*Ключевые слова:* комбинаторная оптимизация, разрешимые задачи, комбинаторная конфигурация, функция натурального аргумента, целевая функция, перестановка.

It is proved that the objective function in the traveling salesman problem for a given ordering permutations varies symmetrically depending on the slope coefficient of the function of a natural argument which simulates the input data. This is due to the fact that the set of combinatorial configurations symmetry typical.

*Keywords:* combinatorial optimization, the solvable problems, combinatorial configuration, the function of a natural argument, the objective function, the permutations.

**Вступ.** Проведено аналіз зміни значень цільової функції в залежності від кутового коефіцієнта функції натурального аргументу, якими моделюються вхідні дані. Показано, що для цих функцій (прямої та оберненої) цільова функція для певного впорядкування перестановок змінюється симетрично.

**Постановка задачі.** Задачі комбінаторної оптимізації в переважній більшості є  $NP$ -повними та не піддаються ефективному алгоритмічному розв'язку. Зведення нерозв'язних задач до розв'язних та встановлення закономірності цільової функції при знаходженні для них аналітичного розв'язку є досить громіздкою процедурою та вимагає великих затрат часу.

**Підхід, що пропонується.** Нижче описано спосіб знаходження підкласів розв'язних задач в комбінаторній оптимізації шляхом моделювання вхідних даних функціями натурального аргументу. Це дає змогу досліджувати різні структури та аналізувати в залежності від них зміну значень цільової функції для певного впорядкування комбінаторних конфігурацій.

**Основна частина.** Зміну значень цільової функції в залежності від кутового коефіцієнта функції натурального аргументу розглянемо на прикладі задачі комівояжера, яка формулюється так. Задано  $n$  міст, відстань між якими відома. Координати входу та виходу кожного міста збігаються. Необхідно знайти найкоротший шлях, який проходить через усі міста один раз та повертається в початковий пункт. Ця задача задається однією базовою множиною  $A$ , між елементами якої наявні зв'язки. Значення ваг між елементами базової множини задамо однією симетричною матрицею  $C$ . Для визначення наявності або відсутності зв'язків між елементами базової

вої множини уведемо симетричну комбінаторну  $(0,1)$ -матрицю  $Q(w^k)$ , де  $w^k \in W$  — аргумент цільової функції (перестановка),  $k$  — порядковий номер  $w^k$  у їхній множині  $W$ . Подамо елементи  $h$  наддіагоналей симетричної матриці  $C$  функцією натурального аргументу  $\varphi(j)|_1^m$ , а елементи  $h$  наддіагоналей комбінаторної матриці  $Q(w^k)$  — комбінаторною функцією  $\beta(f(j), w^k)|_1^m$ , де  $m = n(n-1)/2$  — кількість елементів  $h$  наддіагоналей матриць  $C$  та  $Q(w^k)$ ,  $h = \overline{1, n-1}$ . В задачах комбінаторної оптимізації закономірність зміни значень цільової функції залежить від упорядкування комбінаторних конфігурацій. За певними правилами упорядкуємо множину перестановок підмножинами  $K_1, K_2, \dots, K_q$ , де  $q$  — їхня кількість. В задачі комівояжера, множина перестановок розбивається на  $n-2$  підмножини. Тоді маємо  $K_1, K_2, \dots, K_{n-2}$ . Назвемо  $\varphi(j)|_1^m$  прямою, якщо  $\varphi(j) = k^0 j + b$  (або  $\varphi(j) = 2^j$ ), та її обернену  $\varphi(j) = k^0(m-j+1) + b$  (або  $\varphi(j) = 2^{m-j+1}$ ). Ці функції симетричні відносно лінії, паралельній осі абсцис або осі ординат.

**Теорема.** Якщо в задачі комівояжера  $\varphi(j) = k^0 j + b$  для  $k^0 \geq 1/2$  або  $\varphi(j) = 2^j$ , то найбільшого значення цільова функція набуває для  $w^k \in K_1$ , а найменшого — для  $w^k \in K_{n-2}$ .

Якщо в задачі комівояжера  $\varphi(j) = k^0(m-j+1) + b$  для  $k^0 \geq 1/2$  або  $\varphi(j) = 2^{m-j+1}$ , то найбільшого значення цільова функція набуває для  $w^k \in K_{n-2}$ , а найменшого — для  $w^k \in K_1$ .

З теореми випливає, що для заданого впорядкування перестановок  $K_1, K_2, \dots, K_{n-2}$  в першому випадку теореми цільова функція — обернена, а в другому — пряма. Вони симетричні відносно лінії, паралельній осі ординат. У [1] оговорено, що для певного впорядкування множини перестановок має місце симетрія. Ця властивість пояснює, чому в задачах комбінаторної оптимізації для прямих та обернених функцій натурального аргументу, якими моделюються вхідні дані, цільова функція змінюється симетрично: як пряма та її обернена. Перехід від прямої та оберненої функцій проходить для задач, для яких  $\varphi(j) = k^0 j + b$  або  $\varphi(j) = k^0(m-j+1) + b$ , де  $k^0 < 1/2$ . Для цих випадків глобальні максимум та мінімум знаходяться в підмножинах  $K_2, \dots, K_{n-3}$ . В літературі описано розв'язні випадки для задачі комівояжера (матриці Кальмансона, Демиденко, Супніка), які моделюються лінійними функціями  $\varphi(j) = k^0(m-j+1) + b$  для  $k^0 = 1$  або вгнутими унімодальними. Для них знайдено глобальний мінімум — перестановки, які називають тур Майстра та пірамідальний тур. Як показують результати досліджень, ці перестановки знаходяться у підмножині  $K_1$ . Якщо для лінійної  $\varphi(j)|_1^m$   $k^0 = 1$ , то значення цільової функції для усіх перестановок, які знаходяться у підмножині  $K_1$ , однакове. Це і пояснює, чому Кальмансон та Демиденко для одного і того ж типу матриць знайшли різні перестановки, для яких цільова функція набуває найменшого, однакового значення, а інші автори отримали аналогічний результат.

**Висновок.** Отже, аналізуючи зміну значень цільової функції в задачах комбінаторної оптимізації в залежності від упорядкування її аргументу, структури вхідних даних та кутового коефіцієнта функції натурального аргументу можна побачити, що тут має місце симетрія. Ця властивість характерна для утворення та впорядкування комбінаторних множин (аргумента цільової функції). Тому для прямих та обернених функцій натурального аргументу цільова функція також змінюється симетрично як пряма та її обернена.

## Література

1. Тимофієва Н.К. Про симетрії комбінаторних множин та біологічних форм / Н.К. Тимофієва // System Analysis and Information Technologies: Proceedings of 16-th International Conference SAIT 2014 (May 26-30, 2014). — Kyiv: Institute for Applied System Analysis of National Technical University of Ukraine “Kyiv Politechnic Institute”, 2014. — P. 160 — 161.



УДК 919.8

А.П. Черватенко, аспірант, Дніпропетровськ.  
нац. ун.т ім. О. Гончара, pavlova-tonya@mail.ru

## ПАРАМЕТРИЧНА ІДЕНТИФІКАЦІЯ БАГАТОЗОННИХ ДИНАМІЧНИХ СИСТЕМ

Розглянуто задачу ідентифікації багатозонної моделі динаміки, розроблений метод розв'язання задачі використовує основні положення теорії неперервних задач оптимального розбиття множин.

*Ключові слова:* багатозонні динамічні моделі, параметрична ідентифікація систем, оптимальне розбиття множин.

Рассмотрена задача идентификации многозонной модели динамики, разработанный метод решения задачи использует основные положения теории непрерывных задач оптимального разбиения множеств.

*Ключевые слова:* многозонные динамические модели, параметрическая идентификация систем, оптимальное разбиение множеств.

The identification problem of multi-zone dynamics model is considered, a developed method for solving the problem uses the main principles of the theory of continuous problems of optimal sets partitioning.

*Keywords:* multi-zone dynamics models, parametric system identification, optimal sets partitioning.

Сьогодні розвиток теорії аналізу та синтезу енергозберігаючого управління на множині станів функціонування, створення методів оперативного синтезу керуючих впливів динамічними режимами енергоємних об'єктів є актуальним напрямком наукових досліджень. Такі енергоємні об'єкти, як машини з електроприводами, теплові апарати, технологічні установки у машинобудівній, хімічній, металургійній, будівельній промисловості, значну частку часу працюють в динамічних режимах. Зниження їх енергоспоживання можливе за рахунок оптимального керування на безлічі станів функціонування.

В роботі розглядається задача ідентифікації багатозонної моделі динаміки, в якій невідомими є не тільки границі між зонами функціонування об'єктів, але й деякі параметри, що впливають на стан об'єкта в межах певних зон. Як і в роботі [1], розроблений метод розв'язання задачі використовує основні положення теорії неперервних задач оптимального розбиття множин, яка дозволяє звести задачу нескінченновимірного програмування до задачі мінімізації недиференційовної функції декількох змінних. Алгоритм реконструкції систем звичайних диференціальних рівнянь з розривними правими частинами розроблений на основі поєднання елементів теорії обернених задач, методів розв'язання задач оптимального керування і неперервних задач оптимального розбиття множин. Розрахункові формули отримані за допомогою необхідних умов оптимальності.

Робота є послідовним продовженням наукових досліджень з питань застосування теорії та методів розв'язання неперервних задач оптимального розбиття множин для задач ідентифікації мультизонних динамічних систем. Приклади розв'язання задач відновлення границь між зонами функціонування динамічних систем свідчать про те, що якість реконструювання за допомогою розробленого алгоритму залежить від сукупності початкових даних задачі: величина часового інтервалу, крок інтегрування системи, кількість точок спостереження вихідної величини тощо. Досліджені питання, що пов'язані з некоректністю постановки обернених задач для систем диференціальних рівнянь з розривними правими частинами і засобами їх регуляризації.

### Література

1. Koriashkina L. One way to solve problems of multi-zone dynamics models identification / L. Koriashkina, A. Pravdivy, A. Cherevatenko // Power engineering control and information technologies in geotechnical systems. - CRC Press, 2014 — P. 153 — 160

UDC 517.977

**B.I. Mokin**, Dr.Eng.Sci., Professor,  
[vbmokin@gmail.com](mailto:vbmokin@gmail.com)  
**I.O. Chernova**, Post-graduate student,  
Vinnytsia National Technical University

## EQUIVALENT TO THE CRITICAL FREQUENCY MATHEMATICAL MODEL OF MINIMUM ORDER FOR A COMPLEX DYNAMIC OBJECT

Предложен метод синтеза эквивалентной за критической частотой математической модели минимального порядка для сложного динамического объекта. Показано, что минимальный порядок эквивалентной модели равен трем, и что алгоритм метода ее идентификации базируется на совместном решении системы четырех нелинейных уравнений, два из которых синтезируются из граничных условий, обусловленных минимальной и критической частотами спектра динамического объекта, а другие два синтезируются путем применения процедуры метода наименьших квадратов за критерием оптимизации, связанным с логарифмической амплитудной частотной характеристикой объекта

*Ключевые слова:* динамическая система; математическая модель; критическая частота; дифференциальное уравнение; эквивалентирование.

Запропоновано метод синтезу еквівалентної за критичною частотою математичної моделі мінімального порядку для складного динамічного об'єкту. Показано, що мінімальний порядок еквівалентної моделі дорівнює трьом, і що алгоритм методу її ідентифікації базується на сумісному розв'язанні системи чотирьох нелінійних рівнянь, два із яких синтезуються із граничних умов, обумовлених мінімальною та критичною частотами спектра динамічного об'єкта, а інші два синтезуються шляхом застосування процедури методу найменших квадратів за критерієм оптимізації, пов'язаним з логарифмічною амплітудною частотною характеристикою об'єкта.

*Ключові слова:* динамічний об'єкт; математична модель; критична частота; диференціальне рівняння; еквівалентування.

There had been proposed the method of synthesis of the equivalent to the critical frequency mathematical model of minimum order for a complex dynamic object. It is shown that the minimum order of the equivalent model is the third and the algorithm of method of its identification is based on the joint solution of a system of four nonlinear equations, two of which are synthesized from the boundary conditions due to the minimum and the critical frequency of spectrum of the dynamic object, and the other two are synthesized by applying the procedure of method for the least squares by the optimization criterion relating to Bode magnitude plots of the object.

*Keywords:* the dynamical object; the mathematical model; the critical frequency; the differential equation; equivalenting.

The synthesis of the equivalent mathematical models plays an important role in problems of analysis and synthesis of control laws of the complex dynamic objects. In the work [1] there were determined the conditions for synthesis of such model of the object, processes in which can be described by linear differential equation of  $n^{\text{th}}$  order. In [1] also was shown that in case of the equivalenting of the object in tasks control with a negative unity feedback and when critical frequency  $\omega_{cr}$  is lower than cutoff frequency  $\omega_c$  for this object

$$\omega_c > \omega_{cr}, \quad (1)$$

minimum order of equivalent model of the object is the third

$$a_3 \frac{d^3 y}{dt^3} + a_2 \frac{d^2 y}{dt^2} + a_1 \frac{dy}{dt} + y = K_3 x, \quad (2)$$

where  $x$  — input signal;

$y$  — output signal;

$t$  — time;

$a_1, a_2, a_3, K_3$  — parameters.

At the same time  $\omega_{cr}$  can be determined by the equation

$$\varphi(\omega_{cr}) = -\pi, \quad (3)$$

where  $\varphi(\omega)$  — the experimentally determined Bode phase plot (BPP) of the object, which for the model (2)

$$-\arctg \frac{a_1 \omega_{cr} - a_3 \omega_{cr}^3}{1 - a_2 \omega_{cr}^2} = -\pi, \quad (4)$$

where

$$a_1 = a_3 \omega_{cr}^2 \quad (5)$$

It is shown that the algorithm of the method of synthesizing of the model (2) is based on the joint solving of the four nonlinear equations, the first of which is (5). The second equation can be derived from the boundary condition

$$L(\omega_m) = L_3(\omega_m) \approx 20 \lg K_3 \quad (6)$$

or

$$K_3 = 10^{\frac{L(\omega_m)}{20}}, \quad (7)$$

where  $L(\omega_m) = 20 \lg A(\omega_m)$  — the experimentally determined value of the Bode magnitude plot (BMP) under a minimum frequency  $\omega_m$  of spectrum of the object;

$L_3(\omega_m)$  — the value of BMP which is determined under a minimum frequency  $\omega_m$  of spectrum of the equivalent mathematical model (1).

The third and the fourth equation with respect to the unknown parameters  $a_2$  and  $a_3$

$$\sum_{s=1}^N \frac{\{L(\omega_s) - 20 \lg K_3 + 10 \lg [(1 - a_2 \omega_s^2)^2 + a_3^2 (\omega_{cr}^2 \omega_s - \omega_s^3)^2]\} (1 - a_2 \omega_s^2) \omega_s^2}{(1 - a_2 \omega_s^2)^2 + a_3^2 (\omega_{cr}^2 \omega_s - \omega_s^3)^2} = 0, \quad (8)$$

$$\sum_{s=1}^N \frac{\{L(\omega_s) - 20 \lg K_3 + 10 \lg [(1 - a_2 \omega_s^2)^2 + a_3^2 (\omega_{cr}^2 \omega_s - \omega_s^3)^2]\} (\omega_{cr}^2 \omega_s - \omega_s^3)^2}{(1 - a_2 \omega_s^2)^2 + a_3^2 (\omega_{cr}^2 \omega_s - \omega_s^3)^2} = 0, \quad (9)$$

could be obtained by taking partial derivatives of functional  $\Sigma^L$  —

$$\Sigma^L = \sum_{s=1}^N [L(\omega_s) - L_3(\omega_s)]^2 = \sum_{s=1}^N \{L(\omega_s) - 20 \lg K_3 + 10 \lg [(1 - a_2 \omega_s^2)^2 + a_3^2 (\omega_{cr}^2 \omega_s - \omega_s^3)^2]\}^2 \quad (10)$$

with respect to the parameters  $a_2$  and  $a_3$  respectively and equating these derivatives to zero. The joint solution of equations (5), (7), (8) and (9) allows to determine the numerical values of all the parameters in equation (2).

Thus, there had been developed the method of synthesis of the equivalent to the critical frequency mathematical model of minimum order (2) for the complex dynamic object which can be adequately described by the classical linear differential equation of  $n^{\text{th}}$  order. This model describes the process in the object with acceptable error, even under the condition (1).

## References

1. Mokin O.B. Determination of conditions when motion of dynamic objects with order of mathematical models higher than three can be presented via equivalent models with order not exceeding three / O.B. Mokin, V.B. Mokin, B.I. Mokin — *Visnyk of Vinnytsia Politechnical Institute*, No.4, 2014, pp. 7 — 14.

УДК 519.688

Р.А. Шафеев, аспирант НТУ«ХПИ»,  
roman.shafeyev@gmail.com

# МОДИФИКАЦИЯ АЛГОРИТМА ПОИСКА С ЗАПРЕТАМИ ПУТЕМ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СТРАТЕГИИ АДАПТИВНОЙ НАСТРОЙКИ ЕГО ПАРАМЕТРОВ В ПРОЦЕССЕ РЕШЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКОЙ ЗАДАЧИ КУРЬЕРСКОЙ СЛУЖБЫ ЭКСПРЕСС-ДОСТАВКИ

У роботі розглядається динамічна задача маршрутизації кур'єрської служби експрес-доставки з тимчасовими обмеженнями в межах одного міста, для вирішення якої була побудована дискретна модель та обчислювальна схема на базі імовірнісного алгоритму пошуку із заборонами. Запропоновано модифікацію алгоритму пошуку із заборонами з метою адаптивної настройки параметрів алгоритму в процесі роботи алгоритму оптимізації. Ефективність обчислювальної схеми була перевірена на відомих тестових завданнях, а також виконано порівняльний аналіз з іншими відомими реалізаціями даного алгоритму. За результатами численних експериментів було визначено, що модифікований алгоритм дає більш якісні рішення в термінах балансу між кількістю транспортних засобів і вартістю маршрутів у порівнянні з алгоритмом без використання запропонованої модифікації.

*Ключові слова:* динамічна маршрутизація; кур'єрська доставка; машинне навчання; пошук із заборонами; непараметрична регресія; динамічна дискретна оптимізація.

В работе рассматривается динамическая задача маршрутизации курьерской службы экспресс-доставки с временными ограничениями в пределах одного города, для решения которой была построена дискретная модель и вычислительная схема на базе вероятностного алгоритма поиска с запретами. Предложена модификация алгоритма поиска с запретами с целью адаптивной настройки параметров алгоритма в процессе работы алгоритма оптимизации. Эффективность вычислительной схемы была проверена на известных тестовых задачах, а также выполнен сравнительный анализ с другими известными реализациями данного алгоритма. По результатам численных экспериментов было определено, что модифицированный алгоритм дает более качественные решения в терминах баланса между количеством транспортных средств и стоимостью маршрутов в сравнении с алгоритмом без использования предложенной модификации.

*Ключевые слова:* динамическая маршрутизация; курьерская доставка; машинное обучение; поиск с запретами, непараметрическая регрессия; динамическая дискретная оптимизация.

The paper considers the dynamic routing problem of courier express delivery with time windows within a city, for which was built the discrete model and a computational scheme based on probabilistic tabu search algorithm. We have proposed a modification of the tabu search algorithm to configure the parameters of the algorithm in the optimization process. The effectiveness of the computational scheme was tested on known model problems and was performed a comparative analysis with other known implementations of this algorithm. According to the results of numerical experiments, it was determined that the modified algorithm gives better solutions in terms of the balance between the number of vehicles and the cost of the route in comparison with the use of the proposed algorithm without modification.

*Keywords:* dynamic vehicle routing; courier delivery; reinforcement learning; tabu search; nonparametric regression; dynamic discrete optimization.

**Введение.** Благодаря последним достижениям в области информационных и коммуникационных технологий появилась возможность определять местоположение транспортного средства в реальном времени, быстро получать новые запросы от клиентов и оценивать время, которое требуется потратить на объезд клиентов транспортным средством. Правильно обработав эти данные можно существенно уменьшить стоимость и время транспортировки и тем самым повысить качество обслуживания клиентов. В последнее время стали появляться услуги экспресс-доставки внутри одного города. Если раньше доставка формировалась днем ранее, то теперь время ожидания клиентом товара после отправления заказа может составлять считанные часы. В таком случае задача курьерской экспресс-доставки является динамической, так как

требуется постоянно обновлять составленные ранее маршруты сразу после получения нового запроса от клиента.

**Формальная постановка задачи.** Динамическая задача курьерской службы доставки принадлежит к классу динамических задач маршрутизации на транспорте с временными ограничениями. Динамическая задача маршрутизации на транспорте, как и любая динамическая дискретная задача оптимизации может быть представлена как некоторый дискретный процесс, развивающийся во времени.

Пусть существует некоторая коммуникационная связь между диспетчерским центром и водителями автотранспортных средств. Диспетчерский центр в реальном времени выполняет прием (или отклонение) клиентских запросов. Для выполнения клиентского запроса требуется одно транспортное средство, которому необходимо перевезти груз от отправителя к получателю. Все запросы должны быть выполнены без нарушения грузоподъемности (вместимости) транспортных средств или заданных временных окон. После появления внешнего возмущения система распределения заявок выполняет перерасчет плана посещения клиентов. Внешним возмущением являются изменения текущего состояния динамической системы, которые вызваны следующими факторами: изменение множества клиентских заявок; изменение пропускной способности на дорожном маршруте.

Решением задачи является план передвижения транспортных средств с целью выполнения всех клиентских заказов в указанные сроки. Основной целью работы является разработка алгоритма оптимизации, способного непрерывно адаптировать решение к изменяющейся среде.

**Алгоритм решения.** Динамическая задача маршрутизации рассматривается как серия статических, где очередная статическая задача возникает при появлении внешнего возмущения. Для решения задач маршрутизации был разработан метаэвристический алгоритм, в основу которого положен вероятностный алгоритм поиска с запретами [1].

**Модификация.** Основываясь на результатах экспериментов было установлено, что качество получаемых решений может варьироваться в пределах 10...15 % в зависимости от выбранных значений таких параметров алгоритма, как вероятность попадания точки в окрестность, размер списка запретов и размер окрестности. Поэтому предлагается задавать параметры алгоритма не в виде фиксированных значений, а как случайная величина с плотностью распределения, которая в процессе работы системы распределения заявок проходит обучение с подкреплением. Основная идея заключается в том, что плотность распределения должна быть больше в тех точках (значения параметра), в которых чаще были получены высококачественные решения.

**Численные эксперименты.** Для того чтобы проверить эффективность модификации был проведен сравнительный анализ на тестовых задачах курьерской службы доставки, построенных на основе модельных задачах маршрутизации Голдберга (Goldberg), Кристофайдса (Christofides) и Тейларда (Taillard). Результаты экспериментов показали высокую эффективность предложенного адаптивного алгоритма.

**Выводы.** В ходе исследования была построена дискретная модель и разработан модифицированный алгоритм поиска с запретами для решения задачи курьерской службы экспресс-доставки. По результатам численных экспериментов было определено, что модифицированный алгоритм дает более качественные решения в терминах баланса между количеством транспортных средств и стоимостью маршрутов в сравнении с алгоритмом без использования предложенной модификации. На практике этот алгоритм может быть использован для поддержки принятия решений в интеллектуальных системах с целью улучшения качества обслуживания клиентов и сокращения расходов на топливо.

## Литература

1. Шафеев Р.А., Любчик Л.М., Решение транспортной задачи с ограничениями по времени с помощью метаэвристического алгоритма / Р.А. Шафеев, Л.М. Любчик // Вестн. Нац. техн. ун-та «ХПИ». Сб. науч. тр.. Серия: Системный анализ, управление и информационные технологии. — 2013 — Харьков: НТУ «ХПИ» № 3 (977). — С. 35 — 39.

УДК 517.93

І.А. Бойцова, канд. фіз.-мат. наук, Одес. нац. ун-т  
ім. І.І. Мечникова, boitsova.irina@mail.ru

## УСЕРЕДНЕННЯ У НЕЛІНІЙНИХ ЗАДАЧАХ ОПТИМАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ ЗІ ШВИДКИМИ ТА ПОВІЛЬНИМИ ЗМІННИМИ

Задача оптимального керування описується нелінійною системою диференціальних рівнянь зі швидкими та повільними змінними і термінальним критерієм якості. Доводиться, що оптимальне керування усередненої задачі є асимптотично оптимальним керуванням початкової задачі.

*Ключові слова:* задача оптимального керування; система диференціальних рівнянь зі швидкими та повільними змінними; метод усереднення; асимптотично оптимальне керування.

Задача оптимального управління описывается нелинейной системой дифференциальных уравнений с быстрыми и медленными переменными и терминальным критерием качества. Доказывается, что оптимальное управление усредненной задачи является асимптотически оптимальным управлением данной задачи.

*Ключевые слова:* задача оптимального управления; система дифференциальных уравнений с быстрыми и медленными переменными; метод усреднения; асимптотически оптимальное управление.

The task of optimal control is described by the nonlinear system of differential equations with rapid and slow variables and by the terminal criterion of quality. Proved, that the optimal control of averaging task is asymptotically optimal control of initial task.

*Keywords:* the task of optimal control; the system of differential equations with rapid and slow variables; method of averaging; asymptotically optimal control.

Доклад присвячений знаходженню асимптотично оптимального керування нелінійної задачі зі швидкими та повільними змінними, яке фактично є оптимальним керуванням відповідної усередненої задачі.

Розглянемо задачу оптимального керування, що описується системою диференціальних рівнянь зі швидкими та повільними змінними

$$\begin{aligned} \dot{x} &= \varepsilon f(t, x, y, u), & x(0) &= x_0, \\ \dot{y} &= g(t, x, y), & y(0) &= y_0, \end{aligned} \quad (1)$$

та термінальним критерієм якості

$$J(u) = \Phi(x(T)) \rightarrow \min_{u \in U}, \quad (2)$$

де  $t \in [0, T]$  — час;  $T = L\varepsilon^{-1}$ ;  $L > 0$  — задана постійна;

$\varepsilon > 0$  — малий параметр;

$x(t) \in D_x \subset R^n$  — повільні змінні;

$y(t) \in D_y \subset R^m$  — швидкі змінні;

$f(t, x, y, u)$  — задана вектор-функція розмірності  $n$ ;

$g(t, x, y)$  — задана вектор-функція розмірності  $m$ ;

$\Phi(x)$  — задана скалярна функція;

$u(t) \in U \subset R^r$  керування системою;

$x_0, y_0$  — задані початкові умови задачі.

**Означення 1** [2]. Керування  $u(t)$  вважаються допустимими для задачі (1), якщо вони задовольняють умовам:

—  $u(t)$  – вимірні, локально інтегровані при  $t \geq 0$  та  $u(t) \in U$  при  $t \geq 0$ ;

— для будь-якого керування  $u(t) \in U$  існує стала  $u_c \in U$  така, що  $\|u(t) - u_c\| \leq \alpha(t)$ , де  $\alpha(t)$  не залежить від  $u(t)$  і  $\int_0^{\infty} \alpha(t) dt < +\infty$ ;

— існує  $\varepsilon_0 > 0$ , яке не залежить від  $u(t)$ , що для усіх  $\varepsilon \in (0, \varepsilon_0]$  відповідні до цих керувань розв'язки  $x(t) \in D_x$ ,  $y(t) \in D_y$  задачі Коші для системи диференціальних рівнянь (1) визначені для усіх  $t \in [0, T]$ .

**Означення 2.** Оптимальним керуванням задачі (1), (2) вважається таке допустиме керування  $u^*(t)$ , яке критерію якості (2) забезпечує мінімальне значення  $J^* = J(u^*)$ .

Нехай рівномірно відносно  $x, u, y_0, t_0$  існує границя

$$f_0(x, u) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} f(s, x, h(s, x, y_0), u) ds$$

вздовж розв'язку  $y = h(s, x, y_0)$  виродженої задачі, яка отримується з системи (1), якщо  $\varepsilon = 0$ .

Тоді задачі оптимального керування (1), (2) поставимо у відповідність усереднену задачу оптимального керування, що описується системою диференціальних рівнянь

$$\dot{z} = \varepsilon f_0(z, v), \quad z(0) = x_0 \quad (3)$$

та термінальним критерієм якості

$$J_0(v) = \Phi(z(T)) \rightarrow \min_{v \in U}, \quad (4)$$

де функція  $v = v(t)$  — допустиме керування задачі (3). За  $v^*(t)$  візьмемо оптимальне керування задачі (3), (4), яке критерію якості (4) забезпечує мінімальне значення  $J_0^* = J_0(v^*)$ .

Визначено умови, при яких доведено, що допустимі керування для системи (1) або (3) забезпечують побудову відповідних траєкторій даної та усередненої систем, що є близькими на асимптотично скінченному інтервалі часу.

Доведено, що для будь-яких  $\eta > 0$  та  $L > 0$  існує таке  $\varepsilon_0(\eta, L) > 0$ , що для усіх  $\varepsilon \in (0, \varepsilon_0]$  та  $t \in [0, T]$  справедливими є оцінки

$$|J_0^* - J^*| \leq \eta, \quad J(v^*) - J^* \leq \eta,$$

тобто оптимальний розв'язок усередненої задачі (3), (4) є асимптотично оптимальним розв'язком задачі (1), (2).

## Література

1. Плотников В.А., Усреднение в задачах оптимального управления системами с быстрыми и медленными переменными / В.А. Плотников, И.А. Бойцова // Проблемы управления и информатики. — 2000. — № 5. — С.152 — 156.
2. Станжицкий А.Н. Исследование задач оптимального управления на полуоси методом усреднения / А.Н. Станжицкий, Т.В. Добродзий // Дифференциальные уравнения. — 2011. — Т. 47, № 2. — С.264 — 277.

УДК 517.93

О.Д. Кичмаренко, канд. физ.-мат. наук, доцент,  
М.Л. Карпычева, аспирант,  
m.karpblcheva@gmail.com,  
Одес. нац. университет им. И.И. Мечникова

## УСРЕДНЕНИЕ В ЛИНЕЙНЫХ ПО УПРАВЛЕНИЮ ДИСКРЕТНЫХ ЗАДАЧАХ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ С ПЕРЕМЕННЫМ ЗАПАЗДЫВАНИЕМ

Задача оптимального керування описується лінійною за керуванням системою дискретних рівнянь зі змінним запізненням і термінальним критерієм якості. Доводиться, що оптимальне керування усередненої задачі є асимптотично оптимальним керуванням початкової задачі.

*Ключові слова:* задача оптимального керування; система дискретних рівнянь зі змінним запізненням; метод усереднення; асимптотично оптимальне керування.

Задача оптимального управління описывается линейной по управлению системой дискретных уравнений с переменным запаздыванием и терминальным критерием качества. Доказывается, что оптимальное управление усредненной задачи является асимптотически оптимальным управлением данной задачи

*Ключевые слова:* задача оптимального управления; система дискретных уравнений с переменным запаздыванием; метод усреднения; асимптотически оптимальное управление.

The task of optimal control is described by the system of discrete equations with variable delay and by the terminal criterion of quality. The control in task is linearly. Proved, that the optimal control of averaging task is asymptotically optimal control of initial task.

*Keywords:* the task of optimal control; the system of discrete equations with variable delay; method of averaging; asymptotically optimal control.

Метод усреднения применяется для решения задачи оптимального управления с переменным запаздыванием по состоянию. Особенностью задачи является то, что управление в задаче входит линейно. Доказывается, что оптимальное управление усредненной задачи является асимптотически оптимальным управлением исходной задачи.

Рассмотрим систему дискретных уравнений управляемого движения

$$x_{i+1} = x_i + \varepsilon \cdot \left[ f(i, x_i, x_{s(i)}) + A(i, x_i, x_{s(i)}) \cdot u_i \right], \quad x_0 = x^0 \quad (1)$$

и терминальным критерием качества

$$J(u) = \Phi(x_N) \rightarrow \min_{u \in U}, \quad (2)$$

где  $x_i \in D \subset R^n$  — текущее состояние системы из замкнутого множества  $D$ ;

$i$  — текущий момент дискретного времени, причем  $i \in I = \{0, 1, 2, \dots, N\}$ ,  $N = E(L\varepsilon^{-1})$ ,

$L = \text{const}$ ;

$E(c)$  — целая часть числа  $c$ ;

$\varepsilon > 0$  — малый параметр;

$f(i, x_i, x_{s(i)})$  — заданная  $n$ -мерная функция;

$A(i, x_i, x_{s(i)})$  — заданная  $n \times r$ -матрица;

$\Phi(x)$  — заданная скалярная функция;

$u_i \in U \subset \text{comp}(R^r)$  — текущее управление из компактного множества  $U$ ;

$s(i) \in I_s = \{0, 1, 2, \dots, i\}$  — функция запаздывания, определяет момент влияния переменного запаздывания на текущее состояние системы,  $s(i) \leq i$  для любого  $i \in I$ .



**Определение 1.** Допустимыми управлениями задачи (1) назовем функции  $u = \{u_i \in U, i \in I\}$  из компактного множества  $U$ , для которых найдется значение  $\varepsilon_0 > 0$ , не зависящее от  $u = \{u_i \in U, i \in I\}$ , что для всех  $\varepsilon \in (0, \varepsilon_0]$  соответствующие решения  $x = \{x_i, i \in I\}$  задачи управления (1) определены и принадлежат замкнутому множеству  $D$ .

**Определение 2.** Оптимальным управлением задачи (1), (2) назовем такое допустимое управление  $u^* = \{u_i^* \in U, i \in I\}$ , на котором критерий качества (2) принимает минимальное значение  $J^* = J(u^*)$ .

Предположим, что равномерно относительно целочисленного  $q \geq 0$  и  $w^1, w^2 \in D$  существуют функции  $f_0(w^1, w^2)$ ,  $A_0(w^1, w^2)$ , удовлетворяющие соотношениям

$$\lim_{h \rightarrow \infty} \left\| \frac{1}{h} \sum_{j=q}^{q+h-1} f(j, w^1, w^2) - f_0(w^1, w^2) \right\| = 0,$$

$$\lim_{h \rightarrow \infty} \frac{1}{h} \sum_{j=q}^{q+h-1} \|A(j, w^1, w^2) - A_0(w^1, w^2)\| = 0,$$

Для задачи оптимального управления (1), (2) рассмотрим соответствующую усредненную задачу оптимального управления, которая описывается системой дискретных уравнений

$$y_{i+1} = y_i + \varepsilon \cdot \left[ f_0(y_i, y_{s(i)}) + A_0(y_i, y_{s(i)}) \cdot v_i \right], \quad y_0 = x^0 \quad (3)$$

и терминальным критерием качества

$$J_0(v) = \Phi(y_N) \rightarrow \min_{v \in U}, \quad (4)$$

где  $y = \{y_i, i \in I\}$  — решение усредненной задачи;

$v = \{v_i \in U, i \in I\}$  – допустимые управления из того же компактного множества  $U$ .

Через  $v^* = \{v_i^* \in U, i \in I\}$  обозначим оптимальное управление задачи (3), (4), на котором критерий качества (4) принимает минимальное значение  $J_0^* = J_0(v^*)$ .

Доказано, что допустимое управление исходной задачи является допустимым управлением усредненной задачи. И наоборот, допустимое управление усредненной задачи является допустимым управлением исходной задачи. При этом соответствующие траектории обеих задач являются близкими.

Доказано, что для любых  $\eta > 0$  и  $L > 0$  существует  $\varepsilon_0(\eta, L) > 0$ , что для всех  $\varepsilon \in (0, \varepsilon_0]$  и  $t \in [0, T]$  справедливы оценки

$$|J_0^* - J^*| \leq \eta, \quad J(v^*) - J^* \leq \eta,$$

то есть, оптимальное решение усредненной задачи (3), (4) является асимптотически оптимальным решением задачи (1), (2).

## Литература

1. Плотников В.А. Метод усреднения дискретных систем и его приложение к задачам управления / В.А. Плотников, Л.И. Плотникова, А.Т. Яровой // Нелинейные колебания. — 2004. — Т.7, № 2. — С. 241 — 254.
2. Кичмаренко О.Д. Усреднение систем дискретных уравнений с постоянным запаздыванием / О.Д. Кичмаренко, М.Л. Карпычева. // Научн. вест. Ужгород. ун-та. Математика и информатика. — 2012. — Вып. 23, № 2. — С. 76 — 85.
3. Кичмаренко О.Д. Усреднение периодических управляемых систем с постоянным запаздыванием на дискретном времени / О.Д. Кичмаренко, М.Л. Карпычева // Вестн. Одес. нац. ун-та. Математика и механика. 2012. Т.17, вып. 1-2. С. 54 — 69.
4. Пропой А.И. О принципе максимума для дискретных систем управления / А.И. Пропой // Автоматика и телемеханика. — 1965. — Т 26, № 7. — С. 1177 — 1187.

УДК 517.91

А.С. Куценко, д-р техн. наук, проф., Нац. техн.  
ун-т «ХПИ»

## ОЦЕНКА НЕРАВНОМЕРНОСТИ ДЕФОРМАЦИИ ОБЛАСТИ ДОСТИЖИМОСТИ ЛИНЕЙНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Пропонується аналітичне рішення лінійного матричного диференціального рівняння і на його основі оцінка ступеня деформації еліпсоїда досяжності множини фазових траєкторій як функції часу

*Ключові слова:* еліпсоїд досяжності; фазові траєкторії; стійкість.

Предлагается аналитическое решение линейного матричного дифференциального уравнения и на его основе оценка степени деформации эллипсоида достижимости множества фазовых траекторий как функции времени

*Ключевые слова:* эллипсоид достижимости; фазовые траектории; устойчивость.

Analytical solution of the linear matrix differential equation and, on its basis, estimation of the reachability ellipsoid of the phase trajectories set deformation degree as a function of time is proposed.

*Keywords:* reachability ellipsoid; phase trajectories; stability.

Некоторые количественные показатели устойчивости динамических систем могут быть получены на основе изучения поведения ансамбля фазовых траекторий, начинающихся из единичного шара [1]. Одним из таких показателей является степень сжатия фазового объема, вторым степень неравномерности деформации области достижимости в различных направлениях фазового пространства [2]. Наиболее удобным для оценки степени деформации с точки зрения простоты вычислений является след матрицы эллипсоида достижимости, минимальное значение которого при фиксированном объеме соответствует сферическому эллипсоиду.

В настоящей работе рассматривается один из возможных подходов к оценке степени деформации эллипсоида достижимости на траекториях устойчивой динамической системы.

Рассмотрим множество решений линейной стационарной динамической системы

$$\dot{x} = Ax, \quad x \in R^n, \quad A \in R^{n \times n} \quad (1)$$

при начальных условиях  $x_0 \in \varepsilon$ , где  $\varepsilon = \{x | x^T x \leq 1\}$  — единичный шар.

Дифференциальное уравнение для матрицы  $R$  эллипсоида достижимости [1] имеет вид

$$\dot{R} = AR + RA^T, \quad R(0) = E.$$

Решение матричного дифференциального уравнения (2) можно представить в виде

$$R(t) = \sum_{i,j} U_{ij} tr V_{ij} e^{\lambda_{ij} t}. \quad (2)$$

В соотношении (2)  $\lambda_{ij} = \lambda_i + \lambda_j$ ,  $U_{ij} = u_i u_j^T$ ,  $V_{ij} = v_i v_j^T$ ,  $i, j = \overline{1, n}$ ;  $u_i$  и  $v_i$  — собственные векторы матриц  $A$  и  $A^T$ , соответствующие собственным числам  $\lambda_i$  матрицы  $A$ .

Матрицы  $U_{ij}$  и  $V_{ij}$  представляют собой собственные векторы матричных линейных операторов  $\hat{A}(X) = AX + XA^T$  и  $\hat{A}^*(X) = A^T X + XA$ , соответствующие собственным числам  $\lambda_{ij}$ . Показано, что для  $trR(t)$  справедлива следующая оценка:

$$trR(t) \leq \sum_{i,j} R_{ij} e^{\lambda_{ij} t} + \sum_{i,j} \sqrt{R_{ij}^2 + I_{ij}^2} e^{\alpha_{ij} t}. \quad (3)$$

В соотношении (3) первое слагаемое соответствует вещественным  $\lambda_{ij}$ , а второе — комплексно сопряженным  $\lambda_{ij} = \alpha_{ij} \pm i\beta_{ij}$  собственным числам операторов  $\hat{A}(X)$  и  $\hat{A}^*(X)$ ;

$$\begin{aligned} R_{ij} &= \text{tr}C_{ij} \cdot \text{tr}A_{ij} - \text{tr}D_{ij} \cdot \text{tr}B_{ij}, \\ I_{ij} &= \text{tr}D_{ij} \cdot \text{tr}A_{ij} + \text{tr}C_{ij} \cdot \text{tr}B_{ij}. \end{aligned} \quad (4)$$

В соотношениях (4)  $A_{ij}$ ,  $C_{ij}$  – вещественные; а  $B_{ij}$ ,  $D_{ij}$  – мнимые части комплексных матриц  $U_{ij}$  и  $V_{ij}$  соответственно. В соответствии с формулой Лиувилля величина фазового объема  $V(t)$  на множестве траекторий системы (1) будет изменяться согласно соотношению

$$V(t) = V(0)e^{\text{tr}At},$$

а след матрицы сферы  $R_s(t)$  объема  $V(t)$  запишется как

$$\text{tr}R_s(t) = n[\exp(2\text{tr}At)]^{1/n}. \quad (5)$$

Тогда степень неравномерности деформации  $\sigma(t)$  контрольного сферического множества можно представить в виде отношения оценки (3) к следу матрицы сферы соответствующего объема (5). После несложных преобразований оценка величины  $\sigma(t)$  примет вид

$$\sigma(t) \leq \sum_{i=1}^m \xi_i \exp(\alpha_i - a)t. \quad (6)$$

В выражении (6)  $\xi_i$  – некоторые постоянные,  $\alpha_i$  – вещественные части собственных чисел матрицы  $A$ ,  $a = 2\text{tr}A/n$ ,  $m$  – суммарное количество вещественных и комплексно сопряженных пар собственных чисел матрицы  $A$ .

Таким образом, оценка степени деформации эллипсоида достижимости сводится к простым алгоритмам, что дает возможность без интегрирования матричных дифференциальных уравнений исследовать множественные переходные процессы устойчивых динамических систем.

### Литература

1. Куценко А.С. Об одном подходе к количественной оценке степени устойчивости динамических систем / А.С. Куценко, С.В. Коваленко // Системи управління, навігації та зв'язку. — К.: ЦНДІ НіУ, 2011. — Вип. 3(20). — С. 92 — 94.
2. Куценко А.С. Количественные показатели устойчивости динамических систем / А.С. Куценко, С.В. Коваленко // Automatics-2012. XIX Міжнар. конф. з автоматичного управління, 26-28 вересня 2012. — К.: НУХТ, 2012. — Вип. 3(20). — С. 72 — 73.

УДК 531.38; 629.7

А.П. Панов, д-р техн. наук, проф., Междунар.  
Акад. навигации и управления движением, Укра-  
инское отделение, anatoliy\_panov@ukr.net

## ОБОБЩЕННЫЕ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ УРАВНЕНИЯ ЭЙЛЕРА-ГЕССА В ЗАДАЧАХ ДИНАМИКИ И ОРИЕНТАЦИИ ТВЕРДОГО ТЕЛА

Розглядаються узагальнені динамічні диференціальні рівняння вигляду Ейлера-Гесса, які вміщують довільний тривимірний вектор. З узагальнених рівнянь виходять класичні рівняння Гесса і нові форми динамічних рівнянь обертання твердого тіла з нерухомою точкою.

*Ключові слова:* рівняння Ейлера-Пуассона, Гесса; динаміка твердого тіла; орієнтація.

Рассматриваются обобщенные динамические дифференциальные уравнения вида Эйлера-Гесса, которые содержат произвольный трехмерный вектор. Из обобщенных уравнений получаются классические уравнения Гесса и новые формы динамических уравнений вращения твердого тела с неподвижной точкой.

*Ключевые слова:* уравнения Эйлера-Пуассона, Гесса; динамика твердого тела; ориентация.

This paper deals with the generalized differential dynamic equations of the Euler-Hess form, which contain an arbitrary three-dimensional vector. From generalized equations we can obtain classical equation of Hess and new forms of dynamic equations of rigid body rotation, that has the fixed point.

*Keywords:* Euler-Poisson equations, Hess equations; dynamic of a rigid body; orientation.

**Введение.** Рассматривается традиционная задача понижения (редукции) порядка системы шести скалярных классических динамических уравнений Эйлера-Пуассона [1, 2, 3]:

$$\dot{\bar{g}} = \bar{g} \times \bar{\omega} - P_T [\bar{\rho} \times \bar{\gamma}], \quad (1)$$

$$\dot{\bar{\gamma}} = \bar{\gamma} \times \bar{\omega}, \quad (2)$$

образуемых уравнением Эйлера (1) и уравнением Пуассона (2). В этих уравнениях  $\bar{g}$  — вектор кинетического момента твердого тела (ТТ);  $\dot{\bar{g}} = (d\bar{g}/dt)$  — относительная (локальная) производная по времени  $t$  вектора  $\bar{g} = \mathbf{S}\bar{\omega}$  кинетического момента ТТ ( $\mathbf{S}$  — диагональный тензор инерции);  $\bar{\omega}$  — вектор угловой скорости ТТ;  $\bar{\rho}$  — радиус-вектор центра масс ТТ с началом в неподвижной точке;  $P_T$  — вес тела;  $\bar{\gamma}$  — орт вертикали;  $\dot{\bar{\gamma}} = (d\bar{\gamma}/dt)$  — относительная производная.

Эти уравнения имеют три независимых алгебраических первых интеграла: 1) интеграл энергии —  $C_1 = (\bar{g} \cdot \bar{\omega})/2 - P_T (\bar{\gamma} \cdot \bar{\rho})$ ; 2) интеграл площадей —  $C_2 = (\bar{\gamma} \cdot \bar{g})$ ; 3)  $(\bar{\gamma} \cdot \bar{\gamma}) = 1$  — геометрический интеграл, где  $C_1, C_2$  — произвольные постоянные.

Для определения направляющих косинусов «вертикали» используются три скалярных произведения:  $C_2 = (\bar{\gamma} \cdot \bar{g})$ ,  $f_1 = (\bar{\gamma} \cdot \bar{\rho})$ ,  $f_{\bar{a}} = (\bar{\gamma} \cdot \bar{a})$ , где  $\bar{a}$  — произвольный трехмерный вектор.

В результате подстановки выражения для орта вертикали в уравнения Эйлера (1) получаются обобщенные уравнения Эйлера-Гесса — три скалярных уравнения.

Уравнения Эйлера-Гесса конкретной (первой [3, с. 37]) формы получены впервые немецким математиком В. Гессом в 1890 году [1-3] и до настоящего времени они рассматривались в многочисленных работах без изменений. В. Гесс получил их на основе трех классических интегралов уравнений Эйлера-Пуассона, исключив из уравнений Эйлера направляющие косинусы — координаты орта  $\bar{\gamma}$  вертикали. При этом В. Гессом применен сложный «симметричный» [1, с. 27] метод решения нелинейной системы трех алгебраических уравнений, два из которых линейны, а третье уравнение — нелинейное, квадратичного вида. Сложность метода В. Гесса обусловлена необходимостью получения и преобразования частных производных матрицы определителя системы неоднородных уравнений по произвольным постоянным первым интегралам уравнений.

В докладе предлагается новый, по-существу, и наиболее простой алгебраический метод определения (на первоначальном этапе) направляющих косинусов вертикали на основе только двух интегралов энергии и площадей. На этом этапе предварительно решается простейшая система трех линейных неоднородных алгебраических уравнений (задаваемых скалярными произведениями векторов) с применением тождеств линейной векторной алгебры. Одно из уравнений содержит координаты произвольного трехмерного вектора  $\bar{a}$ , выбор которого и позволяет получать различные новые динамические уравнения. Этим методом получены обобщенные динамические уравнения вида Эйлера-Гесса, в которых необходимо произвести только замену произвольного вектора  $\bar{a}$ .

**Обобщенные уравнения Эйлера-Гесса.** Эти уравнения записываются в векторной форме

$$\bar{g}^* = \bar{g} \times \bar{\omega} - P_T [\bar{\rho} \times \bar{\gamma}_a], \quad (3)$$

$$\bar{\gamma}_a = (1/\varepsilon_a)(c_2 [\bar{\rho} \times \bar{a}] + f_1 [\bar{a} \times \bar{g}] + f_a [\bar{g} \times \bar{\rho}]), \quad (4)$$

где  $\varepsilon_a = (\bar{g} \cdot [\bar{\rho} \times \bar{a}])$  — смешанное произведение неколлинеарных векторов;

$c_2$  — произвольная постоянная интеграла площадей;

$f_1 = (T - c_1)/P_T$ ,  $T = (\bar{g} \cdot \bar{\omega})/2$  — кинетическая энергия ТТ,

$c_1$  — произвольная постоянная интеграла энергии;

$f_a = (\bar{\gamma}_a \cdot \bar{a})$  — функция, определяемая неизвестным ортом  $\bar{\gamma}_a$  вертикали и произвольным заданным вектором  $\bar{a}$  с координатами в главных центральных осях инерции ТТ.

Функция  $f_a$  определяется в результате решения квадратного уравнения, получаемого после подстановки орта (4) в первый (геометрический) интеграл  $(\bar{\gamma}_a \cdot \bar{\gamma}_a) = 1$ .

**Классические уравнения Эйлера-Гесса.** В частном случае при  $\bar{a} = \bar{g} \times \bar{\rho}$  получаются из (3), (4) классические уравнения Эйлера-Гесса (уравнения Эйлера в форме Гесса [1, с. 30]) с разложением Гесса для орта  $\bar{\gamma}$  по трем векторам  $\bar{g}, \bar{\rho}, \bar{g} \times \bar{\rho}$  [3, с. 37]. Уравнения имеют интегрирующий множитель Якоби, но не имеют первого интеграла с произвольной постоянной и они не могут быть проинтегрированы в квадратурах.

**Обобщенные уравнения с постоянным произвольным вектором.** В случаях постоянного вектора  $\bar{a} = \bar{\sigma}$  разложение (4) приобретает вид  $\bar{\gamma}_\sigma = (1/\varepsilon_\sigma)(c_2 \bar{V} + f_1 [\bar{\sigma} \times \bar{g}] + f_\sigma [\bar{g} \times \bar{\rho}])$ , где  $f_\sigma = (\bar{\gamma} \cdot \bar{\sigma})$ ,  $\bar{V} = [\bar{\rho} \times \bar{\sigma}]$  — постоянный вектор.

Координаты  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  вектора  $\bar{\sigma}$  могут быть равны, например, главным (центральным) моментам  $A, B, C$  инерции ТТ (тогда  $\bar{\sigma} = \bar{\sigma}_*$  — *вектор инерции* [12]) или равны постоянным координатам вектора гиростатического момента гиростата (с маховиками или гироскопами).

**Определение ориентации твердого тела.** Решается нетрадиционная задача определения ориентации твердого тела с использованием произвольных постоянных  $c_1, c_2$  первых интегралов уравнений (1), (2) и уравнений кинематической связи координат  $\gamma_n$  ( $n=1,2,3$ ) орта  $\bar{\gamma}_a$  вертикали: 1) с координатами классических и неклассических «тангенсных» и «котангенсных» векторов конечных эйлеровых вращений ТТ [4-8]; 2) с координатами векторных частей негемильтоновых кватернионов вращений [9] и кватернионов полувращений [10, 11]. Эта задача рассматривалась в докладах [12, 13].

На первоначальном этапе решения задачи используется классический тангенсный вектор  $\bar{\mathfrak{G}}$  Родрига [4, с. 103] с модулем  $|\bar{\mathfrak{G}}| = \text{tg}(\varphi/2)$ , где  $\varphi$  — угол конечного вращения (поворота) ТТ вокруг эйлеровой оси. Получается «ключевое» уравнение  $\gamma_1 \vartheta_2 - \gamma_2 \vartheta_1 + \gamma_3 = 1$ , где  $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$  — известные координаты орта  $\bar{\gamma}$ ;  $\vartheta_1, \vartheta_2$  — две неизвестные координаты вектора  $\bar{\mathfrak{G}}$ . Второе линейное независимое алгебраическое уравнение с координатами  $\vartheta_1, \vartheta_2$  получается с

применением интегралов энергии, площадей. Находятся решения этих уравнений и однозначно определяется третья координата  $\vartheta_3$ .

Координаты вектора  $\bar{\vartheta}$  преобразуются затем в координаты нетрадиционных тангенсных и котангенсных векторов с модулями  $|\bar{y}| = \operatorname{tg}(\varphi/4)$ ,  $|\bar{z}| = \operatorname{tg}(\varphi/4)$  и в параметры кватернионов. В результате однозначно определяются векторные параметры ориентации ТТ по трем известным направляющим косинусам вертикали, полученным после решения конкретных уравнений вида Эйлера-Гесса (без традиционного [2, с. 16] использования неоднозначно вычисляемых углов Эйлера).

**Обобщенные уравнения Эйлера-Гесса для гиростата.** Уравнения вида Эйлера-Гесса могут представлять интерес в динамике гиростата и в задачах управления ориентацией ТТ, учитывая, что гиростатами являются, например, современные космические аппараты (в частности, микроспутники), управляемые с помощью маховиков и бесплатформенных инерциальных систем [4 — 11]. Особый интерес представляют формы уравнений вида Эйлера-Гесса с первыми интегралами, о которых “почти ничего не известно” [14, с. 19]. Одна из таких форм уравнений получена в [13] для известного [15, с. 81 — 87] случая “полурегулярной” прецессии с постоянным модулем вектора кинетического момента (несимметричного гиростата) — произвольной постоянной функцией  $C_g = (\bar{g} \cdot \bar{g}) = \text{const}$  (аналогичной первому интегралу Эйлера в случае Эйлера [1, 2, 3]). Эта форма уравнений получается из обобщенного уравнения Эйлера (3) и имеет вид:

$$\dot{\bar{g}} = \bar{g} \times \bar{\omega} + c_p \bar{g} \times \bar{\rho}, \quad (5)$$

где  $c_p$  — постоянная скалярная функция (но не произвольная).

Функция  $C_g$  — это первый интеграл (интеграл кинетического момента гиростата), который существует только при условии  $(\bar{\gamma}_* \cdot [\bar{g} \times \bar{\rho}]) = 0$  — инвариантном соотношении для компланарных векторов  $\bar{\gamma}_*$ ,  $\bar{g}$ ,  $\bar{\rho}$  (находящихся в одной плоскости). Интеграл  $C_g$  получается после скалярного умножения уравнения (5) на вектор  $\bar{g}$  и последующего интегрирования функции  $(\bar{g} \cdot \dot{\bar{g}}) = 0$  (как и в случае Эйлера [1, 2] при  $\bar{\rho} = 0$ ). Орт  $\bar{\gamma}_*$  определяется при условии  $(\bar{\gamma}_* \cdot [\bar{g} \times \bar{\rho}]) = 0$  разложением  $\bar{\gamma}_* = a\bar{g} + b\bar{\rho}$ , где  $a$ ,  $b$  постоянные [15, с. 87] функции, зависящие от постоянных скалярных произведений  $C_{\rho g} = (\bar{\rho} \cdot \bar{g}) = \text{const}$ ,  $c_{\gamma\rho} = (\bar{\gamma}_* \cdot \bar{\rho}) = \text{const}$ . Это разложение следует из обобщенного разложения (4) при  $\bar{a} = [\bar{g} \times \bar{\rho}]$ ,  $f\bar{a} = 0$ .

Произвольная постоянная функция  $C_{\rho g}$  — это дополнительный первый интеграл уравнения (5). Он получается после скалярного умножения уравнения (5) (или (3)) на вектор  $\bar{\rho}$  и последующего интегрирования функции  $(\bar{\rho} \cdot \dot{\bar{g}}) = 0$  при условии  $(\bar{\rho} \cdot [\bar{g} \times \bar{\omega}]) = 0$  компланарности векторов  $\bar{\rho}$ ,  $\bar{g}$ ,  $\bar{\omega}$ .

Условие  $c_{\gamma\rho} = (\bar{\gamma}_* \cdot \bar{\rho}) = \text{const}$  обеспечивается, в свою очередь, наличием третьего по счету интеграла уравнения (5) (интеграл кинетической энергии гиростата):  $2T = C_T = (\bar{g} \cdot \bar{\omega}) = \text{const}$ . Этот первый интеграл определяется после скалярного умножения уравнения (5) на вектор  $\bar{\omega}$  и интегрирования функции  $(\bar{\omega} \cdot \dot{\bar{g}}) = 0$  также при условии компланарности векторов  $\bar{\rho}$ ,  $\bar{g}$ ,  $\bar{\omega}$ . Тогда функция  $c_{\gamma\rho} = (\bar{\gamma}_* \cdot \bar{\rho})$  постоянна в силу классического интеграла энергии уравнений (1), (2).

**Определение вектора центра масс тела.** Рассматривается нетрадиционная задача динамики ТТ — задача определения постоянного вектора  $\bar{\rho}$ , обеспечивающего выполнение условий компланарности векторов в инвариантных соотношениях. В качестве примера решается система трех алгебраических уравнений, задаваемых системой трёх скалярных произведений  $(\bar{\rho}_1 \cdot \bar{\sigma}_*) = C_*$  ( $C_*$  — постоянная,  $\bar{\sigma}_*$  — вектор инерции, см. п. 4);  $(\bar{\rho}_1 \cdot \bar{g}) = C_{\rho g}$ ;  $(\bar{\rho}_1 \cdot [\bar{g} \times \bar{\omega}]) = 0$ . В результате определяется вектор  $\bar{\rho}_1$ , расположенный в плоскости векторов  $\bar{g}$ ,  $\bar{\omega}$ . Аналогично решается система скалярных уравнений  $(\bar{\rho}_2 \cdot \bar{\sigma}_*) = C_*$ ,  $(\bar{\rho}_2 \cdot \bar{g}) = C_{\rho g}$ ,  $(\bar{\rho}_2 \cdot [\bar{g} \times \bar{\gamma}]) = 0$ , а также система  $(\bar{\rho}_3 \cdot \bar{\sigma}_*) = C_*$ ,

$(\bar{\rho} \cdot [\bar{g} \times \bar{\omega}])=0$ ,  $(\bar{\rho}_3 \cdot [\bar{g} \times \bar{\gamma}])=0$ . После подстановки полученных выражений для вектора  $\bar{\rho}$  в уравнение Эйлера (3) получаются новые формы уравнений вида Эйлера-Гесса с произвольными постоянными функциями и инвариантными соотношениями, содержащими вектор  $\bar{\rho}_*$  вместо вектора  $\bar{\rho}$ . Инвариантные соотношения могут быть использованы для понижения порядка получаемых систем трех дифференциальных уравнений [15, с. 136] вида Эйлера-Гесса.

**Особые дополнительные первые интегралы уравнений Эйлера-Пуассона.** Классическое уравнение Эйлера (1) и обобщенное уравнение Эйлера (3) допускают (как и в случае гиростата) тоже три алгебраических первых интеграла  $C_g, C_{\rho g}, C_T$ , но при соответствующих им условиях компланарности векторов. Эти интегралы рассматриваются как особые дополнительные (например, “четвертые” по счету [2, 3, 14, 15]) первые интегралы классических уравнений Эйлера-Пуассона и они могут представлять интерес в задачах исследований как известных случаев [3, с. 227], так и возможных новых частных случаев интегрируемости уравнений Эйлера-Пуассона.

В [13] предложен пример интегрируемости уравнения (5) для симметричного гиростата в случае, отличающимся от классического случая Лагранжа использованием интеграла  $C_{\rho g}$  и двух координат вектора  $\bar{\rho}$ .

### Литература

1. Голубев В.В. Лекции по интегрированию уравнений движения тяжелого твердого тела около неподвижной точки / В.В. Голубев. — М.: Гостехиздат, 1953. — 287 с.
2. Архангельский А.Ю. Аналитическая динамика твердого тела / А.Ю. Архангельский. — М.: Наука, 1977. — 328 с.
3. Гашененко И.Н. Классические задачи динамики твердого тела / И.Н. Гашененко, Г.В. Горр, А.М. Ковалев. — К.: Наук. думка, 2012. — 401 с.
4. Панов А.П. Математические основы теории инерциальной ориентации / А.П. Панов. — К.: Наук. думка, 1995. — 279 с.
5. Панов А.П. О сопряженных векторах и дифференциальных уравнениях вращения в задачах ориентации твердого тела / А.П. Панов // XIX междунар. конф. по автоматическому управлению, “Автоматика-2012”, 26-28 сентября 2012 г. — К. — С. 85 — 86.
6. Panov A.P. A NEW PARAMETERS AND DIFFERENTIAL EQUATIONS OF ROTATION IN ORIENTATION OF A RIGID BODY PROBLEM / A.P. Panov, A.I. Konashkov, A.D. Bocherikov // International journal of applied and fundamental research. — 2013 — № 2. (Международ. науч. конф. “Образование и наука без границ”, 15-22 ноября 2013 г., Мюнхен (Германия)). — Точка доступа: <http://www.science-sd.com/455-24466>
7. Panov A.P. ABOUT THE NEW STATEMENT OF CLASSICAL PROBLEM OF RIGID BODY DYNAMICS IN THE CASE OF EULER / A.P. Panov, A.E. Konashkov // International journal of experimental education. — 2014, № 9, pp. 39 — 40. (Международ. науч. конф. “Современные материалы и технические решения”, 19-26 октября 2013 г. Лондон (Великобритания)). — Точка доступа: <http://rae.ru/meo/pdf/2014/9/6394.pdf>
8. Панов А.П. О нетрадиционных “тангенсных” и “котангенсных” векторах вращения в задачах ориентации и навигации / А.П. Панов, В.В. Цисарж, С.А. Мураховский // XXI С-Пб междунар. конф. по интегрированным навигационным системам. 26-28 мая 2014 г. — СПб. — С. 313 — 315.
9. Панов А.П. О новых ненормированных кватернионах вращения твердого тела / Вопросы аналитической механики и её применений / А.П. Панов // Тр. ин.та математики АН Украины. — Т. 26. — 1999. — С. 300 — 329.
10. Панов А.П. О группах и алгебрах негамильтоновых кватернионов, пятимерных векторов вращений в задачах ориентации / А.П. Панов, В.В. Цисарж, А.И. Коначков // Междунар. журн. прикладных и фундаментальных исследований. — 2013. — № 10. — С. 82 — 84. (Международ. науч. конф. “Современные наукоемкие технологии”, 2 июля — 3 августа 2013 г., Барселона-Канны (Испания-Франция)). — Точка доступа: <http://www.rae.ru/upfs/pdf/2013/10-1/4061.pdf>
11. Панов А.П. Группы и алгебры негамильтоновых кватернионов полувращений в задачах бесплотформенных инерциальных систем / А.П. Панов, С.А. Пономаренко, В.В. Цисарж // XXII С-Пб междунар. конф. по интегрированным навигационным системам. 25-27 мая 2015 г. — СПб. — С. 257 — 261.

12. Панов А.П. Дифференциальные уравнения вида Эйлера-Гесса в задачах динамики и ориентации твердого тела. / А.П. Панов // Материалы XXI междунар. конф. по автоматическому управлению. “Автоматика-2014”, Киев, 23-27 сентября 2014. — К.: НТУУ “КПИ” “Политехника”, 2014. — С. 24 — 25.
13. Panov A.P. Generalized and new dynamic differential equations of the Euler-Hess form in the orientation task of a rigid body / A.P. Panov // X International Conference “Gyrotechnology, navigation, movement control and aerospace technic engineering”, 16-17 April 2015. Collection of reports. — Kyiv: NTUU “KPI”, 2015. — P. 488 — 490.
14. Докшевич А.И. Решения в конечном виде уравнений Эйлера-Пуассона / А.И. Докшевич. — К.: Наук. думка. 1992. — 168 с.
15. Горр Г.В. Динамика гиростата, имеющего неподвижную точку / Г.В. Горр, А.В. Мазнев. — Донецк: Дон. НУ, 2010. — 364 с.

УДК 517.977

**М.В. Хлебников**, д-р физ.-мат. наук,  
**П.С. Щербаков**, д-р физ.-мат. наук,  
Ин-т проблем управления РАН, cavour118@mail.ru

## ВЫПУКЛАЯ ОЦЕНКА ОБЛАСТИ ПРИТЯЖЕНИЯ ПРИ ОГРАНИЧЕНИИ НА УПРАВЛЕНИЕ

Рассматривается линейная система с ограниченным по норме управлением в виде линейной обратной связи по состоянию. Ставится задача описания всех точек фазового пространства, из которых система может быть приведена в начало координат таким управлением. На основе техники линейных матричных неравенств строится внутренняя выпуклая оценка этой области путем решения набора простых задач полуопределенного программирования. Рассмотрены как невозмущенные системы, так и системы с ограниченными внешними возмущениями. Теоретические построения иллюстрируются численными примерами.

*Ключевые слова:* линейные системы; ограниченное управление; область притяжения; линейные матричные неравенства; внешние возмущения.

Розглядається лінійна система з обмеженням по нормі управління у вигляді лінійної обрат-ної зв'язку станом. Ставиться завдання опису всіх точок фазового простору, з яких система може бути приведена в початок координат таким управлінням. На основі техніки лінійних матричних нерівностей будується внутрішня опукла оцінка цієї області шляхом вирішення набору простих завдань полуопределенного програмування. Розглянуто як незбурених системи, так і системи з обмеженими зовнішніми збуреннями. Теоретичні побудови ілюструються чисельними прикладами.

*Ключові слова:* лінійні системи; обмежене управління; область тяжіння; лінійні матричні нерівності; зовнішні збурення.

We consider a linear system with bounded control in the form of linear static state feedback. The problem is to describe the set of all initial conditions for the system (points in the phase space) such that there exists such a stabilizing control. Using the linear matrix inequality technique, we propose an inner convex approximation to this domain by solving a collection of simple semidefinite programs. Disturbance-free systems are considered along with systems subjected to bounded exogenous disturbances. Theoretical constructions are illustrated via numerical examples.

*Keywords:* linear systems; bounded control; domains of attraction; linear matrix inequalities; exogenous disturbances.

Задаче аппроксимации областей достижимости и областей притяжения динамических систем посвящена огромная литература. Мы рассмотрим простейшую постановку задачи: дана линейная стационарная система в пространстве состояний  $\dot{x} = Ax + Bu$ ,  $x \in \mathbb{R}^n$ ,  $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$ ,  $B \in \mathbb{R}^{n \times m}$ , описать все множество начальных состояний  $x(0) = x_0$ , для которых существует стабилизирующая обратная связь  $u = Kx$  такая, что замкнутая система обладает заданной степенью устойчивости (собственные значения матрицы  $A_c = A + BK$  замкнутой системы лежат левее некоторой величины  $\sigma > 0$ ), а управляющее воздействие  $u(t)$  ограничено по евклидовой норме некоторой наперед заданной величиной  $\mu > 0$ . Будем обозначать это множество через  $\Omega(\mu, \sigma)$  и называть его множеством притяжения рассматриваемой системы, соответствующим парамет-



рам  $\mu, \sigma$ . Такая модельная постановка представляется естественной с инженерно-прикладной точки зрения, но, насколько нам известно, она не допускает точного и вычислительно несложного решения для размерностей системы, больших  $n > 2$ .

Простейшая внутренняя аппроксимация множества  $\Omega(\mu, \sigma)$  в виде эллипсоида может быть получена с использованием аппарата квадратичных функций Ляпунова и техники линейных матричных неравенств; однако такая оценка оказывается весьма консервативной (отметим, что нас интересует именно внутренняя, т.е. гарантирующая оценка). Консерватизм такой аппроксимации обусловлен тем, что строится общая квадратичная функция Ляпунова для всех начальных состояний и, как следствие, общий стабилизирующий регулятор.

В данном докладе будет предложен новый способ построения внутренней аппроксимации множества  $\Omega(\mu, \sigma)$ , который также исходит из наличия квадратичной функции Ляпунова для замкнутой системы и использует технику линейных матричных неравенств, однако предполагает построение «индивидуального» регулятора для каждого допустимого начального состояния. Точнее, метод предполагает детектирование допустимых начальных точек путем генерирования случайных направлений в фазовом пространстве и построения для каждой из них своей функции Ляпунова и своего регулятора. Построения осуществляются путем решения несложных задач полуопределенного программирования, для численного решения которых, в свою очередь, имеются общедоступные пакеты программ. Выпуклая комбинация полученных таким образом начальных точек принимается за внутреннюю оценку искомого множества, которая, разумеется, оказывается более точной, чем та, которая исходит из общей функции Ляпунова.

Аналогичная задача ставится для систем, подверженных влиянию аддитивных ограниченных внешних возмущений. Применяется тот же подход, при этом лишь слегка изменяется вид линейных матричных ограничений, фигурирующих в формулируемых оптимизационных задачах. Построения сопровождаются простым иллюстрирующим примером, подтверждающим преимущества предлагаемого подхода.

В качестве развития и обобщения метода могут быть рассмотрены системы дискретного времени, иные нормы как для управляющего сигнала, так и для внешних возмущений, а также робастные постановки задачи, предполагающие наличие неопределенностей в коэффициентах матриц системы.

### Литература

1. Поляк Б.Т. Управление линейными системами при внешних возмущениях: Техника линейных матричных неравенств / Б.Т. Поляк, М.В. Хлебников, П.С. Щербаков. — М.: ЛЕНАНД, 2014.

УДК 517.977

А.В. Быков, аспирант,  
П.С. Щербаков, д-р физ.-мат. наук,  
Ин-т проблем управления РАН

## СИНТЕЗ РАЗРЕЖЕННЫХ $H_{\infty}$ -ОПТИМАЛЬНЫХ РЕГУЛЯТОРОВ

Предлагается развитие подхода, предложенного в [1] к синтезу разреженных регуляторов в линейных системах управления  $\dot{x} = Ax + Bu$ . Управление строится в форме статической линейной обратной связи по состоянию  $u = Kx$  и характеризуется малым числом ненулевых компонент вектора управления. Модификация подхода, рассматриваемая в настоящей работе, состоит в замене матричной нормы, минимизация которой позволяет детектировать разреженную структуру регулятора, на специальную невыпуклую функцию. Целью является устранение некоторых недостатков, присущих матричной норме; мотивация использования подобного рода функций подкреплена эвристическими соображениями. Минимизация введенной невыпуклой функции осуществлялась средствами вогнуто-выпуклой процедуры. Для демонстрации выбрана задача  $H_{\infty}$ -оптимизации, которая до этого не рассматривалась в разреженной постановке.

*Ключевые слова:* линейные системы; разреженные регуляторы; оптимальное управление; линейные матричные неравенства.

Пропонується розвиток підходу, запропонованого в [1] до синтезу розріджених регулювальників в лінійних системах управління  $\dot{x} = Ax + Bu$ . Управління будується у формі статичного лінійного зворотного зв'язку по стану  $u = Kx$  і характеризується малим числом ненульових компонент вектора управління. Модифікація підходу, що розглядається в справжній роботі, полягає в заміні матричної норми, мінімізація якої дозволяє детектувати розріджену структуру регулювальника, на спеціальну неопуклу функцію. Метою є усунення деяких недоліків, властивих матричній нормі; мотивація використання подібного роду функцій підкріплена евристичними міркуваннями. Мінімізація введеної неопуклої функції здійснювалася засобами угнутаопуклої процедури. Для демонстрації вибрано завдання  $H_{\infty}$ -оптимізації, яка до цього не розглядалася в розрідженій постановці.

*Ключові слова:* лінійні системи; розріджені регулювальники; оптимальне управління; лінійні матричні нерівності.

We modify an approach to sparse controller design in linear control systems  $\dot{x} = Ax + Bu$  proposed in [1]. The control is taken in the form of the linear state feedback  $u = Kx$  and is characterized by a small number of nonzero entries of the control vector. The modification of the approach considered in this paper relates to the change of the objective function from a special matrix norm to the specific nonconvex function. The goal is to avoid certain drawbacks pertinent to the original approach in [1]; a heuristic motivation for use of the nonconvex function considered is provided. The minimization of the objective nonconvex performance is accomplished by means of the concave-convex procedure. The efficiency of the approach is demonstrated via solution of the  $H_{\infty}$ -optimization problem, which has not been considered in the literature in the sparse formulation.

*Keywords:* linear systems; sparse controllers; optimal control; linear matrix inequalities.

Концепция *разреженности* популярна в области обработки сигналов, конкретно в направлении «compressed sensing» – методике эффективного получения и восстановления сигнала, в основе которой лежит поиск решений недоопределенных линейных систем. Оказывается, что в большинстве исследуемых сигналов присутствует избыточность, то есть представление этих сигналов в определенном базисе содержит много коэффициентов близких или равных нулю. Такое представление с большим числом нулевых компонент называют разреженным; в некоторых задачах возникает необходимость поиска именно разреженного разложения сигнала по базису, характеризующегося малым числом ненулевых компонент.

В теории управления также могут возникать задачи в разреженной постановке, например, требование разреженности к регуляторам в задачах синтеза: искомая структура определяется малым числом ненулевых строк или столбцов в матрице усиления [1]. Необходимость синтеза разреженных регуляторов обусловлена желанием ослабить требования к аппаратной реализации систем управления, а именно иметь мало управляющих воздействий или использовать для построения управления малое число компонент фазового вектора.

В работе [1] предложен подход, позволяющий находить разреженные регуляторы в задачах, где управление строится в форме линейной статической обратной связи по состоянию или

по выходу. В основе подхода лежит замена исходной невыпуклой задачи ее выпуклым суррогатом (приближением), который эффективно решается средствами выпуклой оптимизации. Поиск разреженной структуры достигается за счет минимизации специальной матричной нормы, в пользу использования которой приведены эвристические соображения и некоторые теоретические результаты. Строгое теоретическое обоснование применимости такого метода и оценки качества получающегося решения в настоящее время отсутствует, однако эффективность подхода подтверждается численными примерами. В то же время нетрудно найти задачи, в которых метод сталкивается с определенными трудностями.

Целью данной работы является модификация метода, описанного в [1], достигаемая путем постановки иной суррогатной задачи, которая является уже не выпуклой, а DC-задачей (англ. *difference of convex functions* – разность выпуклых функций). В качестве инструмента решения подобных невыпуклых задач выбрана процедура вогнуто-выпуклого программирования (англ. *concave-convex procedure, СССР*) [2]. В работе предлагается минимизировать некоторую целевую функцию вместо упомянутой выше матричной нормы, приводится эвристика в пользу нового суррогата по сравнению с предложенным в [1], работоспособность метода продемонстрирована на численных примерах.

В качестве задачи оптимального управления, иллюстрирующей особенности метода, выбрана задача  $H_\infty$ -оптимизации, для которой рассмотрена разреженная постановка вместо ее классического варианта. Исследована постановка, в основе которой лежит представление системы в пространстве состояний и применяется техника линейных матричных неравенств [3]. Для наглядности синтез  $H_\infty$ -оптимальных регуляторов разреженного вида осуществляется двумя способами: с использованием специальной матричной нормы и с помощью новой невыпуклой целевой функции; результаты вычислений по двум методам сравниваются на тестовых примерах и свидетельствуют в пользу подхода, предлагаемого в данной статье.

#### Литература

1. Поляк Б.Т. Разреженная обратная связь в линейных системах управления / Б.Т. Поляк, М.В. Хлебников, П.С. Щербаков // Автоматика и телемеханика. — 2014. — Вып. 12. — С. 13 — 27.
2. Yuille A.L. The concave-convex procedure / A.L. Yuille, A. Rangarajan // Neural Computation. 2003. – № 15. — pp. 915 — 936.
3. Поляк Б.Т. Управление линейными системами при внешних возмущениях: Техника линейных матричных неравенств / Б.Т. Поляк, М.В. Хлебников. — М.: ЛЕНАНД, 2014.

УДК 517.977

А.В. Быков, аспирант,  
П.С. Щербаков, д-р физ.-мат. наук,  
Ин-т проблем управления РАН

## СИНТЕЗ ОПТИМАЛЬНОЙ РАЗРЕЖЕННОЙ СВЯЗИ В ЛИНЕЙНЫХ СИСТЕМАХ ДИСКРЕТНОГО ВРЕМЕНИ

В данной работе подход к синтезу разреженных регуляторов распространяется на линейные системы управления с дискретным временем  $x_{k+1} = Ax_k + Bu_k$ . Управление строится в форме статической линейной обратной связи и характеризуется малым числом ненулевых компонент вектора управления  $u_k = Kx_k$ . При найденной и зафиксированной разреженной структуре управление минимизирует квадратичный функционал качества  $J = \sum_{k=0}^{\infty} [x_k^T R x_k + u_k^T S u_k]$ . Иными словами, классическая задача о построении линейно-квадратичного регулятора переформулирована и решена для случая дискретных систем с дополнительным требованием к структуре регулятора. Задача сводится к минимизации специальной матричной нормы при ограничениях типа линейных матричных неравенств.

*Ключевые слова:* линейные дискретные системы; разреженные регуляторы; оптимальное управление; линейные матричные неравенства.

У даній роботі підхід до синтезу розріджених регулювальників поширюється на лінійні системи управління з дискретним часом. Управління будується у формі статичного лінійного зворотного зв'язку і характеризується малим числом ненульових компонент вектора управління. При знайденій і зафіксованій розрідженій структурі управління мінімізує квадратичний функціонал якості.  $J = \sum_{k=0}^{\infty} [x_k^T R x_k + u_k^T S u_k]$ . Іншими словами, класичне завдання про побудову лінійно-квадратичного регулювальника переформульована і вирішена для випадку дискретних систем з додатковою вимогою до структури регулювальника. Завдання зводиться до мінімізації спеціальної матричної норми при обмеженнях типа лінійних матричних нерівностей.

*Ключові слова:* лінійні дискретні системи; розріджені регулювальники; оптимальне управління; лінійні матричні нерівності.

In this paper, an approach to structured sparse control system design is extended toward discrete time systems of the form  $x_{k+1} = Ax_k + Bu_k$ . The control is taken in the form of static linear state feedback, and the goal is to find a gain matrix leading to a small number of the nonzero components of the control vector  $u_k = Kx_k$ . Having found and fixed the sparse structure, we then minimize the quadratic performance index  $J = \sum_{k=0}^{\infty} [x_k^T R x_k + u_k^T S u_k]$ . In other words, the classical linear quadratic regulation problem for discrete time systems is reformulated and solved in the sparse setup, i.e., with an additional constraint on the structure of the controller. Overall, the problem reduces to the minimization of a special matrix norm subject to linear matrix inequality constraints.

*Keywords:* discrete time linear systems; sparse controllers; optimal control; linear matrix inequalities.

Хорошо известно, что в задачах о конструировании стабилизирующих регуляторов в управляемых линейных системах, как правило, существует множество решений. Это сразу видно, например, из LMI-формулировки задачи при рассмотрении системы в пространстве состояний [1]. Действительно, решение задачи полуопределенного программирования заключается в выборе регулятора из допустимого множества, определяемого ограничениями — линейными матричными неравенствами.

Таким образом, имеется некоторая свобода в выборе управления; в большинстве задач этот выбор основан на некотором критерии оптимальности. Существует много критериев качества, различающихся по своей природе: обеспечение наибольшей степени устойчивости системы при ограничении на величину управления, минимизация значения некоторого целевого функционала, или же требование наличия особой структуры (внутреннего устройства) у выбираемого решения.

В нескольких постановках задач синтеза обратной связи [2] один из критериев основан на свойстве *разреженности* регулятора: структура матрицы усиления определяется малым числом ненулевых строк или столбцов. Необходимость синтеза разреженных регуляторов обусловлена желанием ослабить требования к аппаратной реализации систем управления, а именно, иметь мало управляющих воздействий или использовать для построения управления малое число компонент фазового вектора. Таким образом, разреженность регулятора представляется новым критерием оптимальности управления с весьма прозрачным обоснованием применимости такого критерия.

Задачи по уменьшению числа управляющих воздействий или числа используемых компонент фазового вектора являются невыпуклыми, что с вычислительной точки зрения говорит об отсутствии эффективных методов решения подобных задач. Поэтому в качестве возможного подхода было предложено [2] заменить исходную задачу выпуклой суррогатной задачей (выпуклым приближением) и, прибегая к помощи известных средств выпуклой оптимизации, получить решение на основе этого приближения.

В данной работе с помощью упомянутого подхода поставлена и решена задача о построении разреженного регулятора, стабилизирующего линейную дискретную систему с заданной степенью устойчивости, а также минимизирующего квадратичный функционал качества. Иными словами, классическая задача о построении линейно-квадратичного регулятора для дискретных систем решена в разреженной постановке. Приводятся численные примеры, иллюстрирующие эффективность предлагаемого подхода и свидетельствующие о сравнительно небольшой потере качества за счет придания регулятору разреженного вида.

#### Литература

1. Поляк Б.Т. Управление линейными системами при внешних возмущениях: Техника линейных матричных неравенств / Б.Т. Поляк, М.В. Хлебников, П.С. Щербаков. — М.: ЛЕНАНД, 2014.
2. Поляк Б.Т. Разреженная обратная связь в линейных системах управления / Б.Т. Поляк, М.В. Хлебников, П.С. Щербаков // Автоматика и телемеханика. — 2014. — Вып. 12. — С. 13 — 27.

## Секція 2

УПРАВЛІННЯ ТА ІДЕНТИФІКАЦІЯ  
В УМОВАХ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ

УДК 62.50

В.Д. Романенко, д-р техн. наук, проф.,  
Ю.Л. Милявский, канд. техн. наук,  
УНК «Ин-т прикладного системного анализа»  
НТУУ «КПИ», yuriy.milyavsky@gmail.comМОДЕЛИРОВАНИЕ СЦЕНАРИЕВ РАЗВИТИЯ СЛОЖНЫХ  
СИСТЕМ НА ОСНОВЕ УПРАВЛЕНИЯ ИМПУЛЬСНЫМИ  
ПРОЦЕССАМИ КОГНИТИВНЫХ КАРТ

Розглянуто питання стабілізації координат вершин когнітивних карт (КК) складних систем на заданих рівнях. Виконано синтез закону керування імпульсним процесом КК шляхом безпосередньої дії вектора керування на вершини КК в динамічному режимі. Моделювання сценаріїв розвитку складних систем реалізовано шляхом варіювання складових задавальних дій замкненої системи керування при стабілізації координат вершин КК на заданих рівнях.

*Ключові слова:* когнітивна карта; система керування; імпульсний процес.

Рассмотрены вопросы стабилизации координат вершин когнитивных карт (КК) сложных систем на заданных уровнях. Выполнен синтез закона управления импульсным процессом КК путем непосредственного воздействия вектора управления на вершины КК в динамическом режиме. Моделирование сценариев развития сложных систем реализовано на основе варьирования составляющих вектора задающих воздействий замкнутой системы управления при стабилизации координат вершин КК на заданных уровнях.

*Ключевые слова:* когнитивная карта; система управления; импульсный процесс.

Stabilisation of vertices' coordinates of complex systems' cognitive maps (CM) on given levels is discussed. Control law for impulse process in CM is designed by means of direct impact of control vector on CM vertices in dynamic mode. Complex systems development scenario modelling is carried out based on varying of upsetting control vector components for closed loop system during CM vertices stabilisation on given levels.

*Keywords:* cognitive map, control loop, impulse process.

**Введение.** Когнитивное моделирование является одним из наиболее актуальных направлений научных исследований сложных систем. В основе находится концепция когнитивной карты (КК), которая представляет собой взвешенный ориентированный граф, вершины (узлы) которого отображают координаты (факторы) сложной системы, а ребра с весами описывают причинно-следственные взаимосвязи между этими координатами. При воздействии возмущений в КК происходит импульсный переходной процесс, динамика которого описывается разностным уравнением [1]:

$$\Delta Y_i(k+1) = \sum_{j=1}^n w_{ji} \Delta Y_j(k), \quad (1)$$

где  $\Delta Y_i(k) = Y_i(k) - Y_i(k-1)$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$ .

Уравнение (1), описывающее свободное движение КК без приложения внешних управляющих воздействий, можно записать в векторной форме:

$$\Delta \bar{Y}(k+1) = W \Delta \bar{Y}(k). \quad (2)$$

**Результаты работы.** Моделирование сценариев развития сложных систем реализуется на основе стабилизации координат вершин КК на заданных уровнях при импульсном процессе (1). Для этого разработана управляемая динамическая модель КК в полных значениях координат вершин

$$\bar{Y}(k+1) = (I + W - Wq^{-1})\bar{Y}(k) + G\bar{u}(k) + \bar{\xi}(k), \quad (3)$$

где  $q^{-1}$  — оператор обратного смещения на один период дискретизации;

$\bar{u}(k)$  — вектор внешних управлений, которые воздействуют непосредственно на вершины КК;

$\bar{\xi}(k)$  — вектор возмущений.

Управление (3) описывает динамику вынужденного движения сложной системы. При этом матрица управления  $G$  формируется проектировщиком системы когнитивного управления и, как правило, состоит из единиц и нулей. Внешние возмущения  $\bar{\xi}(k)$  могут быть измеряемы или не измеряемы, однако предполагается, что математическое ожидание  $E\bar{\xi} = 0$ . Размерность вектора управления  $\dim \bar{u} \leq \dim \bar{Y}$ .

Для стабилизации импульсного процесса (3) необходимо выполнить синтез закона управления  $\bar{u}(k) = \phi(\bar{\theta} - \bar{Y}(k))$ , который обеспечивает стабилизацию координат  $\bar{Y}(k)$  КК на заданных уровнях  $\bar{\theta}$  путем непосредственного воздействия управлений  $\bar{u}(k)$  на вершины КК в замкнутой системе управления. Синтез закона управления реализуется на основе минимизации критерия оптимальности

$$J(k+1) = E\{(\bar{Y}(k+1) - \bar{\theta})^T (\bar{Y}(k+1) - \bar{\theta}) + \bar{u}^T(k) R \bar{u}(k)\}, \quad (4)$$

который представляет собой обобщенную дисперсию невязки  $\bar{Y}(k+1) - \bar{\theta}$  и вектора  $\bar{u}(k)$  [2]. В результате минимизации критерия (4) при измеряемых возмущениях получаем уравнение

$$\frac{\partial J(k+1)}{\partial \bar{u}(k)} = 2G^T((I + W - Wq^{-1})\bar{Y}(k) + G\bar{u}(k) + \bar{\xi}(k) - \bar{\theta}) + 2R\bar{u}(k) = 0,$$

из которого определяется вектор управления

$$\bar{u}(k) = -(G^T G + R)^{-1} G^T ((I + W - Wq^{-1})\bar{Y}(k) + \bar{\xi}(k) - \bar{\theta}). \quad (5)$$

При не измеряемых возмущениях закон управления (5) принимает вид

$$\bar{u}(k) = -(G^T G + R)^{-1} G^T ((I + W - Wq^{-1})\bar{Y}(k) - \bar{\theta}). \quad (6)$$

Моделирование сценариев развития сложных систем реализовано на основе варьирования составляющих вектора задающих воздействий  $\bar{\theta}$  в замкнутой системе управления в процессе стабилизации координат вершин КК  $Y_i(k)$  на заданных уровнях  $\theta_i$ .

Экспериментальные исследования сценария развития проведены на примере КК системы здравоохранения в городе [3].

## Литература

1. Робертс Ф. Дискретные математические модели с приложениями к социальным, биологическим и экологическим задачам / Ф. Робертс. — М.: Наука, 1986. — 496 с.
2. Изерман Р. Цифровые системы управления / Р. Изерман. — М.: Мир, 1984. — 541 с.
3. Hagiwara M. Extended fuzzy cognitive maps / M. Hagiwara // Proceedings of the 1st IEEE International Conference on Fuzzy Systems. — 1992. — P. 795 — 801.

УДК 004.89

Н.О. Шибяева, аспирант, Одес. нац. морск. ун-т  
murder8910@mail.ru

## ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ НАДЕЖНОСТЬЮ СУДОВЫХ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

Предлагается иерархическая структура интеллектуальной системы управления надежностью судовых сложных технических систем в условиях неопределенности. Данная интеллектуальная система позволяет повысить точность управляющих решений и снизить временные затраты на управление надежностью агрегатами и межагрегатными связями сложных технических систем судна.

*Ключевые слова:* надежность; интеллектуальные системы; судовые сложные технические системы; неопределенность.

Пропонується ієрархічна структура інтелектуальної системи управління надійністю судових складних технічних систем в умовах невизначеності. Дана інтелектуальна система дозволяє підвищити точність рішень, що управляють, і понизити тимчасові витрати на управління надійністю агрегатами і між агрегагтними зв'язками складних технічних систем судна.

*Ключові слова:* надійність; інтелектуальні системи; судові складні технічні системи; невизначеність.

The hierarchical structure of intellectual control system by reliability of the ship difficult technical systems is offered in the conditions of vagueness. This intellectual system allows to promote exactness of managing decisions and reduce temporal expenses on a management reliability by aggregates and interaggregate connections of the difficult technical systems of ship.

*Keywords:* reliability; intellectual systems; ship difficult technical systems; vagueness.

**Постановка проблемы.** Функционирование современных систем управления надежностью судовых сложных технических систем (СТС) в реальном времени характеризуется неопределенностью сценариев развития ситуации в различных условиях эксплуатации. Трудно предсказуемо возникновение неблагоприятных внутренних или внешних факторов, оказывающих негативное воздействие на агрегаты и межагрегатные связи (МС) судовых СТС. Эффективность таких систем существенным образом зависит от используемых методов машинного обучения и искусственного интеллекта, позволяющих автоматизировать и упростить операционные и вычислительные процессы управления надежностью [1,2].

Управление надежностью судовых СТС заключается в обеспечении мониторинга и диагностики возможных нарушений работы агрегатов и МС в реальном времени. В частности, на примере судовой энергетической системы (СЭУ), в роли таких агрегатов и МС могут выступать ключевые компоненты таких подсистем: топливной, сжатого воздуха, масляной, охлаждения, газовыпуска [3].

Иерархическая структура предлагаемой интеллектуальной системы состоит из четырех уровней: измерения приоритетных технических параметров, обработки и анализа данных с последующим формированием прогнозных оценок, принятия управляющих решений.

Уровень измерения приоритетных технических параметров представляет собой комплекс интеллектуальных измерительных средств (ИИС), каналов передачи данных, обеспечивающих поступление фиксируемых значений параметров на сервер первого уровня (СПУ). Важными аспектами при использовании ИИС с целью обеспечения достоверности полученных измерений, являются: поддержка микроконтроллерными устройствами компенсации изменений во времени, связанных с деградацией первичных преобразователей и возможностью расширения HART и CAN интерфейсов.

Данные интерфейсы способны обеспечить высокую гибкость при постоянных изменениях внешних и внутренних процессов, протекающих в системе, что характерно для эксплуатации судовых СТС в условиях неопределенности. В качестве технических параметров судовых СТС, подлежащих измерению, на примере подсистем СЭУ, могут выступать: температура и скорость транспортируемых жидкостей в трубопроводах обслуживающих подсистем, уровень расхода топлива, рабочее напряжение компрессоров, уровни избыточного, абсолютного давления и разрежения и др.



Особую важность составляет оценка целостности системы, заключающаяся в определении наличия вышедших из строя агрегатов и МС. Нарушение функционирования некоторых компонентов судовых СТС может существенно не сказываться на функционировании всей системы, например, по причине реализации методов горячего, ждущего или холодного резервирования. Однако, для построения прогностических сценариев работы системы в дальнейшем, необходима оценка и учет подобных ситуаций. Для этого может использоваться отдельный низкоуровневый программный модуль на СПУ, в котором содержится когнитивная карта всей системы, заданная на этапе внедрения судовой СТС в эксплуатацию. Построение и реализация данного модуля базируются на использовании метода поражающего моделирующего импульса и нормирующего воздействия.

На уровне сбора и обработки данных, сформированная информация передается сервером первого уровня в распределенную систему серверов (РСС). РСС состоит из нескольких серверных машин, коммутаторов и концентраторов. Предназначение РСС заключается в обработке, структурировании и классификации поступающей информации о техническом состоянии агрегатов и МС судовых СТС. На основании этого производится формирование баз технических данных, знаний, правил, статистики отказов и рекомендуемых управляющих действий. Распределенность в рамках данного уровня позволяет увеличить вычислительный потенциал системы за счет разделения высоких объемов вычислений на отдельные этапы, которые выполняются в несколько потоков разными серверами. Это способствует повышению точности выполнения вычислительных операций, связанных с анализом полученных данных.

На основании формирования баз данных, знаний и правил, становится возможным получение прогностических оценок об изменении состояний компонентов системы. Для этих задач предназначен модуль прогнозных оценок надежности агрегатов и МС судовых СТС, содержащийся на отдельном сервере РСС. Реализация данного модуля может быть проведена на основе составления модели нейронной сети. В качестве входных сигналов используются критерии описания состояний агрегатов и МС судовой СТС, формируемые динамически для каждого отдельного прогнозируемого сценария на основании знаний и правил.

Уровень принятия управляющих решений представляет собой визуальный программный интерфейс, на который в структурированном виде выводится диагностическая информация о состоянии системы с заданным дискретным шагом времени. При реализации сценария выхода из строя агрегата или МС судовой СТС или при резком изменении измеряемых технических параметров на экран выводится информация, идентифицирующая и формализующая конкретную ситуацию, в зависимости от ее степени определенности и содержащейся диагностической информации. Идентификация может быть выражена в виде таблицы, содержащей название подсистемы, в которой произошло нарушение функционирования, ее блока и узла. Благодаря использованию модуля прогнозных оценок составляется перечень моделей превентивного управляющего воздействия на судовую СТС с конкретными пошаговыми рекомендациями для обслуживающего персонала.

**Выводы.** Разработанная интеллектуальная системы управления надежностью судовых сложных технических систем в условиях неопределенности позволила обеспечить мониторинг и диагностики возможных нарушений работы агрегатов и МС в реальном времени, уменьшив временные затраты на управление надежностью отдельных компонентов систем. Благодаря использованию предлагаемых интеллектуальных измерительных средств и модуля оценки целостности системы повышаются точность и скорость вычислений, что позволяет усовершенствовать процесс формирования управляющих решений.

## Литература

1. Антамошин А.Н. Интеллектуальные системы управления организационно-техническими системами / А.Н. Антамошин, О.В. Блинова. — М.: Горячая линия. Телеком, 2006. — 160 с.
2. Кучер А.В. Использование интеллектуальных систем для управления сложными объектами / А.В. Кучер, А.П. Частиков // Научная мысль Кавказа. Приложение 7. — Ростов-на-Дону: Издательство Северо-Кавказского научного центра высшей школы, 2005. — С.140 — 144.

3. Мясников Ю.Н. Надежность и техническая диагностика судовых машин и механизмов / Ю.Н. Мясников // Тр. научно-методической конф., посвященной 195-летию образования в области водных коммуникаций России. — СПб.: ИПЦ СПГУВК, 2005. — Т. 3. — С. 105 — 112.

УДК 681.5.01

Ю.И. Дорофеев, канд. техн. наук, доц., Нац. техн. университет «ХПИ», yidorofeev@yandex.ua

## АНАЛИЗ УСЛОВИЙ РАЗРЕШИМОСТИ ЗАДАЧИ СИНТЕЗА ОГРАНИЧЕННОГО СТАБИЛИЗИРУЮЩЕГО УПРАВЛЕНИЯ ЗАПАСАМИ С ПОМОЩЬЮ БИЛИНЕЙНЫХ МАТРИЧНЫХ НЕРАВЕНСТВ

Розглядається задача синтезу стабілізуючого керування запасами в умовах дії невідомого, але обмеженого зовнішнього попиту і структурних обмежень на керуючі впливи. Керування будується у формі лінійного зворотного зв'язку за сигналом нев'язки між готівковими і страховими рівнями запасу ресурсів. Наступною задачею є оцінювання допустимої області в просторі керуючих впливів, вирішення якої отримано в термінах розв'язуваності системи білінійних матричних нерівностей (БМН). Також отримана система БМН, розв'язання якої дозволяє обчислити вагові матриці квадратичного функціоналу, при яких гарантується максимальна ступінь подавлення впливу зовнішнього попиту.

*Ключові слова:* керування запасами; лінійне обмежене керування; інваріантний еліпсоїд; білінійна матрична нерівність.

Рассматривается задача синтеза стабилизирующего управления запасами в условиях действия неизвестного, но ограниченного внешнего спроса и структурных ограничений на управляющие воздействия. Управление строится в виде линейной обратной связи по сигналу невязки между наличными и страховыми уровнями запаса ресурсов. Следующей задачей является оценивание допустимой области в пространстве управляющих воздействий, решение которой получено в терминах разрешимости системы билинейных матричных неравенств (БМН). Также получена система БМН, решение которой позволяет вычислить весовые матрицы квадратичного функционала, при которых гарантируется максимальная степень подавления влияния внешнего спроса.

*Ключевые слова:* управление запасами; линейное ограниченное управление; инвариантный эллипсоид; билинейное матричное неравенство.

The problem of stabilizing control inventory synthesis under the action of an unknown but bounded external demand and structural constraints on control actions is consider. A control is constructed as a linear feedback with respect to deviation between cash and safety stock levels of resources. The next problem is to estimation of the feasible region in the space of control actions, which is solved in terms of solvability of bilinear matrix inequalities (BMI). Also, a system of BMI is obtained, which decision allows to calculate the quadratic functional weight matrices, which guarantee the maximum degree of the external demand influence suppression.

*Keywords:* inventory control; constrained linear control; invariant ellipsoid; bilinear matrix inequality.

Проблема управління запасами являється однією з найбільш важких в організаційному управлінні. Запаси матеріальних ресурсів різного роду виникають практично во всіх звенях системи «производство-хранение-распределение». І при дефіциті запасів, і при неоправданно високому їх рівні порушується нормальний ход виробництва, що приводить до втрати прибутку. В результаті виникає необхідність в розробці методів математичного моделювання управляємих мереж поставок з метою визначення оптимальних в певному сенсі рівнів запасів, а також побудови оптимальних стратегій управління запасами.

Управління запасами заключається в визначенні моментів часу і розмірів замовлень на їх виконання. В даній роботі розглядається модель управління запасами, яка передбачає перевірку рівня запасів через рівні проміжки часу і розміщення замовлення, розмір якого визначається в відповідності з вибраною стратегією.

В последнее десятилетие в теории управления запасами активно применяется концепция инвариантности. В работе [1] приведен обзор результатов, относящихся к подавлению произвольных ограниченных внешних возмущений, полученных на основе использования техники линейных матричных неравенств (ЛМН) и метода инвариантных эллипсоидов. При этом для синтеза оптимального регулятора требуется решить задачу поиска наименьшего по некоторому критерию инвариантного эллипсоида замкнутой системы.

При практической реализации указанного подхода к регуляторам предъявляются различные требования, одним из которых является ограниченность ресурса управления. В настоящей работе рассматривается линейное ограниченное управление, которое определено лишь в некоторой ограниченной области фазового пространства. Подобная постановка задачи позволяет напрямую применять технику ЛМН и получать простые вычислительные алгоритмы. Как правило, ограничения на управление задаются в какой-либо норме. Однако, спецификой задач управления запасами является неотрицательность значений переменных, что приводит к наличию несимметричных ограничений на значения состояний и управляющих воздействий.

Таким образом, конструктивное описание условий, которым должны удовлетворять значения управляющих воздействий, составляет одну из целей настоящей работы. Оценка допустимой области в пространстве управляющих воздействий получена в терминах разрешимости системы билинейных матричных неравенств (БМН). Для поиска решения системы БМН предлагается использовать итеративную процедуру, которая не гарантирует сходимости процесса, однако подобный подход применяется во многих практических приложениях [2]. Итеративная процедура состоит в следующем:

1. Задать начальные значения компонент вектора  $u_{(0)}^{\max}$ , определяющего граничные значения управляющих воздействий.
2. Найти значения матричных и скалярных переменных путем решения соответствующей задачи полуопределенного программирования, используя значения  $u_{(0)}^{\max}$ .
3. Найти новые значения компонент вектора  $u_{(j)}^{\max}$  путем решения аналогичной задачи, используя значения матричных и скалярных переменных, полученные на шаге 2.
4. Вычислить значение критерия останова  $\|u_{(j)}^{\max} - u_{(j-1)}^{\max}\| / \|u_{(j)}^{\max}\|$ . Перейти к шагу 2 с найденным значением  $u_{(j)}^{\max}$ , если полученная величина превышает заданное значение, иначе остановить процедуру.

Найденное решение системы БМН предоставляет проектировщику множество регуляторов, удовлетворяющих заданным требованиям и ограничениям, среди которых необходимо найти оптимальный по некоторому критерию качества. Одним из распространенных критериев является квадратичный. Поскольку главной целью управления является подавление влияния внешнего спроса на уровни запаса ресурсов, а степень подавления определяется размером инвариантного эллипсоида замкнутой системы, то интерес представляет решение обратной задачи: найти весовые матрицы, при которых гарантируется наименьший размер искомого эллипсоида. Поэтому основной результат настоящей работы состоит в построении допустимого в смысле заданных ограничений на значения управляющих воздействий стабилизирующего регулятора и решение с помощью итеративной процедуры соответствующей системы БМН, что позволяет определить значения весовых матриц квадратичного функционала, при которых гарантируется максимальная степень подавления влияния внешнего спроса.

## Литература

1. Хлебников М.В. Оптимизация линейных систем при ограниченных внешних возмущениях (техника инвариантных эллипсоидов) / М.В. Хлебников, Б.Т. Поляк, В.М. Кунцевич // Автоматика и телемеханика. — 2011. — № 11. — С. 9 — 59.

2. Mulder E.F. Multivariable anti-windup controller synthesis using bilinear matrix inequalities / E.F. Mulder, M.V. Kothare, M. Morari // European Journal of Control. — 2000. — Vol. 7. — No. 5. — P. 455 — 464.

УДК 62-503.57

Т.Г.Баган, ст. викладач, Нац. техн. ун-т України  
«КПІ», mtbagan@ukr.net

## ДОСЯГНЕННЯ РОБАСТНОЇ ЯКОСТІ ДЛЯ ОБ'ЄКТІВ ЗІ ЗМІННИМИ ПАРАМЕТРАМИ

Параметри моделі котлоагрегату мають нелінійні характеристики в різних режимах роботи енергообладнання, що ставить задачу побудови робастної системи керування. Використання регулятора з внутрішньою моделлю керування, де в якості оцінки взята  $H_\infty$ -норма замкненої системи, дозволяє забезпечити задані показники якості перехідних процесів, незалежно від неточності моделі або змін параметрів обладнання в процесі роботи. Складена програма, яка рекомендує параметри налаштування регулятора для досягнення робастної якості.

*Ключові слова:* робастність; якість; модель; синтез; стійкість.

Параметры модели котлоагрегата имеют нелинейные характеристики в различных режимах работы энергооборудования, что ставит задачу построения робастной системы управления. Использование регулятора с внутренней моделью управления, где в качестве оценки взята  $H_\infty$ -норма замкнутой системы, позволяет обеспечить заданные показатели качества переходных процессов, независимо от неточности модели или изменений параметров оборудования в процессе работы. Составлена программа, которая рекомендует параметры настройки регулятора для достижения робастного качества.

*Ключевые слова:* робастность; качество; модель; синтез; устойчивость.

Parameters boiler models are nonlinear characteristics in different modes of power equipment, which makes the task of building a robust control system. Use a regulator with internal model control, where the assessment is taken  $H_\infty$ -norm of system closed, ensures quality indicators defined transients, regardless of model inaccuracies or changes parameters of the equipment in the process. Compiled program that encourages controller settings to achieve robust quality.

*Keywords:* robustness; quantity; model; design; stability.

Характерними особливостями енергетичних котлоагрегатів є великі габарити, високі швидкості газів, щільні компоновки поверхонь нагріву. Забезпечення надійної роботи для них тільки у стаціонарних режимах недостатньо для ефективного функціонування котлоагрегату в цілому. Серйозно встає ця проблема при змінах енергетичних навантажень. При цьому суттєво змінюються параметри об'єкта керування [1]. Окрім цього на непостійність параметрів об'єкта керування впливають також нелінійні характеристики різних елементів системи керування, таких як клапани, виконавчі механізми. Також можливі часті і неконтрольовані зовнішні збурення. Такі особливості надають невизначеності моделі об'єкта керування.

При постійних налаштуваннях регулятора все це призводить до значного зниження стійкості та якості роботи замкненої системи керування. Нестабільність динамічних характеристик енергоблоку створює серйозні проблеми, пов'язані з ефективним використанням стандартних налаштувань регуляторів в умовах роботи енергоблоку в широкому діапазоні навантажень. Таким чином, постає задача синтезу робастної системи автоматичного керування, яка б не тільки забезпечувала стійкість в межах існуючих невизначеностей, але й гарантувала задані показники якості функціонування системи в умовах змінних характеристик об'єкта керування.

В останні десятиліття з'явилося багато публікацій про робастне управління, в яких більше ретельно розглядаються робастні аспекти, пов'язані з невизначеністю моделі [2, 3]. Серед різноманітних методів і способів побудови робастних систем для інерційних об'єктів з запізнюванням можна виділити: предиктор Сміта — використовується для об'єктів з великим запізнюванням, але дуже чутливі до його варіацій; предикативний ПІ-регулятор (ППІ) — є модифікацією

предиктора Сміта, погано відпрацьовує по каналу збурення-вихід, а також чутливий до змін запізнювання; керування на основі  $H_2$ - або  $H_\infty$ -норми — мінімаксне керування [3], яке в реальних умовах є досить складною математичною задачею; регулятор з внутрішньою моделлю керування (ІМС) — використання моделі об'єкта керування в структурі самого регулятора, що дає можливість налаштувати робастність незалежно від інших параметрів регулятора [4, 5].

Доцільно поєднати ідею ІМС з використанням методу  $H_\infty$ -норми замкненої системи. Це дозволить синтезувати систему, яка орієнтуючись на «найгірший» режим роботи, гарантує однозначну стійкість, і при цьому, шляхом вибору параметра налаштування регулятора, надасть системі потрібну, наперед визначену якість функціонування [6]. При збільшенні вимог до функціонування системи керування варто використовувати регулятор з двома ступенями свободи, який забезпечить покращені і незалежні реакції по каналах завдання і зовнішнього збурення [7].

Побудова ІМС-регулятора, на основі  $H_\infty$ -норми замкненої системи, базується на типі моделі об'єкта керування. При ідентифікації доцільно використовувати прості моделі низького порядку з указанням меж зміни її параметрів. Тому для синтезу були обрані моделі у вигляді аперіодичних ланок 1-го та 2-го порядків, інтегральної ланки 1-го порядку та інверсійної ланки 2-го порядку з запізненням. Певні математичні ускладнення викликає використання ланки запізнення у складі моделі. Для уникнення трансцендентної функції використовується апроксимація запізнення розкладанням у ряд Тейлора або Паде 1-го порядку. В результаті ІМС-синтезу отримуємо «чистий» ІМС-регулятор у вигляді неправильно визначеної передавальної функції (порядок чисельника вищий за порядок знаменника). Для фізичної реалізації цього регулятора слід до нього додати фільтр відповідного порядку. Постійна часу цього фільтра  $\lambda$  і є компромісом між мірою робастності та показниками якості.

Параметр  $\lambda$  є мірою якості в ІМС- $H_\infty$ -регуляторі і має пряме відношення до робастності замкнутої системи. Змінюючи цей параметр можна отримувати різні кількісні показники якості функціонування системи та робастності.

Під час моделювання отримані однозначні залежності основних показників якості функціонування системи від параметра налаштування  $\lambda$  для всіх типів моделей об'єкту [6] та регуляторів з одним та двома ступенями свободи [7]. В результаті сформовано масив даних, а на його базі створена програма, що дозволяє підібрати параметри налаштування регулятора, який являючись робастним, гарантує досягнення показників якості не гірше заданих. Таким чином, маючи модель об'єкта керування і знаючи межі зміни параметрів цієї моделі, можна задати значення бажаного показника або набору показників якості функціонування системи і отримати ІМС- $H_\infty$ -регулятор, який забезпечить робастність системи з заданою якістю.

## Література

1. Коновалов М.А. Проблемы автоматизации инерционных теплоэнергетических объектов / М.А. Коновалов. — К.: Феникс, 2009. — 312 с.
2. Åström K.J. Advanced PID Control / K.J. Åström, T. Hägglund. — Instrument Society of America. — Research Triangle Park, 2006. — 460 p.
3. Morari M. Robust Process Control / M. Morari, E. Zafiriou. — New Jersey: Prentice Hall-Englewood Cliffs, 1989. — 479 p.
4. Brosilow C. Techniques of Model-Based Control [Text] / C. Brosilow, B. Joseph. — Prentice Hall Professional, 2002. — 680 p.
5. Vilanova R. IMC based robust PID design: tuning guidelines and automatic tuning // Journal of process control, 18. — 2008. — P. 61 — 70.
6. Ковриго Ю.М. Методика налаштування  $H_\infty$ -ПІД регулятора для об'єктів із запізненням / Ю.М. Ковриго, Т.Г. Баган // Наукові вісті НТУУ «КПІ», К. — 2013. — № 1. — С. 12 — 17.
7. Ковриго Ю.М. Проектування систем керування з регулятором на базі внутрішньої моделі з двома ступенями свободи / Ю.М. Ковриго, Т.Г. Баган, А.П. Ущатовський // Східно-європейський журнал передових технологій, Харків. — 2014. — Том 4 № 11 (70). — С. 4 — 8.

УДК 62-503.57:622.24

Т.М.І. Горбійчук, д-р техн. наук, проф.,  
Т.В. Гуменюк,  
Івано-Франківський нац. техн. ун-т. нафти і газу,  
tarasksm@gmail.com

## ОПТИМІЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ ПОГЛИБЛЕННЯ ГЛИБОКИХ СВЕРДЛОВИН В УМОВАХ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ

Для адекватного відтворення невизначеності тривалості спуско-піднімальних операцій їх запропоновано розглядати як нечіткі величини з певною функцією належності. Виходячи із цієї передумови, була сформульована задача нечіткої оптимізації процесу поглиблення свердловини і розробили метод її розв'язання. Ефективність розробленого методу підтверджена на конкретних промислових даних.

*Ключові слова:* буріння; критерій оптимальності; керування; генетичний алгоритм.

Для адекватного воспроизведения неопределенности продолжительности спуско-подъемных операций, их предложено рассматривать как нечеткие величины с определенной функцией принадлежности. Исходя из этой предпосылки, была сформулирована задача нечеткой оптимизации процесса углубления скважины и разработали метод ее решения. Эффективность разработанного метода подтверждена на конкретных промышленных данных.

*Ключевые слова:* бурение; критерий оптимальности; управление; генетический алгоритм.

For adequate reproduction of descent-lifting operations duration values uncertainty, they we proposed to consider them as fuzzy variables with certain membership functions. According to this premise, there was formulated the problem of fuzzy optimization of the deepening wells process and developed a method to solve it. The effectiveness of this method was confirmed on specific industrial data.

*Keywords:* drilling; optimality criterion; control; genetic algorithm.

Збільшення глибини свердловини, розбурювання родовищ у важкодоступних районах, на континентальному шельфі призводить до подальшого росту витрат, ефективного використання яких визначається рівнем розвитку техніки та технології процесу буріння. Головним завданням вдосконалення технології процесу буріння є забезпечення будівництва свердловини у найкоротший строк з найменшими витратами. Вирішення цієї проблеми в даний час пов'язується з подальшим підвищенням темпів і якості будівництва свердловин, оснащенням сучасними технічними засобами, впровадження прогресивних технологій, розроблення ефективних методів оптимального керування.

Метою роботи є розроблення методу нечіткої оптимізації процесу поглиблення глибоких свердловин, що дасть змогу визначити альтернативи із заданої множини факторів керування у відповідності з вибраним критерієм.

Сучасні бурові установки дозволяють в широкому діапазоні змінювати осьове навантаження  $F$  на долото, і тому воно вважається основним керуючим впливом. Для зміни частоти обертання долота  $N_d$  на даний час існують більш обмежені можливості. При роторному бурінні вона змінюється дискретно.

При керуванні процесом буріння осьове навантаження на долото  $F$  і швидкість його обертання  $N_d$ , як правило, підтримується постійними на протязі всього рейсу буріння.

Тому поставимо задачу — знайти таке  $F$  і  $N_d$  із допустимої області  $A_U$ , які є незмінним на протязі рейсу буріння і щоб критерій оптимальності вартість метра проходки  $q$  набув найменшого значення

$$\min : q = \frac{C_6 (t_6(\bar{U}) + t_{cn}) + d}{h(\bar{U})}, \quad (1)$$

$$\bar{U} \in A_U, \quad (2)$$

де  $C_6$  — вартість роботи бурової установки на протязі однієї години;

$t_6$  — затрати часу на механічне буріння;

$t_{\text{сп}}$  — тривалість спуско-піднімальних операцій (СПО);

$d$  — вартість долота;  $h$  — проходка на долото за час  $t_6$ ;

$A_U$  — допустима область керування;

$$\bar{U} = (F, N_d)^T.$$

При постійній потужності приводу роторного механізму зі збільшенням глибини  $H$  свердловини зростають втрати потужності на тертя бурильних труб об стінки свердловини, зменшуються граничні значення параметрів режиму буріння. Одночасно зменшується потужність, затрачувана на обертання долота. Тобто співвідношення між  $F$  і  $N_d$  повинно задовольняти умові [1]

$$A_1 N_d + A_2 N_d^2 + A_3 H N_d^{1,7} + A_4 N_d F \leq W_p, \quad (3)$$

де  $A_1, A_2, A_3$  і  $A_4$  — відомі величини, які не залежать від  $F, N_d$  і  $Q$ ;

$W_p$  — потужність приводу ротора.

На керувальні дії  $F$  і  $N_d$  накладаються обмеження [1]

$$F_{\min} \leq F \leq F_{\max}, \quad N_{d\min} \leq N_d \leq N_{d\max}, \quad (4)$$

де  $F_{\min}, N_{d\min}, F_{\max}, N_{d\max}$  — відповідно мінімальні і максимальні значення осьового навантаження на долото і швидкості його обертання. Таким чином, допустима область керування  $A_U$  в обмеженні (2) визначається системою нерівностей (3) — (4).

Значення величини  $t_{\text{сп}}$  з певною вірогідністю може бути оцінено, зокрема, шляхом передбачення за результатами його значення у попередніх рейсах [2]. Складність такого передбачення зумовлена тим, що конкретне значення  $t_{\text{сп}}$  визначається не лише типом та продуктивністю приводу бурової лебідки, глибиною та кривизною свердловини, але й цілим рядом суб'єктивних факторів, які пов'язані зі складом бурової бригади, кваліфікацією її членів, сезонністю робіт, погодними умовами та ін. Таким чином, наявність багатьох факторів, які невизначеним чином впливають на тривалість спуско-піднімальних операцій дає всі підстави вважати, що  $t_{\text{сп}}$  є нечіткою величиною з певною функцією належності  $\mu(t_{\text{сп}})$ .

Оскільки величина  $t_{\text{сп}}$  входить у критерій оптимальності (1) лінійно, то у нашому випадку функцію належності доцільно вибрати у вигляді гаусової апроксимації з параметрами  $m$  і  $\sigma$ .

Доведено, що функція належності критерію  $q$  є такою:

$$\mu(q) = \exp\left\{-\frac{(q - m_q)^2}{2\sigma_q^2}\right\}, \quad \text{де } m_q = \frac{C_6(t_6(\bar{U}) + m) + d}{h(\bar{U})}, \quad \sigma_q = \frac{\sigma C_6}{h(\bar{U})}.$$

Задамося певним значенням рівня функції належності  $\mu(q) = \alpha$ , визначимо  $q^* = m_q + \sigma_q \sqrt{\ln \frac{1}{\alpha^2}}$ . У результаті отримаємо задачу чіткого нелінійного програмування

$$\min : q(\bar{U}) = \frac{C_6(t_6(\bar{U}) + m) + d}{h(\bar{U})} + \frac{\sigma C_6}{h(\bar{U})} \sqrt{\ln \frac{1}{\alpha^2}}, \quad \text{за умови, що виконуються обмеження (3) — (4)}$$

на альтернативи  $\bar{U}$ .

За допомогою генетичного алгоритму успішно розв'язана задача нечіткої оптимізації процесу поглиблення свердловини для випадку, коли цільова функція має несприятливу топологію, а область обмежень не є випуклою.

## Література

1. Горбійчук М.І. Оптимізація процесу буріння глибоких свердловин: монографія / М.І. Горбійчук, Г.Н. Семенов — Івано-Франківськ: Факел, 2006. — 493 с.
2. Горбійчук М.І. Прогнозування тривалості спуско-піднімальних операцій / М.І. Горбійчук, В.Б. Кропивницька // Восточно-Европейский журнала передовых технологий. — 2006. — № 2/2(20). — С. 37 — 40.

УДК 007.52

Д.О. Стеценко, аспірант,  
Я.С. Кільмар,  
Київський нац. ун-т. харч. технологій, lsintay@gmail.com

## КЕРУВАННЯ БРАГОРЕКТИФІКАЦІЙНОЮ УСТАНОВКОЮ З ВИКОРИСТАННЯМ MPC-ПІДХОДУ

Досліджено брагоректифікаційну установку (БРУ) спиртового заводу, як складний об'єкт управління, котрий функціонує в умовах невизначеності. Запропоновано використати новий MPC-підхід керування, для покращення якісних показників перехідних процесів, використовуючи математичні моделі об'єктів.

*Ключові слова:* Об'єкт управління; математичне моделювання; горизонт передбачення;

Исследовано брагоректификационную установку (БРУ) спиртового завода, как сложный объект управления, который функционирует в условиях неопределенности. Предложено использовать новый MPC-подход управления, для улучшения качественных показателей переходных процессов, используя математические модели объектов.

*Ключевые слова:* Объект управления; математическое моделирование; горизонт предсказания;

This article is about bragorectification setting (BRS) as a complex object of regulation, operating under uncertainty. Proposed to use the new MPC-management approach to improve the quality indicators of transients using mathematical models of objects.

*Keywords:* object management; mathematical modeling; prediction horizon;

На сьогоднішній день брагоректифікаційні установки (БРУ) спиртових заводів є складними, нестационарними та багатозв'язаними об'єктами управління, що функціонують в умовах невизначеності. Невизначеності моделей вхідних впливів, пов'язані з неможливістю точного опису впливу середовища на об'єкт управління (ОУ), насамперед, через велику кількість і складність вимірювання впливів, що відображують введенням у модель еквівалентних неконтрольованих координатних збурень, адитивних керуючим або керованим змінним (координатами). Для вирішення такої проблеми пропонується використати новітні інтелектуальні технології в обробці показників стану об'єкта та формування керуючих дій використовуючи метод узгальненого керування з передбаченням (Model Predictive Control).

Основною перевагою MPC-підходу[1], що визначає його успішне використання в практиці побудови та експлуатації систем управління, служить відносна простота базової схеми формування зворотного зв'язку, що поєднується з високими адаптивними властивостями. Остання обставина дозволяє управляти багатовимірними і багатозв'язними об'єктами зі складною структурою, що включає нелінійності, оптимізувати процеси в режимі реального часу в рамках обмежень на керуючі і керовані змінні, враховувати невизначеності в завданні об'єктів і збурень. Крім того, можливий облік транспортного запізнення, облік змін критеріїв якості в ході процесу і відмов датчиків системи вимірювання.

Принцип MPC-підходу становить наступна послідовність керування динамічними об'єктами за принципом зворотного зв'язку:

Розглядається математична модель БРУ, початковими умовами для якої служить поточний стан ОУ. При заданому програмному управлінні виконується інтегрування рівнянь цієї моделі, що дає прогноз руху об'єкта на деякому кінцевому відрізку(рис 1).

Виконується оптимізація програмного управління, метою якої є наближення регульованих змінних прогнозуємої моделі до відповідних завдань на горизонті прогнозу[2]. Оптимізація здійснюється з урахуванням всього комплексу обмежень, накладених на керуючі і регульовані змінні.

На кроці обчислень, що становить фіксовану малу частину горизонту прогнозу, реалізується знайдене оптимальне управління і здійснюється вимірювання (або відновлення по виміряним змінним) фактичного стану об'єкта на кінець кроку.

Горизонт прогнозу зсувається на крок вперед, і повторюються пункти 1 — 3 цієї послідовності дій.



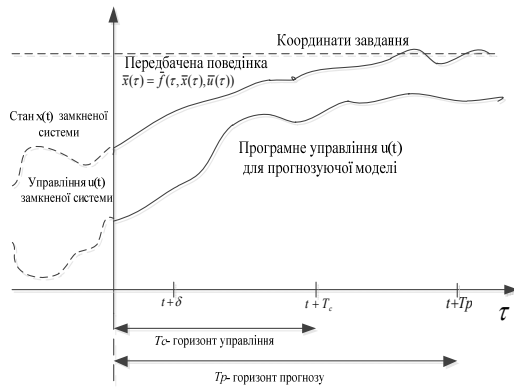


Рис. 1. Схема здійснення прогнозу

диференціальних рівнянь; даний підхід дозволяє враховувати обмеження, які накладені як на керуючі змінні, так і на компоненти вектора стану [2]; метод передбачає мінімізацію функціонала, що характеризує якість процесу управління, в режимі реального часу; для управління з прогнозом необхідно, щоб поточний стан об'єкта безпосередньо вимірювався або оцінювався; передбачена поведінка динамічного об'єкта в загальному випадку буде відрізнятися від його реального руху.

### Література

1. Веремей Е.И. Введение в задачи управления на основе предсказаний / Е.И. Веремей, В.В. Еремеев // Всероссийская научная конференция «Проектирование научных и инженерных приложений в среде MATLAB». — М., 2004. — С. 98—115.
2. Геловани В.А. Интеллектуальные системы поддержки принятия решений в нештатных ситуациях с использованием современной информационной технологии / В.А. Геловани, А.А. Башлыков, А.А. Бритков, Е.Д. Вязилов. — М.: Эдиториал УРСС, 2001. — 304 с

Загальна схема управління з передбаченням складається з наступних дій:

Вимірювання або оцінка вектору стану  $x(t)$  реального об'єкта.

Вирішення оптимізаційної задачі для прогнозуючої моделі (2) з початковою умовою  $\bar{x}|_{\tau=t} = x(t)$ .

Використання оптимальної функції  $\bar{u}(\tau, x(t), T_p, T_c)$  в якості програмного управління на відрізку  $\tau \in [t, t + \delta]$ .

Заміна моменту часу  $t$  на момент  $t + \delta$  і повторення операцій вказаних в пунктах 1-3.

До переваг розглянутого підходу можна віднести наступне: в якості прогнозуючої моделі можна використовувати нелінійні системи звичайних

УДК 664.1:62-503.57

М.А. Сич, аспірант, Нац. ун-т харчових техно-  
логій, a.d.111@bk.ru

## ФРАКТАЛЬНО-ВЕЙВЛЕТНІ МЕТОДИ УПРАВЛІННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМ КОМПЛЕКСОМ ЦУКРОВОГО ЗАВОДУ

Підвищення ефективності аналізу і управління станом складних промислових об'єктів можливо на основі розширення аналітичних інформаційних систем на рівні технологічного керування підприємством і введення додатково нової — аналітичної інформаційної системи, що перетворює загальний технологічний інформаційний потік до оптимального вигляду для ситуаційного аналізу.

*Ключові слова:* цукровий завод; вейвлет-аналіз; фрактальний аналіз; часовий ряд.

Повышение эффективности анализа и управления состоянием сложных промышленных объектов возможно на основе расширения аналитических информационных систем на уровне технологического управления предприятием и введение дополнительно новой — аналитической информационной системы, превращающей общий технологический информационный поток к оптимальному виду для ситуационного анализа.

*Ключевые слова:* сахарный завод, вейвлет-анализ, фрактальный анализ, временной ряд.

Improving the efficiency of the analysis and management of complex industrial facilities state possible through enhanced of analytic information systems at the level of the process of enterprise management and the introduction of further new — analytical information system which turns the overall flow of information technology to the optimal view for situational analysis.

*Keywords:* sugar refinery, wavelet analysis, fractal analysis, time series.

Розглядається технологічний комплекс (ТК) цукрового заводу, який є складною системою і складається зі значної кількості функціонально необхідних ступенів переробки сировини та напівпродуктів.

У відповідності з особливостями технологічних процесів виробництва цукру необхідно вирішити наступні питання:

- провести аналіз параметрів технологічних процесів виробництва цукру;
- підібрати відповідні методи для аналізу та управління процесом виробництва цукру ;
- провести моделювання з використанням сучасних програмних засобів;
- розробити структуру системи керування процесом виробництва цукру.

У даній роботі пропонуються два методи розв'язання задачі виявлення зміни властивостей істотно нестационарного часового ряду. В основі першого методу лежить зв'язок локальної регулярності функції зі значеннями вейвлет-коефіцієнтів. Однак, на відміну від роботи [1], де в кожній точці оцінювався показник регулярності, запропоновано менш трудомісткий підхід, заснований на обчисленні статистик від вейвлет- коефіцієнтів і порівнянні їх з отриманими нами порогоми. Нестационарний часовий ряд представимо у вигляді послідовності динамічно спостережених в процесі випробувань значень.

Другий підхід використовує поняття сингулярності в сенсі стаціонарних засад. При цьому наявна реалізація розглядається як випадкова функція, вибирається модель процесу, що залежить від деякого параметра і може бути векторною, а точками зміни властивостей випадкового процесу вважаються точки стрибкоподібної зміни параметра цього процесу. В основі таких методів часто лежить визначення стаціонарності — стійкості моментних функцій принаймні першого і другого порядків.

Алгоритми цього підходу дозволяють відстежувати зміни властивостей випадкового процесу, пов'язані зі зміною одного стаціонарного процесу іншим на різних ділянках часового ряду. Такий підхід, однак, не дає можливості визначати зміни компонент істотно нестационарного часового ряду.

Впровадження в механізми обробки даних методів вейвлет-аналізу наочно показує їхню здатність комплексно підходити до рішення завдань. Найбільш відомі застосування вейвлет-аналізу для подавлення шуму. Реальні дані часто містять випадючі ділянки; для обробки таких сигналів розроблені адаптивні вейвлет-методи. Висока потреба в якісних алгоритмах частково задоволена розробленими методами швидких перетворень.

Безперервне вейвлет-перетворення (БВП) будується за допомогою безперервних масштабних перетворень і переносів вейвлета  $y(t)$  з довільними значеннями масштабного коефіцієнта  $a$  і параметра зсуву  $b$  [2]:

$$W(a,b) = |a|^{-\frac{1}{2}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \psi^* \left( \frac{t-b}{a} \right) dt, \quad (1)$$

де символ  $*$  позначає операцію комплексного сполучення.

Результатом виконання вейвлет-перетворення передбачається одержати образ у вигляді вектора властивостей, що відповідає поточному стану технологічного процесу. Методи вейвлет-аналізу можливо застосувати до даних різної природи. Це можуть бути, наприклад, одномірні функції або двовимірні зображення.

Для класифікації системи можна скористатися обчисленням кореляційної розмірності або одержати показник Херста. Кореляційна розмірність  $D_c$ , заснована на обчисленні кореляційного інтеграла, є важливою кількісною характеристикою атрактора, що несе інформацію про ступінь складності поведінки динамічної системи.

Для дослідження показників часового ряду були визначені фрактальна розмірність і показник Херста. Основною характеристикою фрактального об'єкта є фрактальна розмірність. Є кілька методів визначення фрактальної розмірності для часового ряду. Перший - це класичний клітинний метод, коли графік накривають серією сіток і визначають фрактальну розмірність точно так само, як і для геометричних фракталів. Другий метод для дослідження фрактальних часових рядів був запропонований Бенуа Мандельбротом і базується на дослідженнях проведених англійським дослідником Херстом і називається R/S методом [3]. Він побудований на аналізі розмаху параметра (найбільшим і найменшим значенням на досліджуваному відрізку) і середньоквадратичного відхилення. І третім є метод, заснований на зміні довжини кривої залежно від масштабу. Якщо крива близька до фрактальної, то зі зменшенням масштабу довжина кривої буде зростати ступеневим чином.

Здійснено дослідження часових рядів цукрового виробництва на основі вейвлетних та фрактальних методів аналізу сигналів. Розроблена система керування складним технологічним комплексом з використанням вейвлетів, а також фрактального аналізу кореляційної розмірності, показника Херста.

Використання методів вейвлетного та фрактального аналізу технологічних процесів дозволяє встановити нові фактори впливу на поведінку складних технологічних комплексів, що приведе до підвищення ефективності їх функціонування.

### Література

1. Mallat S. Singularity detection and processing with wavelets / S. Mallat, W.L. Hwang // IEEE Trans. Info Theory. — 2002. — V. 38, № 2. — P. 617 — 642.
2. Малла, С. Вэйвлеты в обработке сигналов / С. Малла. — М.: Мир, 2005. — 671с.
3. Сигел Э. Практическая бизнес-статистика / Э. Сигел. — М.: Издательский дом «Вильямс», 2002. — 1056 с.

УДК 663:658.5:519.7

Н.Г. Новаковська, аспірант, Нац. ун-т харчових  
технологій, nataliia.mos@gmail.com

## КРИТЕРІАЛЬНІ КОНФЛІКТИ ПРИ УПРАВЛІННІ БРАГОРЕКТИФІКАЦІЙНОЮ УСТАНОВКОЮ

В процесі управління об'єктом виникає необхідність виявляти конфлікти. Конфлікт, в деякому розумінні, є рушійною силою виробничого процесу за умови, що існує його узгоджене рішення.

*Ключові слова:* брагоректифікаційна установка; критеріальні конфлікти; вирішення конфліктів.

В процессе управления объектом возникает необходимость обнаружения конфликтов. Конфликт — движущая сила производственного процесса при условии, что существует его решение.

*Ключевые слова:* ректификационная установка; критериальные конфликты; решения конфликтов.

There is a necessity to identify conflicts during the control process of the object. The conflict, in a sense, is the driving force of the production process on condition that there is it coordinated decision.

*Keywords:* distillation unit; criterial conflicts; conflict resolution.

Більшість технологічних процесів виробництва є складними технологічними комплексами, характерними особливостями яких є високий ступінь невизначеності, велика розмірність, багатокритеріальна поведінка, коли поведінка об'єкта управління та пріоритетність цілей змінюється від ситуації, яка виникає в залежності від обстановки на об'єкті управління. Саме до таких об'єктів належить і брагоректифікаційна установка, специфіка технологічного процесу якої полягає в багатокритеріальній оптимізації в умовах різного роду невизначеностей, таких як ситуаційна невизначеність. Розглядається проблема визначення типу конфлікту та його розв'язання. Метою дослідження конфлікту є розробка сценаріїв (правил) поведінки, що дозволяють раціонально вирішити даний конфлікт чи сприяти отриманню максимально можливого оптимального в даній ситуації рішення.

Конфліктна ситуація — це ситуація, що включає або суперечливі позиції сторін з якогось приводу, або протилежні або неспівпадаючі цілі та засоби їх досягнення. Тоді під конфліктом розуміється ситуація появи об'єкта і предмета конфлікту, суб'єктів (тобто сторін конфлікту) та протилежних чи незбіжних інтересів на одному полі деякої області. Конфлікти необхідно розглядати комплексно, з врахуванням зв'язності всіх параметрів, для того щоб отримати багатосторонні висновки та стійкі оцінки результатів конфлікту. В конфліктних ситуаціях зберігається принцип максимуму ефективності, але особливістю конфлікту є невизначеність ситуації, що призводить до ризику, так як конфлікт — це складна система зі слабко передбачуваною поведінкою. Ніяке як завгодно точне спостереження за поведінкою системи на будь-якому, але кінцевому інтервалі часу  $T$  не дає підстав для однозначного визначення поведінки системи на інтервалі  $T+\tau$ , де  $\tau$  — як завгодно мале, але скінчене.

Вираз «вирішення конфлікту» потребує уточнення. Суворого вирішення конфлікту як такого не існує. Оптимуму функціоналу ефективності (цільової функції) також не існує. Рішення необхідно прийняти. Дослідник повинен визначити: 1) які рішення слід було б прийняти (виходячи зі своїх критеріїв), 2) які рішення можуть бути прийняті (з урахуванням обмеженості інформації).

У конфліктних ситуаціях доводиться приймати одне з чотирьох можливих рішень: вирішити конфлікт; відмовитися від вирішення конфлікту; продовжити дослідження ситуації; ускладнити ситуацію. Ухвалення рішення при єдиному критерії ефективності пов'язано з математичними труднощами, при багатьох критеріях — з концептуальними.

Як відомо, вирішити виробничий конфлікт аналітично неможливо, потрібно проводити моделювання. Також потрібно враховувати слабкопрогнозованість ситуацій та здатність сторін оперативно змінювати цілі (критерії ефективності). Більш того, рішення необхідно прийняти, тобто необхідна особа, яка приймає рішення (ОПР).

Типів конфліктів існує досить багато. Зрозуміло, що їх класифікація відбувається на підставі деяких критеріїв. Однією з таких підстав може бути локальна предметна область існування конфлікту. Виділення такої області дозволяє одночасно визначити об'єкт і предмет конфлікту. В реальних системах конфлікт не можна віднести до певного класу, так як він містить як компоненти взаємодії, так і компоненти протидії. Залежно від типу взаємодії конфлікти поділяються на: нейтралітет, протидію (антагонізм, гостре суперництво і негостре суперництво) та сприяння (симбіоз, єдність, співдружність).

Вирішення завдань, пов'язаних із забезпеченням ОНР необхідною інформацією, в даному випадку зводиться до вирішення проблеми векторної оптимізації — надзвичайно складного завдання. Оскільки у виробничих умовах використовувати векторну оптимізацію для вирішення конфлікту звичайно неефективно, для цих цілей застосовується кваліметричне рішення, засноване на експертних оцінках.

При реалізації багатоцільового управління виникають ситуації, коли покращення за одним з критеріїв призводить до негативної зміни іншого критерію управління: виникає критеріальний та ресурсний конфлікти. Найчастіше під час роботи багатокритеріального технологічного об'єкта в конфлікт вступають продуктивність, якість та втрати.

Іноколи виникають конфлікти антагоністичного характеру, що призводять до виникнення аварійних ситуацій. Шляхом змінювання режимних параметрів в ситуаційно-значущій зоні конфлікт із антагоністичного переводиться в неантагоністичний, тобто в область компромісів. Існують певні зони, в яких можна знайти оптимальне рішення конфлікту і навпаки, яскраво видно що покращення по одному з критеріїв призводить до різкого погіршення іншого.

Алгоритм виявлення та розв'язання конфліктів такий: спочатку проводиться аналіз виявленого конфлікту, далі з'ясовується його тип та проводиться класифікація конфлікту (ідентифікація), після цього відбувається його розв'язання і конфлікт переводиться в неантагоністичний.

Ідентифікація конфліктів у об'єктах управління проводиться за допомогою вхідної інформації у вигляді часових рядів технологічних параметрів брагоректифікаційної установки. При цьому виникає необхідність апроксимації даних рядів на певному проміжку часу. Після апроксимації обираються показники якості, за якими оцінюється стан конфлікту. В нашому випадку використовуються такі показники якості, як продуктивність БРУ, якість готової продукції і втрати сировини та енергії.

Для нашого технологічного процесу характерні протиріччя між цільовими функціями, коли одночасно потрібно зменшити втрати, підвищити продуктивність відділення та покращити якість продукції. Досягнення однієї цілі без врахування інших неможливо. Незважаючи на протидію цілей, можна досягти ефективного (оптимального) управління шляхом поступових уступок.

Рациональним є сценарний підхід, який забезпечує одночасне покращення якості продукції, підвищення продуктивності технологічної лінії з мінімальними питомими втратами та витратами сировини та енергії. В такій постановці нагальною є потреба у визначенні та класифікації критеріальних конфліктів, що виникають у виробничих ситуаціях, а також пошук шляхів їх подолання в реальному часі.

Конфлікти, які виникають у технологічному об'єкті розглядаються з точки зору взаємодії об'єктів, тобто їх взаємного управління. Якщо опис конфлікту не зводиться до єдиної мови з єдиною системою розмірностей величин, то конфлікт багатокритеріальний. Багатокритеріальні конфлікти оптимально не розв'язувані.

Оцінка якості управління відбувається за допомогою узагальненого показника ефективності:

$$\Phi = f(Q, t), Q = \{Q_i\} \quad (1)$$

де  $Q$  — множина показників якості.

Під впливом взаємодії ефективності систем змінюються, це і є основою критеріальною класифікації. В (1) передбачається, що показники якості системи реалізовані кращим (в сенсі ефективності) чином; для цього проміжні цілі повинні відповідати критерію ефективності. На-

справді так не буває з різних причин, головна з яких – неповнота інформації про ситуацію, а от на цільові функції впливає також і передісторія.

Однозначно сформулювати рівняння реального конфлікту за допомогою аналітичних функцій для ергатичних систем вдається рідко. Універсальний спосіб виявлення та дослідження конфлікту — обґрунтування і формування системної моделі ситуації. При наявності моделі конфлікт визначається відразу і точно. Нерідко вдається прогнозувати результат конфлікту на підставі одних лише критеріїв. Стратегічну перевагу має та сторона, власний критерій якої збігається з критерієм системи або, принаймні, виявиться більш близьким до нього, навіть якщо ресурсні можливості будуть нижчими.

Досліджувалася поведінка БРУ на Червонослобідському спиртзаводі. Загальним принципом раціональної поведінки в конфліктних ситуаціях є максимум ефективності при допустимому ризику.

В результаті проведеного системного дослідження конфлікту становиться зрозуміло, що формалізація та аналітичне моделювання конфлікту можливе, але з урахуванням припущень і обмежень, а також складності.

### Література

1. Кишенько В.Д. Вирішення задачі багатокритеріальної оптимізації при управлінні технологічними процесами хлібопекарського виробництва / В.Д. Кишенько, С.С. Шаруда // Наукові праці НУХТ. — 2010. — № 33. — С.87 — 91.

УДК 519.6:681.3

О.А. Жулинський, канд. техн. наук,  
Л.Р. Ладієва, канд. техн. наук, доц.,  
Нац. техн. ун-т України «КПІ»,  
zhulinsky@vtg.com.ua

## ДО ПИТАННЯ ІДЕНТИФІКАЦІ ПРОЦЕСУ МЕМБРАННОЇ ДИСТИЛЯЦІЇ

Розглянуте питання вибору критерію оптимальності для визначення початкового розподілу коефіцієнту проникності мембрани. Обраний критерій, що характеризує зменшення ентропії системи. Отриманий початковий розподіл коефіцієнту проникності мембрани забезпечує за декілька ітерацій збіжність алгоритму градієнтної процедури ідентифікації коефіцієнту проникності.

*Ключові слова:* мембрана; розчин; коефіцієнт проникності; ідентифікація.

Рассмотрен вопрос выбора критерия оптимальности для определения начального распределения коэффициента проницаемости мембраны. Выбран критерий, характеризующий уменьшение энтропии системы. Полученное начальное распределение коэффициента проницаемости мембраны обеспечивает за несколько итераций сходимость алгоритма градиентной процедуры идентификации коэффициента проницаемости.

*Ключевые слова:* мембрана; раствор; коэффициент проницаемости; идентификация.

Considered the issue of choice optimality criterion for determining the initial distribution of coefficient of the membrane permeability. Selected criterion that characterizes the decrease in entropy of the system. The resulting initial distribution coefficient of permeability of the membrane provides a few iterations of the gradient procedure algorithm identification of the permeability coefficient.

*Keywords:* membrane; solution; permeability coefficient; identification.

Розглянуто процес розділення розчинів, де основним елементом є гідрофобна порувата полімерна мембрана, що представляє селективний бар'єр, через який проходять пари розчинника (води). Перенесення речовини через мембрану здійснюється наступними механізмами: ві-

льномолекулярною (кнудсенівською), молекулярною (нормальна дифузія) і в'язкою (масовою) течією. В залежності від зміни діаметру пор, характеристик мікроструктури, товщини мембрани змінюється і вклад кожного механізму.

В існуючих математичних моделях потік пари через мембрану знаходився для усереднених характеристик мембрани, таких як поруватість, ефективний радіус пор, коефіцієнт звивистості. Для цього треба мати точні дані про мікроструктурні параметри поруватого тіла. Але можливість точної оцінки таких морфологічних характеристик мембрани обмежена.

Концентраційна поляризація та солеутворення на поверхні мембрани призводять до збільшення концентрації розчиненої речовини на поверхні мембрани. Зменшується рушійна сила і продуктивність. Висока концентрація розчиненої речовини призводить до часткової або повної деструкції активного шару мембрани, її забрудненню, тобто відбувається порушення гідрофільно-гідрофобного балансу поверхневого шару мембрани і зміни його поруватості.

Перераховані фактори призводять до значного погіршення продуктивності мембран аж до повної втрати ними напівпроникних властивостей. При досягненні межі розчинності або гелеутворення на поверхні мембрани виникають осади, що значно знижують парціальний тиск розчинника з віддаючої сторони мембрани, і це обумовлює зниження продуктивності, котре, як правило, тим істотніше, чим вища початкова проникність самої мембрани.

Для визначення початкового розподілу коефіцієнту вибрано критерій оптимальності, який забезпечує рушійну силу процесу.

$$I = \int_0^{t_K} \int_0^{L_x} e^{(\theta_p - \theta_d)} dx dt \rightarrow \min, \quad (1)$$

де  $\theta_p, \theta_d$  — відповідно температура розчину і дистилляту, К.

Для порівняння при визначенні початкового розподілу коефіцієнту проникності використали наступний критерій оптимальності:

$$I = \int_0^{t_K} \int_0^{L_x} J_n(\theta_p, \theta_d)(\theta_p - \theta_d) dx dt \rightarrow \min, \quad (2)$$

де  $J_n$  — локальний масовий потік пари на одиниці поверхні, кг/(м<sup>2</sup>·с·Па).

Даний критерій характеризує зменшення ентропії системи. Для обчислення локального масового потоку пари використано співвідношення для випадку перенесення пари у порах мембрани шляхом молекулярної дифузії [1].

$$J_n = \frac{M_n \bar{D}_{вп} \bar{P}}{\delta R \theta_m} \ln \left( \frac{p_d - p_2(\theta_2)}{p_p - p_1(\theta_1)} \right), \quad (3)$$

де  $M_n$  — молекулярна маса водяної пари, моль;

$\bar{D}_{вп}$  — ефективний коефіцієнт взаємної дифузії пара в повітрі, м<sup>2</sup>/с;

$p_p, p_d$  — повний тиск пароповітряної суміші на теплій та холодній сторонах мембрани, Па;

$p_1, p_2$  — парціальний тиск парів розчинника (водяної пари) на теплій та на холодній сторонах мембрани, Па;

$R$  — універсальна газова стала;

$\theta_m$  — середня температура мембрани, К;

$\delta$  — товщина мембрани, м.

Обидва критерії використовувались за умови, що  $h = (\theta_p - \theta_d) - \Delta\theta_{\min} \geq 0$ .

Це обмеження враховувалось за допомогою нової змінної, що дозволило перетворити обмеження у формі нерівності в обмеження у формі рівності, яке потім додано до функції вартості у термінальну складову.

Математична модель процесу КМД представлена у вигляді рівностей [2]:

$$\frac{\partial \theta_p}{\partial t} = -W_{px} \frac{\partial \theta_p}{\partial x} - K_p(x, t) \frac{1}{\rho_p c_p l_y} (\xi_1 \theta_p - \xi_2 \theta_d) r(\bar{\theta}), \quad (4)$$

$$\frac{\partial \theta_d}{\partial t} = -W_{dx} \frac{\partial \theta_d}{\partial x} + K_p(x, t) \frac{1}{\rho_d c_d l_y} (\xi_1 \theta_p - \xi_2 \theta_d) r(\bar{\theta}), \quad (5)$$

де  $W_{px}, W_{dx}$  — відповідно швидкість руху розчину і дистилляту, м/с;

$K_p(x, t)$  — коефіцієнт проникності мембрани, кг/(м<sup>2</sup>·с·Па);

$\rho_p, \rho_d$  — густина розчину і дистилляту, кг/м<sup>3</sup>;

$c_p, c_d$  — теплоємність розчину і дистилляту, Дж/(кг·К);

$l_y$  — висота каналу, м.

Для пошуку розподілу коефіцієнту проникності мембрани застосована градієнтна процедура

$$K_p^{s+1} = K_p^s - k \frac{\partial L}{\partial K_p}, \quad (6)$$

де  $L$  — лагранжیان,

$k$  — крок градієнтної процедури.

Отриманий початковий розподіл коефіцієнту проникності мембрани забезпечує верхню межу допустимих значень продуктивності мембрани. Завдяки отриманому початковому коефіцієнту проникності збіжність алгоритму уточнення коефіцієнту проникності забезпечується за декілька ітерацій градієнтної процедури.

### Література

1. Ладієва Л.Р. Математична модель процесу контактної мембранної дистиляції / Л.Р. Ладієва, О.А. Жулинський // Автоматика. Автоматизация. Электротехнические комплексы и системы. — 2004. — № 2(14). — С.46 — 51.
2. Ладієва Л.Р. Дослідження процесу контактної мембранної дистиляції / Л.Р. Ладієва, О.А. Жулинський, М.Т. Брик, А.Ф. Бурбан // Автоматизація виробничих процесів. — 2004. — № 2(19). — С. 34 — 37.



УДК 519.25

А.П. Сарычев, д-р техн. наук, ст. науч. сотр., Ин-т  
техн. механики НАН Украины и ГКА Украины,  
sarmir@i.ua

## ЛИНЕЙНАЯ АВТОРЕГРЕССИЯ СО СЛУЧАЙНЫМИ КОЭФФИЦИЕНТАМИ НА ОСНОВЕ МГУА В УСЛОВИЯХ КВАЗИПОВТОРНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

Досліджено критерій регулярності МГУА з розбиттям спостережень на навчальні й перевірні підвибірki в умовах квазіповторних спостережень. Доведено існування оптимальної множини регресорів. Встановлено умову редукції оптимальної авторегресійної моделі, що залежить від параметрів моделі та обсягів вибірок.

*Ключові слова:* критерій регулярності.

Проведено исследование критерий регулярности МГУА в зависимости состава регрессоров. Выявлены закономерности редукции оптимальной регрессионной модели, которые зависят от параметров модели и объемов выборок.

*Ключевые слова:* критерий регулярности.

The criterion of regularity of the GMDH with dividing of observations on training and testing subsamples in conditions of quasirepeated observations is investigated. Existence of optimum set of regressors is proved. The condition of the reduction of the optimum autoregression model is obtained. This condition depends on parameters of model and volumes of samples.

*Keywords:* criterion of regularity.

Определение порядка авторегрессионных моделей со случайными коэффициентами в условиях неопределенности по составу регрессоров является актуальной задачей в теории идентификации и управления. Эта задача является одним из объектов исследования в методе группового учета аргументов (МГУА), который разработал академик НАН Украины А.Г. Ивахненко. В данной работе предлагается рассчитывать критерий регулярности в так называемой схеме квазіповторных наблюдений, которая возможна в условиях активного эксперимента. В этой схеме обучающая (A) и проверочная (B) выборки получены особым способом как пара реализаций функционирования объекта с близкими начальными условиями, качественно одинаковым характером переходных процессов и близкими конечными состояниями.

Пусть объект описывается авторегрессионной моделью со случайными коэффициентами

$$x_i^* = \begin{pmatrix} x_{i-1}^* & x_{i-2}^* & \dots & x_{i-p}^* \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \theta_1(i-1) \\ \theta_2(i-2) \\ \vdots \\ \theta_p(i-p) \end{pmatrix} + \zeta_{i-1} = \mathbf{Z}_{i,\bullet}^*(p) \mathbf{\Theta}_{\bullet,i}(p) + \zeta_{i-1}, \quad (1)$$

где  $x_i^*$  — ненаблюдаемое значение выходной переменной объекта в дискретные моменты времени  $t = t_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$ ;

$n$  — общее число наблюдений;

$p$  — число предыдущих значений переменной, которые влияют на ее текущее значение;

$\zeta_{i-1}$  — ненаблюдаемая случайная величина;

$\mathbf{\Theta}(p)$  —  $(p \times n)$ -матрица  $n$  реализаций  $(p \times 1)$ -вектора ненаблюдаемых случайных величин; в обозначении этой матрицы  $p$  означает, что при формировании величины  $x_i^*$   $i$ -я  $(p \times 1)$ -строка матрицы  $\mathbf{Z}(p)$  умножается на  $i$ -й  $(p \times 1)$ -столбец матрицы  $\mathbf{\Theta}_{\bullet,i}(p)$ ;

$\mathbf{Z}(p)$  —  $(n \times p)$ -матрица  $p$  предыдущих ненаблюдаемых значений переменной.

$$\mathbf{Z}^*(p) = \begin{bmatrix} * & * & \cdots & * \\ x_0 & x_{-1} & \cdots & x_{1-p} \\ * & * & \cdots & * \\ x_1 & x_0 & \cdots & x_{2-p} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ * & * & \cdots & * \\ x_{i-1} & x_{i-2} & \cdots & x_{i-p} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ * & * & \cdots & * \\ x_{n-1} & x_{n-2} & \cdots & x_{n-p} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Z}_{1,\bullet}^*(p) \\ \mathbf{Z}_{2,\bullet}^*(p) \\ \vdots \\ \mathbf{Z}_{i,\bullet}^*(p) \\ \vdots \\ \mathbf{Z}_{n,\bullet}^*(p) \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Пусть относительно  $(p \times 1)$ -вектора случайных коэффициентов  $\Theta_{\bullet,i}^*(p)$  выполняется:

$$\Theta_{\bullet,i}^*(p) = \overset{\circ}{\theta} + \mathbf{H}_{\bullet,i}^*(p) = \overset{\circ}{\theta} + \boldsymbol{\eta}_i(p), \quad \overset{\circ}{\theta} = (\overset{\circ}{\theta}_1, \overset{\circ}{\theta}_2, \dots, \overset{\circ}{\theta}_p)^\top \quad (3)$$

где  $(p \times 1)$  — вектор неизвестных детерминированных коэффициентов;

$\mathbf{H}(p)$  —  $(p \times n)$ -матрица  $n$  реализаций  $p$  ненаблюдаемых случайных величин, а в обозначении этой матрицы  $p$  означает, что при формировании в (1) величины  $x_i$   $i$ -й  $(p \times 1)$ -столбец этой матрицы —  $\mathbf{H}_{\bullet,i}^*(p) = \boldsymbol{\eta}_i(p) = (\eta_i(1), \eta_i(2), \dots, \eta_i(p))^\top$  умножается на  $i$ -ю  $(p \times 1)$ -строку  $\mathbf{Z}^*(p)$ .

Пусть для наблюдений выходной переменной объекта выполняется

$$x_i = x_i^* + \varepsilon_i, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (4)$$

где  $x_i$  — наблюдаемое значение переменной, измеренное в момент времени  $t = t_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$ ;

$x_i^*$  — ненаблюдаемое значение;

$\varepsilon_i$  — случайная ненаблюдаемая ошибка измерения.

Будем предполагать, что объект, для которого решается задача структурной идентификации, принадлежит к классу объектов, допускающих возможность неоднократного наблюдения реализаций функционирования. Будем выбирать такие реализации  $A$  и  $B$ , которые начинаются с приблизительно одинаковых начальных условий  $\mathbf{x}^\top(A, 0) \mathbf{x}(A, 0) \approx \mathbf{x}^\top(B, 0) \mathbf{x}(B, 0)$ , имеют качественно одинаковый характер переходных процессов и заканчиваются близкими состояниями в конечные моменты времени. (В дальнейшем будем называть такой способ формирования обучающей и проверочной выборок «схемой квазиповторных наблюдений»). Для  $(n(B) \times 1)$ -вектора остатков на выборке  $B$  выполняется

$$\mathbf{u}(B | A, S) = \mathbf{y}(B) - \hat{\mathbf{y}}(B | A, S) = \mathbf{y}(B) - \mathbf{R}(B, S) \hat{\mathbf{d}}(A, S), \quad (5)$$

где  $\mathbf{y}(B)$  —  $(n(B) \times 1)$ -вектор наблюдений выходной переменной выборки  $B$ ;

$\hat{\mathbf{y}}(B | A, S)$  —  $(n(B) \times 1)$ -вектор выходов регрессионной модели на выборке  $B$ , рассчитанный по модели, оценки коэффициентов которой  $\hat{\mathbf{d}}(A, S)$  получены на обучающей выборке  $A$  для структуры  $S$ ;

$n(B)$  — объем проверочной выборки. Оценивание параметров авторегрессионных уравнений проводится на основе результатов, полученных в [1].

Определение. Случайная величина

$$ARD^*(S) = \mathbf{u}^\top(B | A, S) \mathbf{u}(B | A, S) \quad (6)$$

называется критерием регулярности для авторегрессионного уравнения (звездочка означает тот факт, что выборки  $A$  и  $B$  получены в условиях квазиповторных наблюдений).

Проведено исследование критерия регулярности (6) в зависимости состава регрессоров.

## Литература

1. Сарычев А.П. Идентификация параметров систем авторегрессионных уравнений со случайными коэффициентами при известных ковариационных матрицах / А.П. Сарычев // Междунар. науч.-техн. журнал "Проблемы управления и информатики". — 2013. — № 5. — С. 33 — 52.

УДК 681.5

**В.Ф. Губарев**, докт. техн. наук, проф., чл.-корр.  
НАН Украины, Инст. космич. Исслед. НАНУ-  
ДКАУ, v.f.gubarev@gmail.com

# СЛОЖНЫЕ СИСТЕМЫ. МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИДЕНТИФИКАЦИЯ

Розглянута проблема вибору класу моделей, за допомогою яких можна обґрунтовано описувати динамічні процеси у складних системах та вирішувати задачі їх ідентифікації. При ідентифікації шукаються апроксимуючі моделі, які узгоджені з похибками у даних.

*Ключові слова:* моделювання; ідентифікація; невизначеність; регуляризація; апроксимація.

Рассмотрена проблема выбора класса моделей, с помощью которого можно обосновано описывать динамические процессы в сложных системах и решать задачи их идентификации. При идентификации находятся аппроксимирующие модели, согласованные по точности с погрешностями в данных.

*Ключевые слова:* моделирование; идентификация; неопределенность; регуляризация; аппроксимация.

Problem of class model choice which allow to describe satisfactory the dynamic processes in complex systems and to solve identification tasks is considered. Approximate models consistent with errors in available data are found under identification.

*Keywords:* modeling; identification; uncertainty; regularization; approximation.

Под сложными понимаются системы, для которых невозможно построить математическую модель, описывающую протекающие в них процессы, на основе существующих теоретических знаний и фундаментальных законов. Примером таких систем являются процессы горения, нагрева и парообразования в энергоблоках ТЭС. Эти процессы сильно взаимосвязаны и настолько сложны, что получить модель, связывающую подачу топлива на входе с параметрами перегретого пара на выходе, можно только методами идентификации по экспериментальным данным. То же самое имеет место, например, для процессов, протекающих в реакторах, используемых в химических и пищевых технологиях.

В докладе при конечном числе входных воздействий и измерений, осуществляемых на исследуемом объекте, проведены системные исследования с обоснованием выбора классов моделей, единообразно и адекватно описывающих динамические процессы для сложных систем с сосредоточенными и распределенными параметрами.

Для линейных стационарных систем описание свелось к аппроксимирующей системе обыкновенных дифференциальных уравнений или их дискретному аналогу, которая при стремлении ее размерности к бесконечности дает модель сколь угодно близкую к точной. В нелинейном случае получено описание типа Винера-Хаммерштейна, которое вблизи устойчивых равновесных состояний дает модель, стремящуюся к точной при неограниченном увеличении ее размерности.

### Эквивалентность линейных моделей

Была поставлена задача построить преобразования, позволяющие перейти от дифференциальной формы представления модели к другим эквивалентным описаниям и установить связь между параметрами рассмотренных эквивалентных форм. Это позволяет идентификацию проводить для одной из форм, для которой представлены исходные данные, а затем получить экви-

валентную модель в любой другой форме удобной для ее дальнейшего использования. Кроме того, появляется возможность комбинировать различные методы и алгоритмы идентификации. Представление моделей в эквивалентных формах позволяет также проанализировать суть различных описаний одной и той же системы и их особенности. Например, непараметрические методы идентификации по сути дела не дают саму модель, а всего лишь позволяют перейти от одних исходных данных к другому их представлению.

На основе формулы Коши сделан переход от дифференциальной формы к вход-выходным соотношениям с теми же временными данными, а затем к модели в форме импульсной переходной матрицы. При этом, если исходные данные заданы дискретно, то получаем более обоснованные формы их разностной трактовки и связь с параметрами исходной дифференциальной формы. Были получены параметрически связанные аналоги моделей в формах регрессии, через передаточные матрицы и в операторной форме с использованием преобразования Лапласа. Рассматривались канонические формы реализаций, характеризующиеся минимальным набором параметров. В результате появилась возможность строить алгоритмы, в которых используются наиболее эффективные процедуры методов регуляризации, развитые для разных форм представления модели.

### Идентификация систем

Точное или близкое к нему описание сложных систем в рассматриваемых классах моделей соответствует бесконечной или конечной, но большим размерностям. Естественно, что при их идентификации на основе такого описания могут строиться только аппроксимирующие модели конечного порядка. При этом, начиная с некоторой размерности, задача идентификации по неточным данным становится некорректно поставленной. Даже при точных данных найдется такое  $n_{кр}$ , выше которого решение становится неустойчивым, т.е. чувствительным к вычислительным погрешностям. Неточности будут только уменьшать это  $n_{кр}$ . Если погрешности  $\xi$  в данных являются произвольными, но ограниченными условием  $\|\xi\| \leq \varepsilon$ , где  $\varepsilon$  — некоторая малая величина, а норма  $\|\cdot\|$  определяет особенность действующих шумов или возмущений, то  $n_{кр}$  является монотонной функцией от  $\varepsilon$ , т.е.  $n_{кр} = n_{кр}(\varepsilon)$  с предельным максимальным значением соответствующим точным данным. Причем существование  $n_{кр}$  не устраняется при стремлении длительности наблюдения до бесконечности.

### Подход к идентификации

Основу подхода составляют идеи и положения, которые использовались при разработке методов регуляризации некорректно поставленных задач. Размерность аппроксимирующей модели будем рассматривать в качестве параметра регуляризации. Здесь заметим, что начиная с малых значений  $n$ , чувствительность решения к погрешностям сначала растет достаточно слабо (задача корректна), а затем, начиная с некоторого  $n$  наблюдается более быстрый разброс получаемых решений при разных возмущениях.

Пусть известна величина  $\varepsilon$ , определяющая множество допустимых погрешностей при измерениях. Предполагаем также, что на входе возмущения отсутствуют. И пусть некоторая модель  $M$  такова, что она удовлетворяет условию

$$\|y - y^M\| \leq \varepsilon, \quad (1)$$

где  $y$  — измеренный отклик;

$y^M$  — реакция модели на то же входное воздействие.

Очевидно, что таких моделей множество. Среди них есть точная модель и те, которые соответствуют неустойчивым решениям, т.е. имеющие большой разброс по инвариантным параметрам. Как правило, это модели по размерности превышающие  $n_{кр}$ . Тогда любую устойчивую модель можно вполне рассматривать как аппроксимирующую, поскольку (1) не дает какого-либо преимущества одной из них. Отсюда вытекает и подход к решению задачи идентификации. Начинаем с класса моделей низкого порядка, например, второго или третьего. Находим из

решения вариационной задачи ту, которая минимизирует  $\|y - y^M\|$ . Если условие (1) для нее выполняется, то это и будет искомая модель, а если нет, то переходим к моделям более высокого порядка и проделываем для нее все то же самое. Повторяем это до тех пор, пока не выполнится (1). Найденная модель из этого класса и будет искомой. Согласно принципу невязки метода регуляризации такое решение будет устойчивым и стремится к точному при  $\varepsilon \rightarrow 0$ . Этот подход существенно усложняется, когда  $\varepsilon$  априори неизвестно. Однако в рамках данного доклада такие алгоритмы не рассматриваются.

UDC 681.5

V.N. Azarskov, D.Sc. in Eng, Chief of Department,  
National Aviation University,  
G.I. Rudiuk, Ph.D. in Eng., Chief Designer,  
O.Yu. Kurganskyi, Chief of Department,  
Antonov Company,  
K.Yu. Solovchuk, Ph.D. student, Int. Center of Inform. Techn. & Systems, solovchuk\_ok@mail.ru

## ADAPTIVE ROBUST CONTROL OF LINEAR MIMO STATIC PLANT WITH AN ARBITRARY TRANSFER MATRIX AND BOUNDED NOISE: A GENERALIZATION

Стаття стосується побудови адаптивного робастного регулятора для управління лінійним багатозв'язним статичним об'єктом з можливо виродженою передатною матрицею за наявності завад, межі яких априорі невідомі.

*Ключові слова:* робастний адаптивний регулятор; багатозв'язний статичний об'єкт; обмежена завада; вироджена передатна матриця; обмеженість.

Статья касается построения адаптивного робастного регулятора для управления линейным многосвязным статическим объектом с возможно вырожденной передаточной матрицей при наличии помех, границы которых априори неизвестны.

*Ключевые слова:* робастний адаптивний регулятор; многосвязный статический объект; ограниченная помеха; вырожденная передаточная матрица; ограниченность.

The paper deals with designing an adaptive robust controller for the control of linear interconnected static plants with possibly singular transfer matrices in the presence of noises whose bounds are a priori unknown.

*Keywords:* robust adaptive controller; interconnected static plant; bounded noise; singular transfer matrix, boundedness.

The problem of adaptive control in the presence of noise stated several decades ago [1] remain actual up to now. In particular, new important results in this research direction were achieved in [2, 3].

Adaptive control systems containing MIMO (multi-input multi-output) plants have been studied in [1, 3]. In these works, the basic assumption is that they are stably invertible; see [1, Assumption 6.3.M.(4)] and also [3, Subsect. 4.2]. Recently, such an assumption has been removed in [4, 5].

This paper extends and generalizes the approach advanced in [4, 5].

The plant to be controlled is assumed to be a static linear time-invariant interconnected square system [1] described by

$$y_n = Bu_n + v_n, \quad (1)$$

where  $y_n = [y_n^{(1)}, \dots, y_n^{(N)}]^T$  is the  $N$ -dimensional output vector to be measured at  $n$ th time instant;

$u_n = [u_n^{(1)}, \dots, u_n^{(N)}]^T$  is the  $N$ -dimensional control vector at  $n$ th time instant;

$v_n = [v_n^{(1)}, \dots, v_n^{(N)}]^T$  is the  $N$ -dimensional vector of noises at  $n$ th time instant;

$B$  is an arbitrary transfer  $N \times N$  matrix given as

$$B = \begin{pmatrix} b_{11} & \dots & b_{1N} \\ \dots & \dots & \dots \\ b_{N1} & \dots & b_{NN} \end{pmatrix}.$$

The matrix  $B$  may be singular, in principle, and it is essential. As in [2–5], it is assumed that there are finite intervals

$$\underline{b}_{ik} \leq b_{ik} \leq \bar{b}_{ik}, \quad i, k = 1, \dots, N \quad (2)$$

to which its elements,  $b_{ik}$  belong.

Similar to [3], we suppose that  $v_n^{(i)}$ s are all upper bounded in modulus according to

$$|v_n^{(i)}| \leq \varepsilon_i < \infty \quad \forall i = 1, \dots, N, \quad (3)$$

where  $\varepsilon_i$ s are unknown constants.

The problem is to design an adaptive robust controller to be able to stabilize the plant (1) at a neighborhood of the desired output vector  $y^0$  such that

$$\limsup_{n \rightarrow \infty} (\|y_n\| + r \|u_n\|), \quad r > 0. \quad (4)$$

Key idea advanced first in [4] is the transaction from the adaptive control of the true plant (1) having the singular transfer matrix  $B$  to the adaptive identification of a fictitious plant with the nonsingular transfer matrix  $\tilde{B}$  of the form

$$\tilde{B} = B + \delta_0 I, \quad (5)$$

where  $I$  denotes the identity matrix;

$\delta_0$  is a fixed quantity.

Within this approach, the fact that each eigenvalues of  $B$  lie in one of closed regions of the complex plane consisting of all the Gersgorin discs [4, 5] is utilized. This remarkable fact allows to go to the transfer matrix of  $\tilde{B}$  via the suitable shift of these discs. It turns out that they can be shifted left or right by exploiting the *a priori* information with respect to the bounds (2). More certainty, we are able to find some number  $\delta_0$  specifying the size of such a shift leading to (5).

Noting that the fictitious plant whose equation has the form

$$\tilde{y}_n = \tilde{B}u_n + v_n, \quad (6)$$

is subjected by the same noises  $v_n^{(i)}$  as the true plant (1), we observe that its output vector,  $\tilde{y}_n$  can be calculated as (due to (5), (6))

$$\tilde{y}_n = y_n + \delta_0 u_n.$$

Now, the adaptive control law is described by

$$u_{n+1} = u_n + \tilde{B}_n^{-1}(y^0 - \tilde{y}_n), \quad (7)$$

in which  $\tilde{B}_n$  is the current estimate of  $\tilde{B}$  in (6) updated by exploiting the same recursive procedure as in [4, 5]. (Before choosing (7) we previously exploited the fact that  $\tilde{B}$  which remains unknown in (6) is nonsingular, i.e.,  $\det \tilde{B} \neq 0$ .)

The main results consist in establishing the facts that the proposed adaptation algorithm converges at a finite time, and the control objective (4) is achieved.

## References

1. Goodwin G.C. Adaptive Filtering, Prediction and Control. NJ.: Prentice-Hall. / G.C. Goodwin, K.S. Sin — 1984. — 540 p.
2. Кунцевич В.М. Управление в условиях неопределенности: гарантированные результаты в задачах управления и идентификации / В.М. Кунцевич. — К.: Наук. думка, 2006. — 264 с.

3. Житецкий Л.С. Адаптивные системы управления с параметрическими и непараметрическими неопределенностями / Л.С. Житецкий, В.И. Скурихин. — К.: Наук. думка, 2010. — 301 с.
4. Azarskov V.N. Adaptive robust control of multivariable static plants with possibly singular transfer matrix / V.N. Azarskov, L.S. Zhiteckii, K.Yu. Solovchuk // Electronics and Control Systems. — 2013. — № 4. — pp. 47 — 53.
5. Азарсков В.Н. Идентификационный подход к задаче робастного управления многосвязными статическими объектами с нестохастическими неопределенностями / В.Н. Азарсков, Л.С. Житецкий, К.Ю. Соловчук // Тр. X Междунар. конф. «Идентификация систем и задачи управления» (SICPRO '15). — М.: ИПУ. — 2015. — С. 520 — 538.

УДК 681.03.7

Л.М. Любчик, д-р техн. наук, проф., Нац. техн.  
ун-т «ХПИ», lyubchik.leonid@gmail.com

## ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ДАННЫХ В ИНТЕРНЕТЕ НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Розглядаються задачі і методи інтелектуального аналізу клієнтських середовищ і даних про поведінку користувачів в Інтернеті. З використанням методів машинного навчання пропонуються алгоритми ідентифікації уподобань користувачів на основі координації статистичних та експертних оцінок.

*Ключові слова:* інтелектуальний аналіз даних; клієнтські середовища; координація оцінок; машинне навчання; уподобання користувачів.

Рассматриваются задачи и методы интеллектуального анализа клиентских сред и данных о поведении пользователей в Интернете. С использованием методов машинного обучения предлагаются алгоритмы идентификации предпочтений пользователей на основе координации статистических и экспертных оценок.

*Ключевые слова:* интеллектуальный анализ данных; клиентские среды; координация оценок; машинное обучение; предпочтения пользователей.

The problems and methods of customer environments and Web user behavior data mining are considered. Using the methods of machine learning user preferences identification algorithms is proposed based on coordination of statistics and expert estimates.

*Keywords:* data mining; client environment; coordination of assessments; machine learning; user preference.

В настоящее время эффективные методы извлечения знаний из Интернета базируются на научных принципах Web Mining, под которыми понимают методы интеллектуального анализа данных применительно к задачам обнаружения и извлечения информации из Web-документов, ресурсов и сервисов [1]. Методы Web Mining условно можно разделить на методы анализа и извлечения информации о контенте (Web Content Mining), извлечения информации о Web-структурах (Web Structure Mining), извлечения информации об использовании Web-ресурсов и предпочтениях пользователей (Web Users Mining).

Среди перечисленных особый интерес представляют методы Web Users Mining, направленные на анализ клиентских сред и обеспечивающие извлечение знаний о поведении посетителей Web-сайтов на основе получения и анализа информации о шаблонах и маршрутах передвижения пользователей и клиент-серверных транзакциях с целью выявления предпочтений пользователей. При этом используются данные о статистике посещения сайтов и формировании запросов, методы предварительной обработки и фильтрации данных, методы идентификации пользователей и транзакций.

Клиентская WEB-среда - это совокупность пользователей Интернета, регулярно пользующихся некоторым фиксированным набором сервисов (ресурсов, услуг). Эффективное извлече-

ние полезных знаний из сырых данных о поведении пользователей на основе использования технологий интеллектуального статистического анализа данных является основой для повышения качества WEB-сервисов [2].

В основе современных технологий анализа клиентских сред лежит понятие сходства. Пользователи являются схожими, если они пользуются схожими сервисами, сервисы схожи, если ими пользуются схожие множества клиентов, что формализуется с помощью взаимосогласованных функций сходства (метрик). Метрика на множестве пользователей позволяет решать задачи сегментации и кластеризации групп пользователей, построение моделей их предпочтений. Метрика на множестве сервисов позволяет структурировать и позиционировать сервисы, находить сопутствующие и взаимозаменяемые сервисы [2].

В этом классе задач особый интерес представляет собой задача ранжирования сайтов (PageRank), для решения которой используются методы анализа матриц гиперсвязей и нахождения собственных векторов эквивалентных стохастических матриц [3]. Рассмотрены рандомизированные алгоритмы ранжирования на основе телепортационной модели, распределенные рандомизированные алгоритмы вычисления PageRank, использующие методы агрегирования матриц гиперсвязей, алгоритмы, основанные на принципах мультиагентного консенсусного оценивания.

На первом этапе анализа клиентской среды строится частотная матрица (матрица кросстабуляции) на основе протоколов действий пользователей, в которой записываются частоты использования каждым пользователем каждого сервиса. Далее осуществляется построение метрик на множествах пользователей и сервисов, на основе которых строятся матрицы попарных расстояний между пользователями и между сервисами. Метрики выбираются в виде некоторых параметрических семейств функций, параметры которых оцениваются статистическими методами, например, методом максимального правдоподобия.

Следующий этап - вычисление профилей поведения пользователей, в результате которого каждому пользователю ставится в соответствие его индивидуальный поведенческий профиль - набор сервисов, которыми пользуется данный пользователь, а также схожие с ним. Модели профилей пользователей могут задаваться функциями вероятности того, что пользователь выберет конкретный сервис, а профили сервисов - вероятностями удовлетворения запросов пользователей [4]. В этой связи возникает задача идентификации предпочтений пользователей на основе анализа информации об их поведении в Web-пространстве. Сложность решения указанной задачи обусловлена отсутствием реальной и достоверной априорной информации о характере и структуре функции предпочтения пользователей, отсутствие возможности получения достаточно длинных обучающих выборок, поскольку поведение пользователей, обусловленное их предпочтениями, может изменяться во времени.

Эффективные методы решения задачи идентификации предпочтений пользователей могут быть получены на основе теории машинного обучения. Рассмотрено применение ядрового метода (kernel-based learning) для идентификации существенно нелинейных функций предпочтения пользователей. Алгоритмы идентификации получены на основе сочетания ядрового метода опорных векторов (kernel-based SVM) и метода координации статистических и априорных оценок предпочтений, полученных на основе экспертных оценок, опросов, анкетирования [5]. Решение представлено в виде линейной комбинации функций-ядер, параметры которой вычисляются с помощью достаточно простых вычислительных процедур решения регуляризованных систем линейных алгебраических уравнений.

Таким образом, применение и развитие современных математических методов моделирования сложных систем, принятия решений и машинного обучения является основой совершенствования алгоритмов и программных средств извлечения знаний из Интернета.

## Литература

1. Bing L. Web Data Mining: Exploring Hyperlinks, Contents, and Usage Data. Springer / L. Bing. — 2011. — 642 p.
2. Технология АКС — анализ клиентских сред. — ЗАО «Форексис». — 2005.
3. Ishii Y. The PageRank Problem, Multiagent Consensus and Web Aggregation / Y. Ishii, R. Tempo. // IEEE Control Systems Magazine. — Vol. 34. — No. 3. — 2014. — Pp. 34 — 53.



4. Воронцов К.В. Выявление и визуализация метрических структур на множествах пользователей и ресурсов Интернет/ К.В. Воронцов, К.В. Рудаков, В.А. Лексин, А.Н. Ефимов // Искусственный Интеллект. — Донецк, 2006. — № 2 — С. 285 — 288.
5. Lyubchyk L.M. Preference Function Reconstruction for Multiple Criteria Decision Making Based on Machine Learning Approach / L.M. Lyubchyk G.L. Grinberg. — In L.A. Zadeh et al. (eds), Recent Developments and New Directions in Soft Computing. Springer, Switzerland. — 2014. — pp. 53 — 63.

УДК 62.50:658.21

Т.М. Боровська, канд. техн. наук, доц., Вінницький нац. техн. ун-т, taisaborovska@gmail.com

## РІШЕННЯ ЗАДАЧ УПРАВЛІННЯ ВИРОБНИЧИМИ СИСТЕМАМИ НА БАЗІ АЛГЕБРИ ОПТИМАЛЬНОГО АГРЕГУВАННЯ

Розглядається комплекс задач оптимального управління та розвитку виробничих систем на базі алгебри оптимального агрегування, що дозволяє замінювати два елементи з нестрого монотонними функціями «витрати — випуск» і функціями зв'язків одним оптимальним еквівалентним елементом. Виконано аналіз і класифікацію бінарних операторів оптимального агрегування для типових структур. Доведена теорема про ізоморфне відображення ресурсної структури виробничої системи в структуру бінарного дерева оптимального агрегування. Подані постановки і рішення задач для інтегрованих систем «виробництво, розвиток», «виробництво, логістика», «виробництво, переробка відходів».

*Ключові слова:* моделювання; функція виробництва; оптимальне агрегування; бінарний оператор; розвиток.

Рассматривается комплекс задач оптимального управления и развития производственных систем на базе алгебры оптимального агрегирования, позволяющей заменять два элемента с нестрого монотонными функциями «затраты — выпуск» и функциями связей одним оптимальным эквивалентным элементом. Выполнен анализ и классификация бинарных операторов оптимального агрегирования для типовых структур. Доказана теорема об изоморфном отображении ресурсной структуры производственной системы в структуру бинарного дерева оптимального агрегирования. Приведены постановки и решения задач для интегрированных систем «производство, развитие», «производство, логистика», «производство с переработкой отходов».

*Ключевые слова:* моделирование; функция производства; оптимальное агрегирование; бинарный оператор; развитие.

We consider the complex problems of optimal control and development of production systems based on the algebra of optimal aggregation, allows you to replace with two elements nonstrictly monotone functions "input - output" and a communications functions equivalent optimal element. The analysis and classification of the binary operator of optimum aggregation for typical structures. A theorem on isomorphic mapping of the resource structure of the production system in the binary tree structure of optimal aggregation. Are given formulation and solution of problems for the integrated systems "production, development", "production, logistics", "production, recycling waste".

*Keywords:* modeling; the production function; optimal aggregation; binary operator; development.

**Постановка проблеми.** Сучасні розподілені виробничі системи (ВС) характеризуються великою кількістю динамічних зв'язків, динамічністю технологій, виробів і ефективності виробництва. Реальні функції виробництва (ФВ) можуть бути неопуклими, негладкими і розривними, що обумовлює складний характер цільових функцій, які можуть бути розривними і поліекстремальними. Класичні методи багатовимірної оптимізації вимагають існування безперервних похідних, лінійності, опуклості у функцій «витрати — випуск». Наявні математичні моделі для оптимізації розподілів навантажень і ресурсів не складають цілісної системи, є занадто спрощеними. Тому розробка цілісного комплексу ефективних моделей і методів, які могли б працювати з реальними функціями виробництва є актуальною.

**Мета дослідження** — розширення області застосування методології оптимального агрегування від виробничих систем до систем виробників. Задачі дослідження: — розробка операто-

рів оптимального агрегування для неоднорідних структур; - розробка методики оптимального агрегування систем виробників. Для вирішення проблеми обрана методологія оптимального агрегування виробничих систем [1].

**Алгебра оптимального агрегування** базується на уявленні елементів ВС як технологічних перетворювачів «ресурс — продукт» і моделей цих перетворень — узагальнених функцій виробництва (ФВ). Носії алгебри (операнди) — матриці, перші стовпці яких — значення ФВ, слідує стовпці - оптимальні розподіли ресурсу в попередніх агрегуваннях. Бінарні оператори оптимального агрегування для заданої пари ФВ:  $(fp1, fp2)$  і функції зв'язку  $fk$  повертають об'єкт того ж класу — «оптимальну еквівалентну функцію виробництва» (ОЕФВ)

$$Fop(Xs) = \max_{(x1, x2)} (J(y1, y2, fk)), Xs = x1 + x2, y1 = fp1(x1), y2 = fp2(x2) \quad (1)$$

де  $Xs$  — сумарний ресурс, виділений заданої парі виробничих елементів;

$x1, x2$  — входи виробничих елементів (ресурси, які виділені кожному елементу);

$y1, y2$  — виходи виробничих елементів;

$J(y1, y2, fk)$  — критеріальна функція — нестрого монотонна щодо  $y1, y2$  і визначена як функція користувача в програмній платформі.

Твердження: для пари елементів і для можливих ресурсних зв'язків між парою елементів  $(fp1, fp2, fk)$  можливо побудувати бінарний оператор оптимального агрегування, якщо задовольняються умови нестрогої монотонності для функцій.

У роботі наведено приклади бінарних операторів для неоднорідних структур: «виробництво, розвиток», «виробництво, логістика», «виробництво, переробка відходів». Розглянуто моделі ресурсних і параметричних зв'язків. Обмеження методу: нестрога монотонність функцій  $y1, y2, fk$ . Наведено властивості бінарних операторів оптимального агрегування. Доведено теорему щодо асоціативності, що дозволяє замінити багатовимірну оптимізацію системою одновимірних задач оптимізації. Назвемо довільною допустимою структурою ВС таку, що містить тільки зв'язки, для яких визначені і програмно реалізовані оператори оптимального агрегування.

**Агрегування виробничих систем.** Теорема: для довільної допустимої структури ВС завжди може бути побудовано ізоморфне відображення структури ВС в структуру бінарного дерева оптимального агрегування. У програмній платформі бінарне дерево є формулою рішення оптимізаційної задачі. Доказ теореми базується на асоціативності операторів. Розглянуто обчислювальні аспекти. Результат кожної операції оптимального агрегування — функція, а не точкове рішення. Однак, операції обчислення ОЕФВ виконуються в режимі векторизації. Обсяг обчислень зростає приблизно лінійно щодо розмірності задачі оптимізації. Наявність ОЕФВ для всіх підсистем ВС вирішує задачу отримання міжрівневих функцій чутливості, і дозволяє реалізувати цілісну оптимальну адаптивну систему управління ВС.

**Агрегування систем виробників.** Сьогодні в системах виробників деякого сегмента, крім конкуренції існують: локалізація виробництва, спільне виробництво, кооперація, заміщення імпорту та експорту. Стратегічна мета регіонів — створення і збереження ефективних робочих місць. Запропоновано нову постановку та вирішення задач оптимального управління для такого класу систем. Модель забезпечення потреби в деякому продукті формується як паралельна структура з моделей реальних чи віртуальних виробництв: «імпорт», локалізоване, спільне, власне виробництво. Виконується оптимальне агрегування кожної альтернативи, потім — оптимальне агрегування субоптимізованих альтернатив. Наведено конкретні приклади.

**Висновки.** Виконано розширення методології оптимального агрегування за рахунок розробки операторів оптимального агрегування для структур «виробництво, розвиток», «виробництво, переробка відходів», «виробництво, логістика». Поставлена і вирішена задача оптимального агрегування систем виробництв. Розглянуто приклади: екологізованих агровиробництв, системи виробників комплектуючих.

## Література

1. Боровська, Т.Н. Оптимальне агрегування виробничих систем з параметричними зв'язками / Т.Н. Боровська // Східно-Європейський журнал передових технологій. — 2014. — Т. 4, № 11(70). — С. 9 — 19. DOI: 10.15587/1729-4061.2014.26306.

УДК 519.7

И.М. Скринник, аспирант,  
Д.В. Дмитришин, д-р техн. наук, проф.,  
Одес. нац. политехн. ун-т

## СТАБИЛИЗАЦИЯ ОРБИТ НЕПРЕРЫВНЫХ ОТОБРАЖЕНИЙ С ХАОТИЧЕСКОЙ ДИНАМИКОЙ

Розглянута дискретна система з хаотичною динамікою. Запропонований метод подавлення хаосу шляхом локальної стабілізації  $T$ -циклу. Вивчено випадок, коли мультиплікатори циклу знаходяться в об'єднанні лівої напівплощини та одиничного кола.

*Ключові слова:* нелінійні дискретні системи; оптимальне управління хаосом

Рассмотрена дискретная система с хаотической динамикой. Предложен метод подавления хаоса путем локальной стабилизации  $T$ -цикла. Изучен случай, когда мультипликаторы цикла лежат в объединении левой полуплоскости и единичного круга.

*Ключевые слова:* нелинейные дискретные системы; оптимальное управление хаосом

A discrete system with chaotic behavior is considered. A method of chaos suppression by local stabilizing of  $T$ -cycles of the system is suggested. The case of multipliers in the left half plane or in the unit disc of the complex plane is studied.

*Keywords:* non-linear discrete systems; optimal control of chaos

Проблема оптимального воздействия на хаотический режим является одной из фундаментальных в нелинейной динамике [1]. Для ее решения были предложены различные схемы (например, [2]), одна из которых связана со специальным представлением запаздывающей обратной связи (DFC) [3], которая позволяет локально стабилизировать положение равновесия или цикл, вообще говоря, не известные наперед. При этом оказывается, что построенное управление не только локально стабилизирует цикл, но и регуляризирует всю динамику системы.

Пусть система

$$x_{n+1} = f(x_n), f: A \rightarrow A, A \in R^m, \quad (1)$$

имеет неустойчивый  $T$ -цикл  $(\eta_1, \dots, \eta_T)$ . Мультипликаторы цикла  $\mu_1, \dots, \mu_m$  являются нулями

характеристического уравнения  $\det\left(\mu E - \prod_{j=1}^T f'(\eta_j)\right) = 0$ . Предположим, что эти мультиплика-

торы известны лишь в оценочном плане, т.е. известна область их локализации на комплексной плоскости:  $M \subset C$ . В частности, такая ситуация может быть, если сам цикл наперед не известен.

Система (1), замкнутая управлением

$$u_n = -\sum_{j=1}^{N-1} \varepsilon_j (f(x_{n-jT+T}) - f(x_{n-jT})), |\varepsilon_j| < 1, j = 1, \dots, N-1, \quad (2)$$

может быть записана в виде

$$x_{n+1} = \sum_{k=1}^N a_k f(x_{n-kT+T}), \sum_{k=1}^N a_k = 1, \quad (3)$$

где между  $\varepsilon_j$  и  $a_k$  установлена биекция  $\varepsilon_j = \sum_{k=j+1}^N a_k, j = 1, \dots, N-1$ .

Отметим, что  $T$ -циклы систем (1) и (3) совпадают. Характеристическое уравнение линеаризованной в окрестности цикла системы (3) имеет вид

$$\prod_{j=1}^m \left( \lambda^{1+T(N-1)} - \mu_j \left( \sum_{k=1}^N a_k \lambda^{N-k} \right)^T \right) = 0, \{\mu_1, \dots, \mu_m\} \in M.$$

Требуется выбрать коэффициенты усиления  $\varepsilon_j$  в управлении (2) так, чтобы:

А)  $T$ -цикл в системе (3) был бы локально устойчив;

Б) величина предыстории  $T(N-1)$  в управлении (2) была бы минимальной.

Для случая  $M = (-\eta^*, 1)$  задача оптимальной локальной стабилизации  $T$ -цикла решена в [4], [5].

В докладе представлено решение этой задачи для случая

$$M = \{z \in C : |z + \eta^*| < \eta^*\} \cup \{z \in C : |z| < 1\}.$$

Для решения поставленной задачи использовались методы геометрической теории функции комплексной переменной. Определялись свойства множества исключительных значений

полиномиального отображения единичного круга:  $F: \Delta \rightarrow C, F(z) = z \left( \sum_{j=1}^N a_j z^{j-1} \right)^T$ . Эти свой-

ства позволили найти минимальное значение  $N$  в зависимости от  $\eta^*$ , и оптимальные коэффициенты  $a_1, \dots, a_N$ .

### Литература

1. Ott E. Controlling chaos / E. Ott, C. Grebodgi, J.A. Yorke // Phys. Rev. Lett. 1990. — № 64. — pp. 1196 — 1199.
2. Polyak B.T. Stabilizing chaos with predictive control / B.T. Polyak // Automation and Remote Control. 2005. — № 66(11). — pp. 1791 — 1804.
3. Pyragas K. Continuous control of chaos by self controlling feedback / K. Pyragas // Phys. Rev. Lett. A. 1992. — № 170, —pp. 421–428.
4. Dmitrishin D. Methods of harmonic analysis in nonlinear dynamics / D. Dmitrishin, A. Khamitova // Comptes Rendus Mathematique. 2013. — Volume 351. — Issues 9-10. — pp. 367 — 370.
5. Dmitrishin D. Fejer polynomials and chaos / D. Dmitrishin, A. Khamitova, A. Stokolos // Springer Proceedings in Mathematics and Statistics. 2014. — Volume 108, — pp. 49 — 75.

УДК 519.2+539.1

**А.С. Мазманишвили**, д-р физ.-мат. наук, проф.,  
ННЦ Харьков. физико-технический ин-т,  
**А.Ю. Сидоренко**, канд. техн. наук, доц., Нац.  
техн. ун-т «ХПИ»

## ПОВЫШЕНИЕ ПОРЯДКА СТАЦИОНАРНОГО СТОХАСТИЧЕСКОГО МАРКОВСКОГО ПОЛЯ

Алгоритмы генерации случайного двумерного объекта на плоскости используются при моделировании движения транспортных средств и при рассмотрении других задач, при решении которых требуется применить марковские нормальные поля второго порядка, любые ортогональные сечения которого являются стационарными случайными процессами Орнштейна-Уленбека. Показано, что предложенный подход позволяет синтезировать марковские случайные поля второго порядка или более высокого порядка.

*Ключевые слова:* случайный процесс, марковские поля, двумерный объект, процесс Орнштейна-Уленбека, генерация случайных полей.

The algorithms for generating random two-dimensional object on the plane are used for modeling the movement of vehicles and consideration of other problems, the solution of which Markov random field of the second order. Algorithm is synthesized for constructing two-dimensional real normal Markov field of the second order any orthogonal cross-sections of which are stationary stochastic Ornstein-Uhlenbeck process. It is shown that the proposed approach allows the synthesis of Markov random fields of higher order.

*Keywords:* random process, Markov field, two-dimensional object, Ornstein-Uhlenbeck process, generating of random fields inventory control; constrained linear control; invariant ellipsoid; bilinear matrix inequality.

При стохастическом моделировании для вычислительной задачи необходим синтез алгоритмов генерации случайных величин с необходимыми свойствами. Зачастую задачи сводятся к генерации не одномерных случайных величин, а двумерных случайных полей, а также полей еще более высокой размерности. Так, алгоритмы генерации случайного двумерного объекта на плоскости используются при моделировании движения транспортных средств и при рассмотрении других задач, при решении которых требуется применить марковские нормальные случайные поля второго порядка.

Алгоритмы генерации двумерных марковских полей приспособлены для построения полей лишь нулевого или первого порядка. Между тем, в задачах машиностроения, технической электродинамики, навигации и других случайные поля должны характеризоваться, по крайней мере, вторым порядком. Это обусловлено, прежде всего, необходимостью их применения при моделировании динамических задач, в которых рассматриваются дифференциальные уравнения второго порядка или более высокого порядка.

В данной работе синтезирована последовательность вложенных алгоритмов генерации случайного объекта — нормального марковского поля второго порядка, любые ортогональные сечения которого являются стационарными случайными процессами Орнштейна-Уленбека (ОУ-процесс).

Целью данной работы является построение и реализация алгоритма повышения порядка нормального марковского поля, любые ортогональные одномерные сечения которого являются стационарными случайными ОУ-процессами.

В работе описан алгоритм повышения порядка случайного объекта – нормального марковского поля, любые ортогональные сечения которого являются стационарными случайными ОУ-процессами.

В теории стохастических марковских процессов и полей известно уравнение Ланжевена первого порядка [1, 2]. Решением этого уравнения является дифференцированная функция. Это означает, что функция имеет порядок на единицу выше, чем порождающий процесс «белого» шума. Основным свойством нормального марковского поля является его корреляционный функционал с парциальными корреляторами. Обобщением известных конструкций — переходных вероятностей для нормального марковского ОУ-процесса может быть переходная плотность распределения вероятностей для амплитуды НМД-поля

Таким образом, если поле нулевого порядка является заданным вместе с граничными условиями, то при заданной очередной паре парциальных декрементов затухания  $\nu$  и  $\mu$  поля вдоль осей  $x$  и  $y$  можно определить поле первого порядка. Также можно убедиться, что марковское свойство для поля первого порядка имеет место вдоль граничных осей  $x$  и  $y$ , а также на плоскости  $xOy$ .

Рекуррентный алгоритм значений НМД-поля с помощью приведенной в [3, 4] техники удобно представить следующими 5 шагами:

1. Генерация значения в вершине.
2. Генерация значений ОУ-процесса вдоль  $x$ -границы.
3. Генерация значений ОУ-процесса вдоль  $y$ -границы.
4. Последовательное (слева-направо и послойно) заполнение значениями внутренних узлов прямоугольника.
5. Получение сгенерированных значений.

Аналогичные утверждения могут быть сформулированы для полей, которые генерируются в объеме и в пространстве высшей размерности.

В работе построены примеры генерации двумерного поля «белого» шума и связанные с ним примеры генерации поля первого порядка и поля второго порядка на выбранной декартовой сетке с шагами  $\Delta_x$  и  $\Delta_y$  (то есть при количестве шагов, которые отвечают заданным размерам прямоугольника) между узлами вдоль осей  $x$  и  $y$  для заданных размеров. Отмечено, что при выбранных значениях  $\Delta_x$  и  $\Delta_y$  интенсивность в числовом алгоритме необходимо нормировать таким образом, чтобы энергия НМД-поля, приходящаяся на единицу плоскости, совпадала с заданной при любом количестве шагов.

Построены нормальные марковские поля нулевого, первого и второго порядка, реализованные на плоской поверхности двух переменных. Показано, что уменьшение значений парциальных декрементов  $\nu$ ,  $\mu$  приводит к сглаживанию формы сгенерированного поля.

## Литература

1. Кельберт М.Я., Сухов Ю.М. Вероятность и статистика в примерах и задачах. Т. II: Марковские цепи как отправная точка теории случайных процессов и их приложения / М.Я. Кельберт, Ю.М. Сухов. — М.: МЦНМО, 2009. — 295 с.
2. Мазманишвили А.С. Алгоритм генерации нормального марковского поля на поверхности идеального цилиндра / А.С. Мазманишвили // Электронное моделирование. — 2000. — Т. 20. — № 6. — С. 65 — 69.
3. Мазманишвили А.С. Повышение порядка двумерных нормальных марковских полей / А.С. Мазманишвили, А.Ю. Сидоренко // Вісник НТУ «ХПІ». — Харків: НТУ «ХПІ». — 2013. — № 3 (977). — С. 110 — 120.

УДК 620:519.876.5:004

И.И. Марченко, магистр, Нац. техн. ун-т «ХПИ»

## ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ МЕТОД ИДЕНТИФИКАЦИИ ПОВЕРХНОСТНОЙ АТОМАРНОЙ СТРУКТУРЫ ДЛЯ АНАЛИЗА РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Пропонується метод обробки даних, отриманих в результаті моделювання процесів формування тонких плівок на атомарному рівні, для знаходження поверхневих частинок матеріалу. Даний метод був протестований для ряду типових прикладів і показав коректні результати. Результати роботи запропонованого методу можуть бути використані для знаходження щільності матеріалу, шорсткості, мікронапруг та ін.

*Ключові слова:* математичне моделювання, молекулярна динаміка, обчислювальний алгоритм.

Предлагается метод обработки данных, полученных в результате моделирования процессов формирования тонких пленок на атомарном уровне, для нахождения поверхностных атомов материала. Данный метод был протестирован для ряда типичных примеров и показал корректные результаты. Результаты работы предложенного метода могут быть использованы для нахождения плотности, шероховатости, микронапряжений и пр.

*Ключевые слова:* математическое моделирование, молекулярная динамика, вычислительный алгоритм.

We propose a method of processing data obtained computer simulation of the formation of thin films on atomic level for identification of the surface particles of material. The value of the electron density around each atom can be used as a criterion of atom affiliation to the surface of the material. As a result, the problem of finding the surface atoms is reduced to the processing of three-dimensional array. Value of each element is the electron density in the geometric point corresponding to the geometric center of the array element. This method has been tested for several typical examples and showed the correct results. The results of the proposed method can be used to find the density, roughness, microstrain, etc.

*Keywords:* mathematical modeling, molecular dynamics, calculation algorithm.

В настоящее время для исследования эффектов, происходящих при осаждении наноразмерных пленок, широкое распространение получил метод молекулярной динамики (МД). Результатом работы МД является в заданные моменты времени координаты всех атомов моделируемого образца [1]. Однако для получения макроскопических характеристик материала, таких, как плотность, шероховатость, величина удельной поверхности и пр. необходимо определить атомы, формирующую поверхность материала. В случае, когда материал имеет сложную дефектную структуру, задача нахождения таких частиц становится нетривиальной. Поэтому целью данной работы было разработка методов компьютерного анализа структуры поверхностных слоев.

Входными данными предложенного в данной работе метода являются координаты частиц  $\mathbf{x}^{(i)}$  ( $i = 1..N$  — порядковый номер частицы,  $N$  — количество частиц в моделируемом образце) и линейные размеры расчетной ячейки  $(x_s, y_s, z_s)$ .

В настоящей работе в качестве критерия принадлежности атома поверхности предложено использовать значение электронной плотности вокруг данной частицы. Для ее нахождения предложено осуществить переход от непрерывного пространства к дискретному. То есть расчетная ячейка разбивается на  $k$  блоков, каждый из которых имеет линейные размеры  $(cell_x, cell_y, cell_z)$ . В качестве структуры данных для организации блоков используется 3-хмерный массив  $D_{i,j,k}$ , где  $i, j, k$  — индексы в данном массиве,  $i \in [0, x_s / cell_x]$ ,  $j \in [0, y_s / cell_y]$ ,  $k \in [0, z_s / cell_z]$ . Характеристикой ячейки  $D_{i,j,k}$  выступает значение электронной плотности  $\rho$ , которая приходится на геометрические координаты данной ячейки (массив  $D$  будем в дальнейшем называть картой электронной плотности). Для нахождения значения ячейки  $D_{i,j,k}$  карты электронной плотности используется формула:

$$D_{i,j,k} = \sum_{n=1}^N \psi^{(n)}(|\mathbf{x}^{(n)} - \text{coord}(i,j,k)|)$$

где  $\psi^{(n)}(r)$  — функция электронной плотности для частицы  $n$ ,  
 $r$  — расстояние между рассматриваемой ячейкой и  $n$ -ым атомом материала,  
 $\text{coord}(i,j,k)$  — вещественные координаты расчетной ячейки  $D_{i,j,k}$ .

Точное значение электронной плотности  $\psi^{(n)}(r)$  может быть получено из квантовомеханических расчетов, однако для увеличения эффективности работы метода электронная плотность вокруг атома аппроксимируется Гауссианом

$$\psi^{(n)}(r) = \exp(-\beta r^2)$$

где  $\beta$  — константа, выбираемая таким образом, чтобы плотность существенно уменьшалась и была близко к нулю на расстоянии превышающем  $\alpha$  — постоянную кристаллической решетки.

Анализируя карту электронной плотности  $D$  можно выделить ячейки, в которых значения суммарной электронной плотности меньше определенного значения электронной плотности  $\psi_p$ .

Путем численного анализа карты электронной плотности  $D$  формируется массив признаков точек пространства: пустые, заполненные, принадлежащие внутренней или внешней поверхности. В дальнейшем, основываясь на массиве признаков, происходит отбор атомов, принадлежащих объему, внутренней или внешней поверхности наноструктуры.

В работе показано, что предложенный метод позволяет находить поверхностные атомы тонких пленок даже в случае сильно искаженной наноструктуры с многосвязной поверхностью. С его помощью можно получить список  $s$  поверхностных атомов с координатами  $(x_s^{(k)}, y_s^{(k)}, z_s^{(k)})$ ,  $k = 1..K$ .

Применение разработанного алгоритма к результатам моделирования методами молекулярной динамики позволяет получать такие макрохарактеристики, как шероховатость, микронапряжения и пр.

### Литература

1. Куденко А.С. Компьютерная модель процесса низкотемпературного осаждения металлических пленок из атомно-ионных потоков / А.С. Куденко, И.И. Марченко // Вестник Нац. техн. ун-та «ХПИ»: сб. науч. тр. темат. вып.: Системный анализ, управление и информационные технологии. — Харьков: НТУ «ХПИ». — 2013. — № 3 (977). — С. 153 — 158.



## Секція 3

# АВТОМАТИЧНЕ КЕРУВАННЯ В ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМАХ

УДК 621.3.01

Б.И. Кузнецов, д-р техн. наук, проф.,  
В.В. Хоменко, аспирант,  
Нац. техн. ун-т «ХПИ», bikuznetsov@mail.ru

## СТОХАСТИЧЕСКАЯ МУЛЬТИАГЕНТНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ АНИЗОТРОПИЙНЫХ РЕГУЛЯТОРОВ КОМБИНИРОВАННЫХ СИСТЕМ РОБАСТНОГО УПРАВЛЕНИЯ

На основі руху роя частинок розроблений метод стохастичної мультиагентної оптимізації параметрів анізотропійних регуляторів багатомасових електромеханічних систем комбінованого робастного керування, що дозволяє підвищити точність роботи систем в різних режимах.

*Ключові слова:* багатомасова електромеханічна система; комбіноване робастне керування; анізотропійний регулятор; стохастична мультиагентна оптимізація.

На основе движения роя частиц разработан метод стохастической мультиагентной оптимизации параметров анизотропийных регуляторов многомассовых электромеханических систем комбинированного робастного управления, позволяющий повысить точность работы систем в различных режимах.

*Ключевые слова:* многомассовая электромеханическая система; комбинированное робастное управление; анизотропийный регулятор; стохастическая мультиагентная оптимизация.

Based particle swarm motion developed stochastic multi-agent optimizing method for parameters of anisotropic regulators multimass electromechanical systems feed forward robust control, which allows to increase the accuracy of the systems in different modes.

*Key words:* multimass electromechanical system; feed forward robust control; anisotropic regulator; stochastic multi-agent optimization.

**Введение.** Создание систем, способных обеспечивать высокую точность управления при интенсивных задающих и возмущающих воздействиях широкого спектра частот является центральной проблемой современной теории и практики автоматического управления.

**Анализ последних достижений и публикаций.** Комбинированные системы управления [1], у которых сочетается принцип управления по разомкнутому и замкнутому контуру, позволяют повысить точность управления по сравнению с замкнутыми системами. В работах [2, 3] рассмотрены вопросы синтеза комбинированных систем на основе робастного управления. Одним из интенсивно развивающихся подходов к синтезу робастных систем управления является синтез регуляторов, минимизирующих анизотропийную норму вектора цели управления [4] К системам управления обычно предъявляются весьма разнообразные и часто противоречивые требования при работе системы в различных режимах и при различных внешних воздействиях: ступенчатых, линейно-изменяющихся, гармонических, случайных и т.д. В работе [5] рассмотрены вопросы многокритериального синтеза динамических систем, удовлетворяющих техническим требованиям, предъявляемым к системам в различных режимах работы. Обычно, сформулированная в ходе сворачивания локальных критериев с помощью нелинейной схемы компо-

миссов задача нелинейного программирования является многоэкстремальной, для решения которой необходимо использовать специальные алгоритмы [6].

**Цель работы.** Целью данной работы является разработка на основе алгоритма движения роя частиц метода стохастической мультиагентной оптимизации параметров анизотропийных регуляторов многомассовых электромеханических систем комбинированного робастного управления для повышения точности работы систем в различных режимах.

**Метод решения.** При решении задач многокритериального синтеза анизотропийных регуляторов [4] многомассовых электромеханических систем было установлено, что целевая функция исходной задачи нелинейного программирования, полученная в результате сворачивания локальных критериев и ограничений с помощью такой нелинейной схемы компромиссов [5], является многоэкстремальной, в которой имеются многомерные овраги и области, в окрестности которых значение целевой функции меняется очень медленно. Вычисление целевой функции носит алгоритмический характер, включающий многократное решение алгебраических уравнений Риккати, уравнений Ляпунова и вычислений выражений специального вида для определения уровня анизотропии входного сигнала, что само по себе требует значительных вычислительных ресурсов. Аналитическое нахождение производных таких целевых функции принципиально невозможно, а их численное определение связано со значительными затратами машинного времени.

Применение бионических алгоритмов для решения многоэкстремальных задач математического программирования, в которых целевые функции являются многоэкстремальными овражными функциями и функциями с участками типа «плато», показало их высокую эффективность нахождения глобального оптимума таких целевых функций. Среди большого разнообразия бионических алгоритмов в работе использованы стохастические мультиагентные методы оптимизации роем частиц [6], в которых частицы роя перемещаются в многомерном пространстве поиска. При своем движении частицы пытаются улучшить найденное ими ранее решение и обмениваются информацией со своими соседями, что позволяет находить глобальный оптимум за меньшее количество итераций. Количество вычислений целевой функции сведено к минимуму, что обеспечивает высокую скорость сходимости оптимизационного алгоритма. Эти методы практически нечувствительны к близости множества начальных точек поиска к искомому решению и позволяют достаточно просто учитывать разнообразные ограничения при нахождении глобального оптимума, а также позволяют решать исходные многокритериальные задачи оптимизации непосредственно нахождением Парето-оптимального решения [7].

**Выводы.** На основе стохастической мультиагентной оптимизации роем частиц разработан метод решения многоэкстремальной задачи нелинейного программирования с ограничениями, к которой с помощью нелинейной схемы компромиссов сводится многокритериальный синтез анизотропийных регуляторов многомассовых электромеханических систем, что позволяет существенно сократить время решения задачи и удовлетворить разнообразным требованиям, которые предъявляются к работе многомассовых электромеханических систем в различных режимах. Показано, что применение синтезированных анизотропийных регуляторов позволило повысить точность системы в различных режимах работы и снизить чувствительность системы к изменению параметров объекта управления по сравнению с системой с типовыми регуляторами.

### Литература

1. Кунцевич В.М. Инвариантность и квазиинвариантность систем управления / В.М. Кунцевич // Пр. міжнар. конф. «50 років інституту кібернетики імені В.М. Глушкова НАН України». — Київ: інститут кібернетики НАН України. — 2008. — С. 61 — 74.
2. Кунцевич В.М. Квазиинвариантность, робастність і адаптація в системах управління / В.М. Кунцевич // Тр. науч. семинара «70 лет теории инвариантности». Москва, 2 июня 2008 г. — М.: ЛКИ, 2008. — С. 61 — 90.
3. Gu D.-W. Robust Control Design with MATLAB / D.-W. Gu, P.Hr. Petkov, M.M. Konstantinov. — Springer, 2005. — 389 p.

4. Diamond P. Anisotropy – based performance analysis of linear discrete time invariant control systems / P. Diamond, I.G. Vladimirov, A.P. Kurdjukov, A.V. Semyonov // Int. J. Control. — 2001. — V. 74. — Pp. 28 — 42.
5. Воронин А.Н. Многокритериальный синтез динамических систем / А.Н. Воронин. — К.: Наук. думка, 1992. — 160 с.
6. Clerc. M. Particle Swarm Optimization / M. Clerc. — London: ISTE Ltd, 2006. — 244 p.
7. Gazi V. Swarm Stability and Optimization / V. Gazi, K.M. Passino. — Springer, 2011. — 318 p.

УДК 621.193.224:681.536.5

**В.І. Іванов**, наук. співробітник, ЗДІА,  
colourmet@zgia.zp.ua

## **УДОСКОНАЛЕННЯ САР ТЕПЛООВОГО РЕЖИМУ РЕКУПЕРАТИВНИХ НАГРІВАЛЬНИХ КОЛОДЯЗІВ З ОПАЛЮВАННЯМ ІЗ ЦЕНТРУ ПОДУ**

Виконано аналіз автоматичних систем регулювання теплового режиму рекуперативних нагрівальних колодязів з опалюванням із центру поду. Запропоновано раціональну схему зазначеної системи, реалізація якої дозволяє забезпечити необхідну якість спалювання палива протягом усього процесу нагрівання злитків у колодязях даного типу.

*Ключові слова:* рекуперативний колодязь; опалювання з центру поду; якість спалювання палива; регулювання.

Выполнен анализ автоматических систем регулирования теплового режима рекуперативных нагревательных колодцев с отоплением из центра пода. Предложена рациональная схема указанной системы, реализация которой позволяет обеспечить необходимое качество сжигания топлива в процессе нагревания слитков в колодцах данного типа.

*Ключевые слова:* рекуперативный колодец; отопление из центра пода; качество сжигания топлива; регулирование.

There is executed the analysis of the automatic control systems for the thermal regime of recuperative soakers with heating from the center of bottom. The rational chart of the stated system realization of which allows to provide necessary quality of fuel combustion at heating of bars in the soakers of this type is offered.

*Keywords:* recuperative soaker; heating from the center of bottom; quality of combustion of fuel; control.

Рекуперативні нагрівальні колодязі з опалюванням із центру поду застосовують для нагрівання злитків перед прокаткою на станах слябінг і блюмінг. Управління зазначеним процесом здійснюють за допомогою локальних систем автоматичного регулювання (САР) температури та співвідношення «паливо-повітря», регулюючими діями, яких слугують відповідно змінювання витрати палива та повітря.

Одним з основних недоліків колодязів зазначеного типу є наявність неконтрольованих втрат повітря із керамічних рекуператорів у бік відведення продуктів горіння. Значення втрат повітря, що подають до керамічних рекуператорів, на початку кампанії колодязя, становить 30 %, а через рік його експлуатації — сягає 50...60 %. Як наслідок, відбувається поступове зниження максимальної теплової потужності колодязя, що призводить до підвищення питомої витрати палива на нагрівання злитків.

Положення посилюється і тим, що якість спалювання палива регулюють з використанням типової САР співвідношення «паливо-повітря», де ведучою величиною є витрата палива, яка не в змозі її забезпечити. Так, за роботи зазначеної САР використовують теоретичні дані про витрату повітря, яке подають на вхід рекуператора; проте його кількість, що фактично надходить до пальника, є невідомою через втрати у рекуператорі.

Для підвищення якості спалювання палива здійснюють корегування співвідношення «паливо-повітря» за вмістом кисню у продуктах горіння, що відходять. У такому разі витрату повітря, що прямує до пальника, визначають як поточною витратою палива, так і заданим вмістом кисню у продуктах горіння, що відходять [1]. Проте така система в змозі забезпечити якісне

спалювання палива тільки, коли кількість повітря, що поступає до пальника, є достатньою для його повного спалювання.

В роботі [2] для регулювання теплового режиму зазначених рекуперативних нагрівальних колодязів додатково до типових САР додавали САР якості спалювання палива за вмістом кисню у продуктах горіння, які відбирають з-під наднасадкового простору рекуператора. Недоліком такої схеми регулювання теплового режиму зазначених колодязів є наявність додаткової САР вмісту кисню у продуктах горіння, що відходять, а також розміщення додаткового регулюючого органу на трубопроводі підведення палива.

Авторами запропоновано САР теплового режиму нагрівальних колодязів зазначеного типу (див. рисунок), до складу якої входять САР температури, а замість САР співвідношення «паливо-повітря» — САР вмісту кисню у продуктах горіння, що відходять. На відміну від типової САР температури, де регулюючою дією є змінювання витрати палива, для пропонованої САР регулюючою дією служить змінювання витрати повітря, а для САР вмісту кисню у продуктах горіння, що відходять, — змінювання витрати палива.

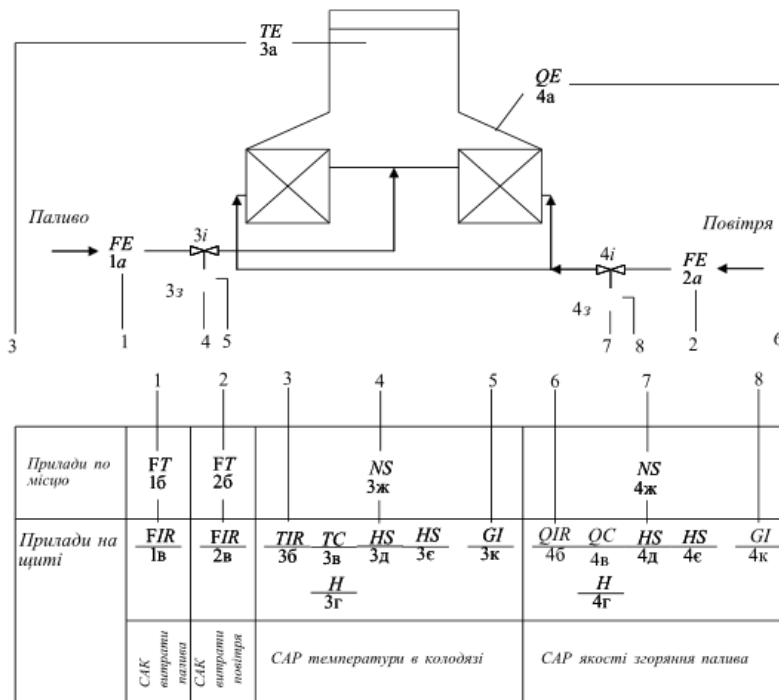


Рис.1. Спрощена схема теплового режиму колодязя

Після завантаження злитків до робочого простору колодязя САР температури забезпечує максимальну міру відкриття регулюючого органу на трубопроводі підведення повітря, тобто здійснює стабілізацію максимально можливої кількості повітря, що поступає до пальника.

В свою чергу, САР вмісту кисню у продуктах горіння, що відходять, діючи на регулюючий орган на трубопроводі підведення палива, змінює його витрату, що поступає до пальника, забезпечуючи у продуктах горіння заданий вміст кисню. По досягненні у робочому просторі нагрівального колодязя заданого рівня температури здійснюють перехід на стабілізацію її значення відповідним пониженням витрати як палива, так і повітря за дотриманням заданого вмісту кисню у продуктах горіння, що відходять.

### Література

1. Повышение эффективности горения топлива при непрерывном контроле содержания кислорода в дымовых газах / Я. Обозан, И.И. Просветов, И.Б. Затопляева, В.А. Ткаченко // *Металлургиче-*

- ская теплотехника: сб. научн. трудов НМетАУ. — Днепропетровск: Пороги, 2005. — Т. 2. — С. 420 — 425.
2. Управление качеством сжигания топлива в рекуперативных нагревательных колодцах с отоплением из центра пода / Ю.Н. Радченко, В.Ф. Сапов, В.И. Шибакровский, В.И. Иванов // Металлургическая теплотехника: сб. научн. тр. НМетАУ. — Днепропетровск: Новая идеология, 2008. — С. 242 — 246.

УДК 669.162.263

**Б.П. Довгалюк**, д-р техн. наук, проф.  
**Р.В. Волошин**, магістр,  
Дніпродзержинський держ. техн. ун-т,  
owg\_bor@mail.ru

## АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА ОПТИМІЗАЦІЇ ВИТРАТИ ПИЛОВУГІЛЬНОГО ПАЛИВА НА ДОМЕННУ ПЛАВКУ

Запропонована автоматизована система оптимізації витрат пиловугільного палива на доменну плавку. Система виконує також додаткові функції: контроль та оптимізація температури горіння; контроль втрати тепла з охолоджуючою водою та з колошниковим газом; контроль та компенсація коливання окиснення чавуну на фурмах; стабілізація теплового стану плавки.

*Ключові слова:* доменна плавка; пиловугільне паливо; оптимізація; автоматизоване керування.

Предложена автоматизированная система оптимизации расхода пылеугольного топлива на доменную плавку. Система выполняет также дополнительные функции: контроль и оптимизация температуры горения; контроль потерь тепла с охлаждающей водой та с колошниковым газом; контроль и компенсация колебания окисления чугуна на фурмах; стабилизация теплового состояния плавки.

*Ключевые слова:* доменная плавка; пылеугольное топливо; оптимизация; автоматизированное управление

The offered of optimization of charges a dust is coal of fuel is on the domain melting. The system executes also user facilities: control and optimization of temperature of burning; control of defervescence with cooling water and with top gas; control and indemnification of oscillation of cast-iron are on furn; stabilizing of the thermal state of melting.

*Keywords:* High furnace of melting, a dust is coal fuel, optimization, automated management.

Сучасне доменне виробництво орієнтовано на використання комбінованого дуття з пиловугільним паливом (ПВП). Зараз у світі з ПВП щорічно виплавляється більше 600 млн. т чавуну. Частка заміни коксу ПВП зросла до 40...50 %, проводяться науково-дослідні роботи по підвищенню даного показника до 60...80 % [1]. В Україні частка чавуну, який виплавляється з використанням ПВП, збільшилася до 44 %, що забезпечило зниження витрати коксу на 10...20 % та виведення із складу дуття природного газу (ПГ) в кількості 2,5...3,0 млрд. м<sup>3</sup>/рік.

Перспективним напрямком розвитку доменного виробництва повинно бути будівництво доменних печей (ДП) великого об'єму, оснащення їх сучасними установками для вдування ПВП, системами охолодження та автоматизованими системами керування процесами плавки. Цей напрямок уже реалізовано на ДП № 9 ПАО «АМКР», ДП № 1 Алчевського металургійного комбінату (АМК) [2]. Отже, технологія доменної плавки з використанням ПВП відпрацьована. Але проблеми автоматизованого контролю ефективності використання та оптимізації його кількості не розв'язані. Для розв'язання цих проблем пропонується визначити [3]: коефіцієнт заміни коксу ПВП (кг/кг)

$$K_3 = \frac{g_{m(p)} + 23605C^p \cdot \eta_{co} + 121000H^p \cdot \eta_{H_2} + 13400W^p \cdot \eta_{H_2}}{1.8667C_k (5250 + 12648 \cdot \eta_{co})}, \quad (1)$$

де  $C^p$ ,  $H^p$ ,  $W^p$  — вміст в ПВП, відповідно, вуглецю, водню та води, кг/кг;

23605 — тепловий ефект створення  $\text{CO}_2$  із  $\text{CO}$ , кДж/кг С;  
 121000 — тепловий ефект створення  $\text{H}_2\text{O}$ , кДж/кг водню;  
 13400 — тепловий ефект утворення  $\text{H}_2\text{O}$ , кДж/кг  $\text{H}_2\text{O}$ ;  
 $g_{m(\text{ж})}$  — теплота згоряння ПВП в горні печі кДж/кг.

$$g_{m(p)} = Q_H^P - 121000H^P - 121400S^P - 13400W^P - 23605C^P,$$

де  $Q_H^P$  — повна теплота згоряння ПВП, кДж/кг;

$S^P$  — вміст сірки у ПВП, кг/кг;

Кількість заміненого коксу ПВП:

$$\mathcal{E}_k = K_3 V_{\text{нвн}}, \text{ кг/г}, \quad (2)$$

де  $V_{\text{нвн}}$  — кількість ПВП, що вдувається у піч, кг/г;

Прибуток від використання ПВП [3]:

$$ПО_1 = \mathcal{E}_k C_k - V_{\text{нвн}} C_{\text{нвн}} - V_o C_o, \text{ грн /г} \quad (3)$$

$$ПО_2 = ПО_1 + (P_\phi - P_3) E, \text{ грн /г} \quad (4)$$

де  $C_k, C_{\text{нвн}}, C_o$  — ціна коксу, ПВП та технологічного кисню;

$E$  — умовно постійні витрати на чавун;

$P_\phi, P_3$  — фактична і задана продуктивність печі.

Між цими показниками та кількістю ПВП існує екстремальна залежність, яка є основою створення алгоритму функціонування автоматизованої системи керування витратою ПВП.

*Система оптимізації витрати ПВП* на базі мікропроцесорної техніки включає: термінал обчислювальний зв'язку з об'єктом; технічні засоби контролю, перетворення та введення у мікро-ЕОМ інформації про вміст у колошниковому газі  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ , та  $\text{H}_2$ , витрату дуття, ПВП, та кисню, вологість та температуру дуття; блок керування витратою ПВП, регулятор, виконавчий механізм та регулюючий орган витрати ПВП; пристрій для друкування та блок світлової індикації.

*Контроль коливання окиснення чавуну на фурмах*; З усередненої інформації за 10 хв визначають: температуру кожного фурменого вогнища  $t_{\phi,i}$  та всієї фурменої зони  $t_\phi$ ; теоретичну температуру горіння  $t_m$ ; різницю між теоретичною температурою горіння і температурою фурмених вогнищ [3]  $\Delta t = t_m - t_\phi$ . Через 20 хв за кожні 10 хв визначають приріст (або зменшення) усереднених за 10 хв  $\Delta t$   $\Delta = \Delta t(t - \Delta t(t - 1))$ . Якщо  $\Delta < -30$  °С, то вважають, що збільшилось окиснення елементів чавуну на фурмах. Якщо  $\Delta > 30$  °С, то вважають, що зменшилось окиснення елементів чавуну на фурмах. Виявлено, що при окисненні на фурмах 0,3 частки заліза температура фурменого вогнища збільшується на 414 °С [3]. На основі цієї залежності в темпі реального часу визначаємо міру зміни окиснення заліза  $\Delta z$  (в %) за формулою:

$$\Delta z = - \frac{0,30\Delta}{400} 100 \quad (5)$$

Компенсацію коливання окиснення чавуну на фурмах здійснюють зміною витрати кисню, вологості дуття, температури дуття, витрати ПВП [3].

*Для контролю теплового стану* за кожні 15 випусків чавуну визначають ковзні значення коефіцієнта парної кореляції між параметрами якості чавуну та комплексними показниками [3]. За максимальним значенням коефіцієнта кореляції визначають рівняння регресії залежності параметрів якості чавуну від комплексних показників, за якими розраховують прогнозні значення функції і керуючі дії (в тім числі і рекомендації на зміну кількості ПВП).

*Стабілізація теоретичної температури горіння  $t_m$* . За середньою годинною інформацією про параметри комбінованого дуття обчислюють значення  $t_m$ , яке порівнюють із заданими границями  $1800 < t_m < 2000$  °С. Якщо  $t_m > 2000$  °С, то визначають  $\Delta t_1 = t_m - 1950$ , а якщо  $t_m < 1800$  °С, то визначають  $\Delta t_2 = t_m - 1850$ . По їх значенням вираховують рекомендації на зміну витрати ПВП, технологічного кисню  $\Delta V_o$ , вологості  $\Delta l$  чи температури дуття  $\Delta t_o$  [3].

## Література

1. Климчук В.В. Технология и эффективность замены природного газа и части кокса пылеугольным топливом на ПАО «ММК им. Ильича» / В.В. Климчук, Н.В. Косолап, И.А. Лукьяненко и др. // Металл и литье Украины — 2013. — № 10. — С. 28 — 35.
2. Большаков В.И. Опыт и перспективы применения пылеугольного топлива на доменных печах Украины / В.И. Большаков, А.Л. Чайка, В.В. Лебедь, А.А. Сохацкий // Металл и литье Украины. — 2013. — № 10. — С. 5 — 10.
3. Довгалюк Б.П. Автоматизована система керування технологічними процесами доменної плавки / Б.П. Довгалюк. — Дніпродзержинськ: ДДТУ, 2009. — 245 с.

УДК 62-5:620.9

Е.Н. Никулина, канд. техн. наук, доц.,  
Нац. техн. ун-т «ХПИ», severinv@mail.ru

# ЛАБОРАТОРИЯ МОДЕЛЕЙ И МЕТОДОВ АНАЛИЗА И СИНТЕЗА СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

Представлена лабораторія для методів аналізу і синтезу систем автоматичного управління на основі методів оптимізації. Лабораторія включає підпрограми для багатьох методів оптимізації, моделей і методів розв'язання задач аналізу та синтезу систем управління, підпрограм для табличного і графічного відображення процесів аналізу і синтезу.

*Ключові слова:* системи автоматичного управління; методи аналізу; методи синтезу; методи оптимізації; комп'ютерна лабораторія.

Представлена лаборатория для методов анализа и синтеза систем автоматического управления на основе методов оптимизации. Лаборатория включает подпрограммы для многих методов оптимизации, моделей и методов решения задач анализа и синтеза систем управления, подпрограмм для табличного и графического отображения процессов анализа и синтеза.

*Ключевые слова:* системы автоматического управления; методы анализа; методы синтеза; методы оптимизации; компьютерная лаборатория.

Laboratory for analysis and synthesis methods of automatic control systems based on optimization techniques is presented. The laboratory includes subroutines for many optimization methods, models and methods for solving problems of analysis and synthesis of control systems, subroutines for tabular and graphical representations of analysis and synthesis processes.

*Keywords:* automatic control systems; analysis methods; synthesis methods; optimization methods; computer laboratory.

Одними из основных инженерных задач разработки систем автоматического управления (САУ) являются задачи их анализа и синтеза. Численные методы оптимизации представляют мощные инструменты разработки оптимальных систем. Создание компьютерной лаборатории для исследования и развития методов анализа и синтеза САУ на основе методов оптимизации является актуальной проблемой. В системе MATLAB создана лаборатория методов оптимизации OPTLAB, которая используется для изучения методов и при решении практических задач [1]. С помощью этой лаборатории разработаны программы множества методов оптимизации и решены многие задачи оптимизации реальных систем [2].

Цель доклада состоит в представлении усовершенствованной лаборатории моделей и методов анализа и синтеза САУ на основании использования методов оптимизации. Лаборатория OPTLAB построена по модульному принципу, где каждый модуль выполняет определенные функции для решения задач оптимизации, применены принципы максимальной простоты и надежности, а также исключения дублирования программного кода. Для уменьшения количества формальных параметров подпрограмм и повышения надежности их работы применены

глобальные структуры данных — OPTIONS и STATE, которые согласуют взаимодействие всех подпрограмм с минимальным объемом программного кода и определяют структуру самой лаборатории. Структура OPTIONS содержит постоянные параметры задачи оптимизации, метода ее решения, параметры табличного и графического отображения результатов. Структура STATE отображает текущее состояние процесса оптимизации. Рассматривается структура программ различных методов оптимизации для разных классов задач. Работа методов иллюстрируется таблицами и графиками. Созданы алгоритмы и программы эффективных методов одномерного поиска, которые используются и для многомерной оптимизации. Разработаны алгоритмы и программы известных методов безусловной и условной оптимизации, методов глобального поиска, генетических алгоритмов.

Введены функции для табличного и графического представления процесса оптимизации. Реализованы многие методы одномерного поиска, а также базы данных (БД) для этих методов. Представлены тестовые функции одномерного поиска, а также БД и сценарий минимизации для этих тестовых функций. Разработаны подпрограммы методов многомерной безусловной и условной минимизации, а также БД этих методов. Создан набор тестовых функций, а также БД и сценарий для оптимизации тестовых функций. Для глобальной оптимизации систем разработаны подпрограммы методов глобального поиска и генетических алгоритмов. Важной особенностью лаборатории является то, что исходные функции задач оптимизации вызываются с помощью различных вспомогательных подпрограмм, которые реализуют связь подпрограмм методов оптимизации с конкретной оптимизационной задачей, вычисляют значения целевой функции, устанавливают счетчик числа вычислений функции, вызывают подпрограммы проверки критериев выхода. Проверка критериев выхода выполняется при каждом вычислении целевой функции, что позволяет определить эффективность методов оптимизации. Предусмотрена возможность сохранения данных процесса оптимизации с последующей возможностью представлять эти данные в табличном и графическом видах, а также для дальнейшего продолжения процесса оптимизации, ранее прерванного из-за ограниченности времени счета. Реализованы функции для графического представления переходных процессов в динамических системах. Критерии качества САУ определяются по моделям в виде систем дифференциальных уравнений. Реализованы функции минимизации интегральных квадратичных оценок (ИКО) САУ, а также БД и сценарии минимизации ИКО. Разработаны функции оптимизации прямых показателей качества (ППК) САУ, а также БД и сценарии оптимизации ППК. Предложены способы формирования векторных целевых функций для оптимизации показателей качества. Представлены математические модели ядерного реактора ВВЭР-1000 и его САУ, БД задач оптимизации САУ, сценарии оптимизации параметров регуляторов САУ и построения переходных процессов. Разработаны модели различной сложности для парогенератора и его САУ, БД задач идентификации и оптимизации, сценарии идентификации, оптимизации параметров парогенератора и построения переходных процессов. Разработаны подпрограммы для моделей паровой турбины и ее САУ, БД задач оптимизации, сценарии оптимизации параметров регуляторов САУ и построения переходных процессов. Оптимальные САУ с разными ПИД и нечеткими регуляторами синтезированы различными методами оптимизации для реактора, парогенератора, паровой турбины и всего энергоблока. Полученные результаты анализа и синтеза САУ энергоблока позволят обосновать технические проекты по усовершенствованию САУ для повышения маневренности энергоблоков и удовлетворения Европейских требований к качеству электроэнергии.

Выводы. Рассмотрена структура лаборатории методов анализа и синтеза систем автоматического управления на основе методов оптимизации, которая построена в виде пакета программ на принципах модульности, простоты, надежности и исключения дублирования программного кода. Лаборатория включает базы данных методов и задач, подпрограммы методов одномерной, многомерной, безусловной, условной, глобальной и многокритериальной оптимизации, утилиты методов, средства табличного и графического представления процесса оптимизации, а также его сохранения. Рассмотрены модели и методы для анализа и синтеза систем автоматического управления. Построены линейные и нелинейные модели систем автоматическо-



го управління енергоблока атомної електричної станції. Виконан синтез регуляторів, що дозволяє досліджувати вплив різних законів управління енергоблоком на якість перехідних процесів.

### Литература

1. Никулина Е.Н. Программирование и изучение методов оптимизации в компьютерной математической системе MATLAB / Е.Н. Никулина, В.П. Северин // Труды IV Всероссийской научной конференции «Проектирование инженерных и научных приложений в среде MATLAB». — Астрахань: Издательский дом «Астраханский университет». — 2009. — С. 612 — 634.
2. Северин В.П. Багатоцільовий синтез нелінійних систем керування енергоблоків АЕС генетичними алгоритмами / В.П. Северин, О.М. Нікуліна // Автоматика / Automatics – 2013. Матеріали XX Міжнародної конференції з автоматичного управління. — Миколаїв: НУК, 2013. — С. 193 — 194.

УДК 62-5:620.9

**В.П. Северин**, д-р техн. наук, проф., Нац. техн. ун-т «ХПИ», severinv@mail.ru

## СИНТЕЗ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ЭНЕРГОБЛОКА АЭС В ЛАБОРАТОРИИ ОПТИМИЗАЦИИ OPTLAB

Розглянута лабораторія методів оптимізації, яка побудована на принципах модульності, простоти та надійності. Виконаний синтез оптимальних систем керування для ядерного реактора, парогенератора та парової турбіни, а також систем автоматичної підтримки нейтронної потужності та тиску пари перед турбіною для нормальних режимів експлуатації енергоблоку.

*Ключові слова:* енергоблок атомної електростанції; система автоматичного керування; багатокритеріальний синтез; векторна оптимізація.

Рассмотрена лаборатория методов оптимизации, которая построена на принципах модульности, простоты и надежности. Выполнен синтез оптимальных систем управления для ядерного реактора, парогенератора и паровой турбины, а также систем автоматического поддержания нейтронной мощности и давления пара перед турбиной для нормальных режимов эксплуатации энергоблока.

*Ключевые слова:* энергоблок атомной электростанции; система автоматического управления; многокритериальный синтез; векторная оптимизация.

Consideration was given to the laboratory of optimization methods based on the principles of the modularity, simplicity and reliability. Optimal automatic control systems for the nuclear reactor, steam generator, steam turbine and automatic maintenance of the neutron power and the pressure before the turbine for normal operation modes were synthesized.

*Keywords:* unit of nuclear power plant; automatic control system; multicriterion synthesis; vector optimization.

Несоответствие между производством и потреблением электроэнергии в энергосистеме Украины и малая суммарная доля установок для регулирования графика нагрузки энергосистемы ставят проблему модернизации действующих энергоблоков атомных электрических станций (АЭС) путем создания систем автоматического управления (САУ) энергоблоков, позволяющих их эксплуатировать в маневренных режимах [1]. Для теоретического решения этой проблемы использована компьютерная лаборатория методов оптимизации *OPTLAB*, содержащая множество методов и дополненная моделями и методами векторной оптимизации САУ энергоблока по прямым показателям качества (ППК) [1].

Цель доклада состоит в представлении результатов параметрического синтеза оптимальных систем автоматического управления энергоблока АЭС с использованием лаборатории методов оптимизации *OPTLAB*. Для эффективного программирования, изучения, исследования, развития и применения численных методов оптимизации построена компьютерная лаборатория

*OPTLAB* на принципах модульності, простоти и надежности [2]. Лаборатория *OPTLAB* представляет собой комплекс программ, написанных на языке программирования системы *MATLAB* с широким использованием математических и графических возможностей этой системы – средств векторных и матричных вычислений, решения систем линейных алгебраических уравнений, программ двумерной и трехмерной графики. Лаборатория обеспечивает минимальные затраты времени на программирование методов и задач оптимизации при максимально возможной простоте и наглядности представления программ и результатов решения задач оптимизации.

Задачи синтеза оптимальных САУ энергоблока АЭС могут быть представлены как задачи условной оптимизации, в которых ограничения для переменных параметров представляются в виде неравенств. Устанавливается определенный порядок ограничений: сначала идут двусторонние ограничения переменных, затем ограничения устойчивости систем, ограничения ППК – максимального отклонения управляемой переменной в переходном процессе и размаха колебаний процесса. Чем больше номер ограничения, тем сложнее вычисляется соответствующая ему штрафная функция (ШФ). Целевой функцией (ЦФ) является время установления переходного процесса. В стандартном подходе условной оптимизации набору ограничений и ЦФ соответствуют различные функции многих переменных, с которыми работает метод условной оптимизации. Необходимость учета множества функций усложняет программы методов условной оптимизации по сравнению с программами методов безусловной оптимизации. Предлагаемый пошаговый подход учета ограничений использует один математический объект – двумерную векторную ЦФ (ВЦФ), что позволяет применять методы безусловной оптимизации. Первая составляющая ВЦФ – количество выполненных ограничений, вторая – ШФ первого нарушенного ограничения. Критерии качества САУ определяются по их моделям в виде систем дифференциальных уравнений. Цели технической реализуемости, ограничения максимального отклонения управляемой величины, ограничения показателя колебаний и обеспечения максимального быстродействия САУ учтены ВЦФ. Программирование ВЦФ заключается в том, что по очереди проверяются ограничения задачи синтеза и при невыполнении какого-то из них программа возвращает соответствующее значение ВЦФ в виде двумерного числового вектора. При этом функции последующих ограничений и ЦФ не вычисляются. Методы безусловной оптимизации используют операции сравнения значений ВЦФ. Для этого в программной реализации *OPTLAB* вводится класс ВЦФ со своим конструктором, логическими и арифметическими операциями, которые переопределяют соответствующие стандартные операции для скалярных величин. Все это ускоряет работу методов оптимизации. Получены математические модели в пространстве состояний с различными регуляторами для САУ реактором ВВЭР-1000, парогенератором ПГВ-1000 и турбиной К-1000-60/1500. Векторными методами оптимизации выполнен параметрический синтез локальных САУ энергоблока с традиционными пропорционально-интегрально-дифференциальными (ПИД) и нечеткими регуляторами. Модели САУ энергоблоком в режиме «Н», которой соответствует система автоматического поддержания нейтронной мощности реактора, построены по модели энергоблока с различными регуляторами мощности. Выполнена оптимизация параметров регуляторов мощности. Модели систем управления режимом «Т», которой соответствует система автоматического поддержания давления пара перед турбиной, построены по модели САУ в режиме «Н» с ПИ регулятором и различными регуляторами давления (РД). Выполнена оптимизация параметров регуляторов давления. Оптимальный ПИД регулятор давления обеспечивает наиболее быстрый переходный процесс с небольшими колебаниями. Выводы. Рассмотрена лаборатория методов оптимизации, с использованием которой выполнен синтез оптимальных систем автоматического управления с ПИД и нечеткими ПИ регуляторами для ядерного реактора, парогенератора и паровой турбины, что позволяет сравнить нечеткие регуляторы с ПИД регуляторами. Построены математические модели энергоблока АЭС, включающие взаимодействующие в нормальных режимах эксплуатации реактор, парогенератор, паровую турбину и их системы управления, что позволяет проводить синтез систем и исследовать различные законы управления энергоблоком. На основании моделей систем автоматического управления энергоблока выполнен синтез регуляторов для нормальных режимов

эксплуатации — автоматического поддержания нейтронной мощности (режим «Н») и давления пара перед турбиной (режим «Т»). Полученные результаты анализа и синтеза САУ энергоблока позволят обосновать технические проекты по усовершенствованию САУ для повышения маневренности энергоблоков.

### Литература

1. Северин В.П. Синтез оптимальных систем автоматического управления энергоблока АЭС в нормальных режимах эксплуатации / В.П. Северин, Е.Н. Никулина // Ядерна та радіаційна безпека. — 2013. — Вип. 3 (59). — С. 62 — 68.
2. Никулина Е.Н. Программирование и изучение методов оптимизации в компьютерной математической системе MATLAB / Е.Н. Никулина, В.П. Северин // Труды IV Всероссийской научной конференции «Проектирование инженерных и научных приложений в среде MATLAB». — Астрахань: Издательский дом «Астраханский университет». — 2009. — С. 612 — 634.

УДК 681.5.015

**Р.П. Саков**, аспірант,  
**О.С. Бунке**, канд. техн. наук,  
**Ю.М. Ковриго**, канд. техн. наук, проф.,  
Нац. техн. ун-т України «КПІ»,  
roman.sakov@gmail.com

## ІНТЕРАКТИВНИЙ ПРОГРАМНО-ТЕХНІЧНИЙ КОМПЛЕКС МОДЕЛЮВАННЯ САУ

Приведено опис програмно-технічного комплексу для моделювання об'єктів керування та дослідження роботи технічних засобів автоматизації. Описані основні програмні та технічні засоби комплексу.

*Ключові слова:* програмно-технічний комплекс; моделювання; ідентифікація; лабораторний стенд.

Представлено описание программно-технического комплекса для моделирования объектов управления и исследования работы технических средств автоматизации. Описаны основные программные и технические средства комплекса.

*Ключевые слова:* программно-технический комплекс; моделирование; идентификация; лабораторный стенд.

Software and hardware complex for control objects modeling and for automation hardware operation studies is represented. Complex software and hardware are described.

*Key words:* software and hardware complex; modeling; identification; laboratory bench.

Розробка імітаційних моделей об'єктів керування з широкими динамічними властивостями для лабораторних стендів є актуальною науково-технічною задачею. Досить складно в лабораторних умовах створити фізичні об'єкти з суттєвим транспортним запізнюванням [1], які необхідні для навчання студентів теплоенергетичних спеціальностей. Технічні, конструктивні, фінансові та експлуатаційні обмеження, вимоги до електричної безпеки та фінансові обмеження спонукали до розробки «коробочного» рішення на базі цифрових технологій.

Кафедрою автоматизації теплоенергетичних процесів НТУУ «КПІ» розроблено інтерактивний стенд, що включає електронну модель об'єкта керування, пристрій вводу-виводу та мікропроцесорний контролер. За допомогою даного комплексу вирішуються задачі моделювання поведінки об'єкта керування з вибраними динамічними параметрами, студентами можуть бути виконані ідентифікація параметрів об'єкта та налаштування САУ. У вихідному положенні об'єкт керування та мікропроцесорний контролер роз'єднані, що дозволяє студентам самостійно зібрати одноконтурну або каскадну САУ.

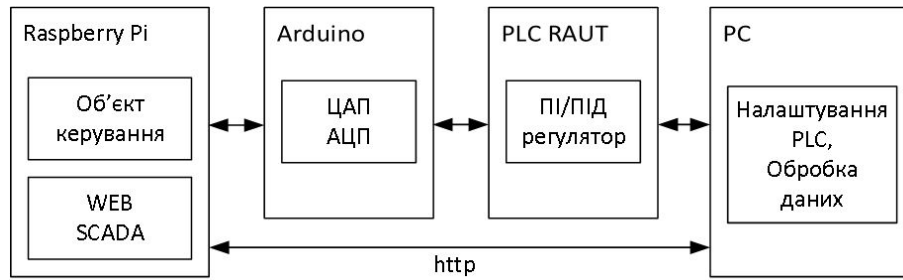


Рис. 1. Структура лабораторного стенду

Об'єкт керування моделюється за допомогою одноплатного мікрокомп'ютера Raspberry Pi у середовищі Codesys, що працює під керуванням операційної системи Linux Raspbian. Математична модель об'єкта керування реалізується за допомогою FBD-програми. У якості пристрою вводу-виводу застосовується плата Arduino, де перетворення сигналів програмується на мові C++. У якості мікропроцесорного контролера застосовано контролер вітчизняного виробника РАУТ-Автоматік, що дозволяє реалізовувати багатоконтурні САР. Усі компоненти лабораторного стенду взаємодіють між собою за допомогою протоколу ModBus. Причому аналогові виходи об'єкта керування доступні на клеммах, що дозволяє виміряти їх вольтметром та підключити до контролера.

Для зручної візуалізації перехідних процесів у системі та зміни динамічних параметрів об'єкта керування розроблено WEB-SCADA, що виконується на сервері Raspberry Pi. Користувач може відкрити web-інтерфейс просто вказавши IP-адресу сервера у браузері.

## WEB-SCADA АТЕП v.1.0

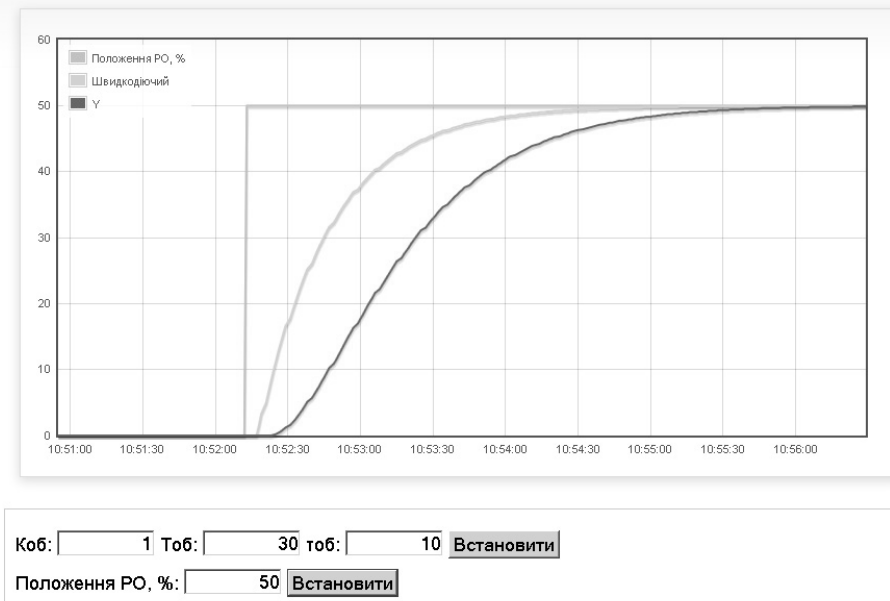


Рис. 2. Візуалізація перехідних процесів у системі

WEB-SCADA розроблена за допомогою технологій PHP, Javascript, CSS, використовує локальну СУБД MySQL для збереження поточних даних. Обмін даними з моделлю об'єкта керування здійснюється за допомогою протоколу Modbus TCP.

Викладач, використовуючи вищий рівень доступу, може змінювати параметри об'єкта керування. Студенти мають можливість проводити ідентифікацію об'єкта керування змінюючи

вхідний сигнал та оброблюючи розгінні характеристики, досліджувати налаштування та роботу замкненої системи керування. Також є можливість експорту всіх даних по проведеному експерименту у електронні таблиці Excel.

**Висновки:** використовуючи сучасні програмні технології та одноплатні мікрокомп'ютери вирішено задачу створення моделей складних технологічних об'єктів керування, що фізично з'єднуються з промисловими мікропроцесорними контролерами та дозволяють суттєво розширити лабораторну базу для студентів, що вивчають промислову автоматизацію. Застосування сучасних web-технологій дозволило вирішити задачу доступу до поточних даних та трендів через браузер персонального комп'ютера без встановлення додаткового програмного забезпечення.

### Література

1. Коновалов М.А. Основы новой стратегии синтеза систем оптимального управления [Текст] / М.А. Коновалов, О.С. Бунке. — К.: Феникс, 2015. — 277 с.

УДК 681.5

М.А. Бігун, аспірант, НУВГП, waretecs@ukr.net,

## РОЗРОБКА ОПТИМАЛЬНИХ МЕТОДІВ УПРАВЛІННЯ СИСТЕМАМИ HVAC В ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ БУДІВЕЛІ

Розглядаються проблеми енергоспоживання в будівлях HVAC-систем. Пропонуються методи оптимізації енерговитрат на вентиляцію кондиціонування та опалення завдяки алгоритму де враховується ряд супутніх факторів.

*Ключові слова:* HVAC-система; енергоспоживання; регулятор; алгоритм управління.

Рассматриваются проблемы энергопотребления в зданиях HVAC-систем. Предлагаются методы оптимизации энергозатрат на вентиляцию кондиционирования и отопления посредством алгоритму где учитывается ряд сопутствующих факторов.

*Ключевые слова:* HVAC-система; энергопотребление; регулятор; алгоритм управления.

The problems of HVAC-systems energy consumption is considered. In this report we present methods of optimizing energy consumption for heating ventilation and air conditioning through an algorithm which takes into account related factors.

*Keywords:* HVAC-system; power consumption; control; control algorithm.

На сьогоднішній день споживання енергії системами опалення вентиляції та кондиціонування (HVAC-системи) в розвинених країнах складає біля 30 % від загального. Це більше ніж транспортна галузь, на долю якої припадає 28 %. При цьому спостерігається тенденція до зростання долі споживання енергії в даному секторі. Системи вентиляції та кондиціонування в житлових та офісних приміщеннях являються найбільш швидко зростаючими споживачами енергоресурсів на даний час.

Найбільш широко на даний момент в системах HVAC застосовуються класичні алгоритми управління що базуються на ПІД-контролерах. Основним недоліком використання цих систем являється те що вони не враховують такі фактори як теплові навантаження в залежності від часу, зовнішніх погодних умов, кількості осіб в приміщенні. Все це призводить до значної перевитрати енергії. Передача та акумулювання тепла визначає теплові властивості будівлі. Кімнати та стіни являються компонентами що можуть акумулювати енергію. Також стіни виступають як передавачі тепла, частину якого поглинають.

Проводячи паралелі з електротехнікою — тепло передається через резистори та зберігається в конденсаторах. В будь-якому алгоритмі управління HVAC-системами, вимірювання та регулювання відбуваються локально на рівні одного приміщення. Проте досягнення оптимальних енергоефективних характеристик всієї будівлі при регулюванні на рівні окремого приміщення неможливе. Щоб звести до мінімуму споживання енергії всієї будівлі, регулювання в окремих приміщеннях повинно бути узгоджене. В роботі запропонований метод управління суть якого полягає в тому, що бажана температура для кожної теплової зони задається не напряму в локальний контролер, а на контролер вищого рівня, який враховує загальний бажаний результат управління з врахуванням глобальних факторів для всієї будівлі. Контролер вищого рівня визначає відповідний набір точок регулювання для контролера нижнього рівня кожної окремої зони.

### Література

1. Сотников А.Г. Автоматизация систем кондиционирования воздуха и вентиляции / А.Г. Сотников. — Л.: Машиностроение, 1984. — 235с.
2. Нефелов С.В. Техника автоматического регулирования в системах вентиляции и кондиционирования воздуха / С.В. Нефелов, Ю.С. Давыдов. — М.: Стройиздат, 1984. — 328 с.
3. Передові технології в керуванні кондиціонерами / Ю.С. Бондар, А.А. Калмаков, Ю.Я. Кувшинов, и др. — М.: Стройиздат, 1986.
4. Кокорин О.Я. Особенности проектирования систем кондиционирования воздуха по новым строительным нормативам / О.Я. Кокорин // Холодильная техника. — 2004 — № 9 — С. 34 — 38.

УДК 621.332

Л.В. Вишневский, д-р техн. наук, проф.,  
А.П. Тумольский,  
Одес. нац. морск. акад., leovish@rambler.ru

## АЛЬТЕРНАТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЕМ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

Рассмотрена возможность использования конденсаторного управления напряжением синхронного генератора. Регулирование напряжения синхронного генератора путем одновременного изменения тока конденсаторного блока и тока в обмотке возбуждения позволяет снизить время переходного процесса.

*Ключевые слова:* синхронный генератор; емкость конденсаторов; время регулирования.

Розглянуто можливість використання конденсаторного управління напругою синхронного генератора. Регулювання напруги синхронного генератора шляхом одночасної зміни струму конденсаторного блоку і струму в обмотці збудження дозволяє знизити час перехідного процесу.

*Ключові слова:* синхронний генератор; ємність конденсаторів; час регулювання.

The possibility of using a capacitor voltage control of a synchronous generator. Voltage regulation of a synchronous generator by simultaneous changes in the current of the capacitor unit and the current in the field winding to reduce response time.

*Keywords:* synchronous generator; the capacity of the capacitors; the control time.

Системы электроснабжения предприятий, транспортных средств и автономных потребителей содержат установки компенсации реактивной мощности (УКРМ). Это позволяет снизить величину потребляемого тока и полную мощность генераторов, а также потери в линиях электропередач и затраты на оплату реактивной электроэнергии, [1]. Высокая стоимость органического топлива, идущего на получение электроэнергии, прогресс производства конденсаторов переменного тока делают эффективным установку на автономных объектах компенсирующих устройств,

состоящих из блоков конденсаторов, которые коммутируются полупроводниковыми ключами. Количество подключенных блоков конденсаторов определяется регулятором компенсирующей емкости в зависимости от индуктивности нагрузки. Известно, что напряжение синхронного генератора (СГ) зависит как от тока в обмотке возбуждения, так и от емкости его нагрузки, однако эксплуатация конденсаторных устройств в составе автономных электростанций непосредственно не связана с управлением синхронным генератором. Традиционная система управления генератором [2] не использует емкость конденсаторов для регулирования напряжения. Она содержит датчик и регулятор напряжения  $U_m$ , изменяющий напряжение на обмотке возбуждения  $U_f$ . Наличие в автономной системе с СГ компенсирующих конденсаторов  $C_n$  делает технически возможным использовать их не только для компенсации индуктивной нагрузки  $L$ , но и для управления напряжением генератора  $U_m$ . Для этого информацию от датчика напряжении генератора  $U_{дат}$  можно использовать также и для управления регулятором компенсирующей емкости  $C_n$ , (рис. 1).

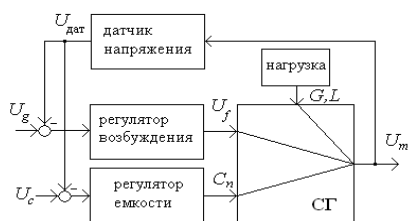


Рис. 1. Схема согласованного управления генератором

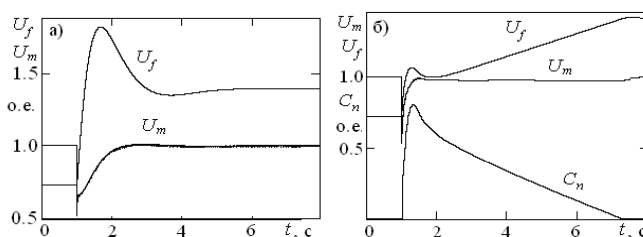


Рис. 2. Переходный процесс в традиционной (а) и предлагаемой (б) системе управления

Управляющими воздействиями на напряжение синхронного генератора в предлагаемой системе являются два сигнала:  $U_f$  — напряжение на обмотке возбуждения и  $C_n$  — емкость компенсирующих конденсаторов; возмущающими воздействиями являются проводимость  $G$  и индуктивность  $L$  нагрузки, (рис. 1).

Как известно, безударная коммутация блоков конденсаторов может быть реализована один раз за период переменного тока, поэтому регулятор компенсирующей емкости будем рассматривать как дискретно-импульсный с периодом коммутации, равным периоду тока. Емкость подключенных конденсаторов для регулирования напряжения изменяется один раз за период переменного тока на величину, пропорциональную отклонению напряжения  $U_{дат}$  от заданного  $U_c$ . Одновременное использование двух управляющих воздействий  $U_f$  и  $C_n$  предполагает учет совместной работы двух каналов управления: возбуждением и емкостью. Канал возбуждения для регулятора напряжения выбирается в качестве ведущего. Для этого его задающее воздействие устанавливается несколько большим, чем в канале емкости:  $U_c = (0,97...0,99) \cdot U_g$ . В этом случае емкостной канал регулятора напряжения будет работать только в переходном процессе, т.е. при установлении нового значения напряжения дополнительная емкость УКРМ становится равной нулю.

При использовании части конденсаторов УКРМ для регулирования напряжения в переходном процессе остальные конденсаторы могут использоваться по прямому назначению устройства, т.е. для компенсации реактивной мощности нагрузки.

Исследование предложенного способа регулирования напряжения в электроэнергетической системе, содержащей синхронный генератор и коммутируемые блоки конденсаторов, выполнено на разработанной компьютерной модели установки мощностью 500 кВт, [2].

На рис. 2 приведены переходные процессы включения нагрузки с коэффициентом мощности  $\cos \varphi = 0,8$  в традиционной схеме регулирования тока возбуждения, (рис. 2, а) и в системе, использующей емкость УКРМ, (рис. 2, б).

Основным недостатком системы регулирования напряжения СГ путем изменения тока в обмотке возбуждения является инерционность этого канала управления. Постоянная времени

цепи роторного возбуждения синхронного генератора на порядок больше, чем постоянная времени его статорной обмотки. Коммутация тока нагрузки генератора происходит в цепи статора за доли периода, что приводит к практически мгновенному изменению напряжения. Реакция регулятора по инерционному каналу возбуждения не позволяет быстро ликвидировать динамическое отклонение даже при использовании форсировки тока возбуждения, (рис. 2, а).

Использование конденсаторов для регулирования напряжения СГ позволяет преодолеть отмеченный недостаток, т.к. емкостной ток протекает по той же цепи, что и нагрузка, поэтому реакция на него имеет ту же постоянную времени. В результате длительность переходного процесса значительно снижается.

Использование емкости конденсаторов для регулирования напряжения в течении переходного процесса коммутации активно-индуктивной нагрузки позволяет значительно уменьшить время восстановления напряжения. Так, время динамического провала напряжения удается уменьшить до двух-трех периодов переменного тока после коммутации нагрузки.

### Литература

1. Веретенник А.М. Моделирование процессов стабилизации напряжения синхронного генератора в режиме компенсации реактивной мощности / А.М. Веретенник // Электромашинобудовання та електрообладнання. — К.: Техніка, 2003. — Вип. 61. — С. 29 — 32.
2. Вишнеvский Л.В. Компьютерное моделирование судовых вспомогательных электроустановок / Л.В. Вишнеvский, Н.И. Муха, А.М. Веретенник // Судовые энергетические установки. — Одесса: ОГМА. — 2001. — № 6. — С. 23 — 30.

УДК 681.515

А.О. Ушкаренко, канд. техн. наук, доц.,  
Халед Омар Ганнам, аспирант,  
НУК им. адм. Макарова, gyperion@mksat.net

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ЦИФРОВЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРНЫМ АГРЕГАТОМ

У роботі виконується розробка моделі гібридної системи управління дизель-генераторним агрегатом, яка характеризується змінним значенням кроку квантування. Виконано дослідження впливу величин часових затримок на якість управління оборотами дизеля і збудженням генератора. Розглянуто особливості використання автоматного підходу для моделювання та програмної реалізації цифрових регуляторів.

*Ключові слова:* дизель-генератор; цифровий регулятор; якість управління; модель.

В работе выполняется разработка модели гибридной системы управления дизель-генераторным агрегатом, которая характеризуется переменным значением шага квантования. Выполнено исследование влияния величин временных задержек на качество управления оборотами дизеля и возбуждением генератора. Рассмотрены особенности использования автоматного подхода для моделирования и программной реализации цифровых регуляторов.

*Ключевые слова:* дизель-генератор; цифровой регулятор; качество управления; модель.

A simulation model of a hybrid control system of diesel generator set, which is characterized by a variable value of the quantization step have been developed. Investigation of influence of time delays on the quality of management of the diesel engine and generator excitation has been made. The features of use of the automata approach for modeling and software implementation of digital regulators have been considered.

*Keywords:* diesel-generator; digital regulator; control quality; model.

**Введение.** Дизель-генераторные агрегаты с цифровыми системами, осуществляющие управление в реальном масштабе времени и использующие микропроцессор для формирования закона управления, являются весьма сложными для анализа гибридными объектами [1]. При реализации дистанционного управления дизель-генераторным агрегатом выполняется передача



данных по сети, которая происходит с задержками. В работе [2] автором предлагается алгоритм синтеза дискретных систем с ПИД-регулятором, при этом считается, что интервалы времени между выборками являются постоянными. В работе [3] исследованы переходные процессы в системе с оптимальными настройками цифрового регулятора, однако также принято, что период дискретизации непрерывного сигнала является постоянным.

**Целью работы** является разработка модели гибридной системы управления дизель-генераторным агрегатом с использованием автоматного подхода, которая характеризуется переменным значением шага квантования, для исследования влияния случайных задержек сигнала на качество управления.

**Основной материал.** Моделирование работы систем управления выполняется путем замены непрерывного регулятора на цифровой, который может быть программно реализован в виде цифрового автомата в микроконтроллере, и варьированием временных интервалов между изменением состояний автомата. При замене непрерывных регуляторов цифровыми, модель будет гибридной, которая будет характеризоваться переменным значением запаздывания в сигналах управления.

Передаточная функция регулятора системы возбуждения синхронного генератора имеет вид:

$$W_{EX}(s) = \frac{K_p}{T_d s + 1} = \frac{200}{0,02s + 1}, \quad (1)$$

где  $K_p$  — коэффициент усиления;

$T_d$  — постоянная времени интегрирования.

После выполнения z-преобразования выражения (1), передаточная функция цифрового регулятора системы возбуждения генератора имеет вид:

$$W_{EX}(z) = Z \left\{ \frac{1 - e^{-sT_s}}{s} \frac{K_p}{1 + T_d s} \right\} = \frac{bz^{-1}}{1 - az^{-1}} = \frac{8,65z^{-1}}{1 - 0,135z^{-1}}. \quad (2)$$

Передаточная функция системы управления (регулятора) дизельным агрегатом имеет вид:

$$W_{DG}(s) = \frac{K(T_0 s + 1)}{T_1 s^2 + T_2 s + 1} = \frac{40(0,2s + 1)}{0,0002s^2 + 0,01s + 1}, \quad (3)$$

где  $K$  — коэффициент усиления;

$T_1, T_2, T_3$  — постоянные времени регулятора.

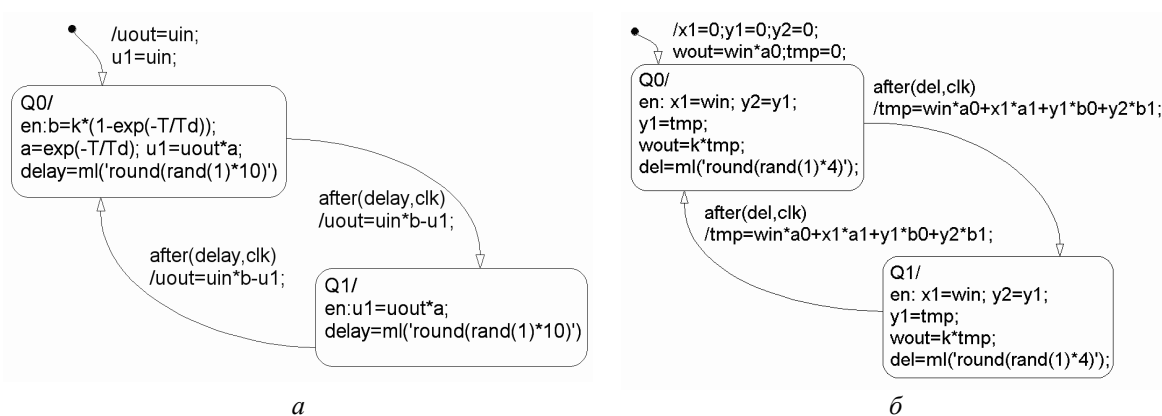


Рис. 1. Реализации регуляторов возбуждением генератора (а) и оборотами дизеля (б)

После выполнения z-преобразования выражения (3), передаточная функция цифрового регулятора при периоде дискретизации 0,01 секунда имеет вид:

$$W_{DG}(z) = 40 \cdot \frac{7,437 - 7,06z^{-1}}{1 - 1,229z^{-1} + 0,606z^{-2}}. \quad (4)$$

Реализации цифровых систем управления возбуждением генератора (2) и оборотами дизеля (4) в виде диаграмм состояний цифрового автомата при случайном значении периода дискретизации представлены на рис. 1, а, б, соответственно.

В результате моделирования работы регуляторов были получены зависимости интегрального показателя критерия качества управления от задержки передачи информационно-управляющих пакетов на удаленный регулятор системы возбуждения синхронного генератора и регулятор оборотов дизельного агрегата. При увеличении величины запаздывания качество управления ухудшается.

**Выводы.** Для управления объектами автоматизации в режиме реального времени необходимо минимизировать задержки передачи пакетов по сети. Этого можно достичь поиском оптимального маршрута передачи сообщений, оптимизации алгоритмов обработки потоков в узлах сети, распределение потоков на классы обслуживания с целью выделения наиболее приоритетных. В качестве критерия оптимизации работы сети следует использовать минимизацию времени передачи информационно-управляющих пакетов, а также использовать предиктивные регуляторы.

### Литература

1. Рябенкий В.М. Моделирование гибридных компонентов системы управления автономной электроэнергетической установкой / В.М. Рябенкий, А.О. Ушкаренко, Халед Омар Ганнам // Технічна електродинаміка. Тем. випуск. — Харків, 2012. Ч. 2. С.127 — 130.
2. Вадутов О.С. Синтез дискретных систем с ПИД-регулятором / О.С. Вадутов // Известия Томского политехнического университета. Томск: Изд-во ТПУ, 2008. — Т. 312, № 5. — С. 48 — 52.
3. Мазуров В.М. Автоматические регуляторы в системах управления и их настройка / В.М. Мазуров // Компоненты и технологии, 2003. — № 6. — С. 1 — 9.

УДК 681.324

А.П. Ладанюк, д-р техн. наук, проф.,  
Д.А. Шумигай, ассистент,  
Нац. ун-т харч. техн., shumygai@gmail.com

## СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ СКЛАДНИМ ТЕХНОЛОГІЧНИМ КОМПЛЕКСОМ З ВИКОРИСТАННЯМ АЛГОРИТМІВ КООРДИНАЦІЇ

Наводится приклад збільшення ефективності виробництва за рахунок координації матеріальних потоків між виділеними підсистемами складного технологічного комплексу. Даний підхід може бути застосований до будь-яких складних об'єктів, які мають складні нелінійні зв'язки.

*Ключові слова:* координація; технологічний комплекс; декомпозиція; ситуаційне управління.

Приводится пример увеличения эффективности производства за счет координации материальных потоков между выделенными подсистемами сложного комплекса. Данный подход может быть применен к любым сложным объектам, которые имеют сложные нелинейные связи.

*Ключевые слова:* координация; технологический комплекс; декомпозиция; ситуационное управление.

An example of increasing production efficiency by coordinating material flows between the selected subsystems of complex technological complex is described. This approach can be applied to any complex objects that have complex nonlinear relationships.

*Keywords:* coordination; technological complex; decomposition; situational management.

Розглядається технологічний комплекс (ТК) цукрового заводу, який є складною системою і складається зі значної кількості функціонально необхідних ступенів переробки сировини та

напівпродуктів. ТК цукрового заводу відносяться до складних систем, оскільки вони мають відповідні характерні ознаки [1]. В ході виробництва в складних ТК виникають труднощі при ідентифікації аварійних ситуацій, пов'язані зі складністю об'єкта управління (ОУ) та умов його функціонування. При цьому рішення оператора повинні прийматися оперативним, в реальному режимі часу, так як затримка в реалізації керувальних впливів призводить до відчутних економічних втрат. Для збільшення ефективності виробництва в складних ТК пропонується синтезувати методи координації та методи ситуаційного керування. Необхідність вирішення задачі координації пояснюється тим, що при оцінці ефективності функціонування ТК саме взаємні зв'язки між підсистемами мають найбільш суттєве значення. Даний підхід може бути застосований до будь-яких складних об'єктів, які мають складні нелінійні зв'язки. Для створення відповідної системи управління в складі ТК виділяють окремі підсистеми, кожна з яких має свої критерії управління, математичні моделі та обмеження. При декомпозиції ТК на підсистеми виникає ієрархічна структура і як результат з'являються глобальна мета системи та частинні цілі підсистем.

Запропонована система управління використовує в своїй основі запатентовану структуру системи автоматизації процесів координації підсистем технологічного комплексу з використанням ситуаційного управління [2]. Поставлена задача розв'язується за рахунок того, що система автоматизації процесів координації підсистем ТК з використанням ситуаційного управління містить в своєму складі координатор, класифікатор, базу знань, розв'язувач, аналізатор. В режимі реального часу координатор розв'язує задачу координації за принципом прогнозування взаємодій, координатор в явному вигляді визначає момент часу та дії координації, що мінімізує ймовірність виникнення нештатних ситуацій, а якщо вже така ситуація виникла, то шукає ідентичні ситуації в базі знань, а при відсутності подібних, переглядає вплив обраного ним рішення на кілька кроків вперед на основі описів об'єкта управління і процесів, що протікають в ньому. При вдалому прогнозі координатор приймає відповідне рішення з подальшим занесенням ситуації та виробленого управління до бази знань. Розв'язанням задачі координації є визначення взаємодії підсистем, при яких управління, оптимальні за критеріями ефективності кожної з підсистем, є також оптимальними за загальним критерієм для ТК в цілому. ТК цукрового заводу розглядається як сукупність дифузійної, очисної та випарної підсистем, так як саме ці підсистеми мають нелінійні залежності. Загальна оцінка функціонування технологічного комплексу з системою управління виконується на основі узагальненого економічного показника типу прибутку.

В системи управління (рис.1), яка була розроблена для досліджуваного об'єкта, на нижньому рівні знаходяться виділені підсистеми (які мають найбільш складні нелінійні зв'язки), необхідні для управління кожної підсистеми ПЛК та ПК з SCADA та на верхньому рівні розроблена система ситуаційного координування, яка в свою чергу складається з бази даних, куди записуються необхідні дані з кожної підсистеми та прийняті розробленою системою управлінські рішення, блоків координації та системи підтримки прийняття рішень (СППР). Блок координації з допомогою відомих математичних моделей знаходить оптимальне рішення для збільшення ефективності функціонування ТК за допомогою пошуку таких значень змінних, при яких прибуток ТК буде максимальним. Блок СППР складається з двох складових. Блок «дифузійне відділення» приймає рішення, використовуючи методи нечіткої логіки: за допомогою «блоку фазифікації» значення необхідних технологічних змінних перетворюються в нечіткі значення; при спрацюванні відомих правил з «бази правил» приймається відповідні рішення, після чого відбувається агрегація по кожній технологічній змінній; з допомогою «блоку дефазифікації» прийняті рішення перетворюються у чітку форму і виводяться у зрозумілому для оператора вигляді. Блок «випарне відділення» за допомогою порівняння поточної ситуації з ситуаціями в «базі ситуацій» виводить інформацію оператору у разі виникнення нештатної ситуації, присутній в базі. У випадку автоматичного режиму роботи прийняті рішення з «блоку координації» та «дифузійного відділення» записуються до бази даних.

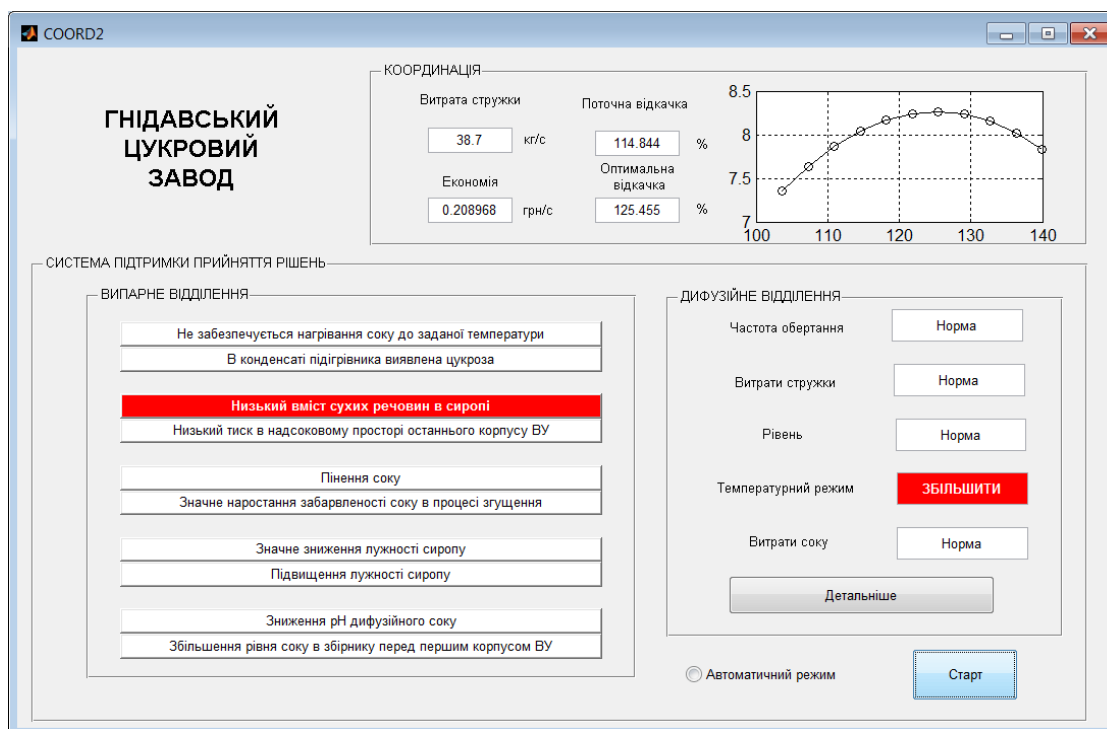


Рис. 1. Головне вікно розробленої системи управління

Запропонований спосіб координації підсистем технологічного комплексу цукрового заводу на основі ситуаційного управління дозволяє підвищити ефективність функціонування ТК за рахунок координації матеріальних потоків в ТК, тобто за рахунок узгодження взаємодій між підсистемами.

### Література

1. Системний аналіз складних систем управління: Навч. посіб. / А.П. Ладанюк, Я.В. Смітюх, Л.О. Власенко та ін. — К: НУХТ., 2013. — 274 с.
2. Ладанюк А.П. Система автоматизації процесів координації підсистем технологічного комплексу цукрового заводу з використанням ситуаційного управління / А.П. Ладанюк, Д.А. Шумигай, Р.О. Бойко // Патент України №73051. 10.09.2012, Бюл. №17.

УДК 681.324

О.А. Сущенко, канд. техн. наук, доц., Нац. авиац.  
ун-т, sushoa@ukr.net

## РОБАСТНАЯ СИСТЕМА СТАБИЛИЗАЦИИ ОБОРУДОВАНИЯ БПЛА

Розроблено математичну модель системи стабілізації та управління орієнтацією осей візування апаратури спостереження, що експлуатується на БПЛА. Розглянуто особливості процедури робастного структурного синтезу стосовно до системи, що досліджується.

*Ключові слова:* робастне управління; структурний синтез; стабілізована платформа.

Разработана математическая модель системы стабилизации и управления ориентацией осей визирования аппаратуры наблюдения, эксплуатируемой на БПЛА. Рассмотрены особенности процедуры робастного структурного синтеза применительно к системе исследуемого типа.

*Ключевые слова:* робастное управление; структурный синтез; стабилизированная платформа.

The mathematical model of the operated at UAV system for stabilization and control by the observation equipment lines-of-sight is developed. Features of a procedure for the robust structural synthesis applied to studied system are considered.

*Keywords:* robust control; structural synthesis; stabilized platform.

Експлуатація обладнання на БПЛА (для фото і відеосъемок) виконується в умовах зовнішніх возмущень, обумовлених, перш за все, впливом вітру. Використання робастного управління забезпечує стабілізацію осей визорування обладнання в умовах кутового руху БПЛА, обумовленого возмущеннями різного роду [1].

Для рішення задачі проектування робастної системи стабілізації обладнання БПЛА необхідно розробити математичну модель і вирішити задачу векторного робастного структурного синтезу, забезпечуючу виконання протирічливих цілей, які виникають в процесі проектування систем управління технічними системами.

Для системи досліджуваного типу об'єкт управління представляє собою платформу з установленими на ній апаратурою спостереження і вимірними пристроями. Моменти інерції  $J_x, J_y, J_z$ , діючі на платформу, визначаються вираженнями

$$J_i = J_{pi} + n_r^2 J_m; \quad i = x, y, z, \quad (1)$$

де  $J_{pi}, J_m$  — моменти інерції платформи з установленою на ній корисною навантажкою і двигача стабілізації;

$n_r$  — передаточне відношення редуктора.

Аналогічним чином можуть бути визначені вирази і для центробіжних моментів (2). Складові моменти, діючі по осям платформи, можуть бути визначені наступним чином (2)

$$M_{1i} = M_{fr} \text{sign} \omega_i; \quad M_{2i} = c_m U_{a_i} / R_a; \quad M_{3i} = M_{disti}; \quad i = x_2, y_0, z_1, \quad (2)$$

де  $M_{fr}$  — номінальний момент тертя в кульовоподшипникових опорах, установлених в осях карданового підвеса;

$c_m$  — коефіцієнт навантаження на валу двигача;

$U_{a_i}$  — напруги керуючих обмоток якорів двигачів;

$R_a$  — опір обмотки кола якоря двигача;

$M_{disti}$  — моменти возмущення.

Формування напруги в керуючій обмотці якоря двигача описується вираженням (3)

$$T_a \dot{U}_{a_i} + U_{a_i} = k_{pvd} U_{pvd_i} - n_r c_e \omega_i; \quad i = x_2, y_0, z_1, \quad (3)$$

где  $T_a$  — постоянная времени цепи якоря;

$c_e$  — коэффициент пропорциональности между угловой скоростью двигателя стабилизации и эдс;

$k_{PWD}$  — коэффициент передачи линейризованного ШИМ;

$U_{PWDi}$  — напряжения на входе ШИМ.

Управляющие напряжения на выходе датчика угловой скорости  $U_{\omega_i}$  могут быть описаны следующим образом (4)

$$T_g^2 \ddot{U}_{\omega_i} + 2\xi T_g \dot{U}_{\omega_i} + U_{\omega_i} = k_g \omega_i; \quad i = x, y, z, \quad (4)$$

где  $T_g$  — постоянная времени гироскопического датчика угловой скорости;

$\xi$  — коэффициент затухания;

$k_g$  — коэффициент передачи гироскопического датчика угловой скорости.

Реализация структурного робастного синтеза требует использования линейризованной модели в пространстве состояний. Такая модель может быть получена с использованием следующих допущений: пренебрежения центробежными моментами платформы и разницей осевых моментов; учета только малых углов поворота платформы; замены нелинейных моментов трения линейризованными моментами. Одним из современных подходов к структурному синтезу робастных систем стабилизации является  $H_\infty$ -синтез. Современный подход к решению этой проблемы основывается на формировании желаемых частотных характеристик системы (loop shaping) [3], что может быть осуществлено за счет введения весовых передаточных функций. При использовании метода смешанной чувствительности в качестве критерия оптимизации может быть использована  $H_\infty$ -норма функции чувствительности расширенной системы (5)

$$J(G, K) = \left\| \begin{bmatrix} W_1(I + GK)^{-1} \\ W_2K(I + GK)^{-1} \\ W_3GK(I + GK)^{-1} \end{bmatrix} \right\|_\infty = \left\| \begin{bmatrix} W_1S \\ W_2R \\ W_3T \end{bmatrix} \right\|_\infty, \quad (5)$$

где  $W_1, W_2, W_3$  — собой весовые передаточные функции;

$S, R, T$  — функции чувствительности по заданному сигналу и управлению, а также элементарная функция чувствительности.

Реализация процедуры  $H_\infty$ -синтеза методом смешанной чувствительности основана на решении двух уравнений Риккати, проверке некоторых условий и минимизации  $H_\infty$ -нормы функции смешанной чувствительности системы (5). Процедура  $H_\infty$ -синтеза включает такие этапы как создание математического описания системы (как линейризованного, так и с учетом нелинейностей, присущих реальным системам), выбор весовых передаточных функций, расширение объекта управления и собственно структурный синтез. Все эти стадии могут быть реализованы посредством использования расширенного пакета Robust System, входящего в состав вычислительной системы MatLab.

**Выводы.** В процессе исследований было получено математическое описание системы стабилизации, обеспечивающей управление ориентацией осей визирования аппаратуры наблюдения. Выбраны матрицы весовых передаточных функций, обеспечивающие структурный робастный синтез системы исследуемого типа. Эффективность процедуры робастного структурного синтеза была подтверждена результатами моделирования.

## Литература

1. Hilkert M., Inertially stabilized platform technology / M. Hilkert // IEEE Control Systems Magazine. — 2008. — № 1. — Vol. 28. — pp. 26 — 46.

2. Sushchenko O.A. Mathematical Model of Inertially Stabilized Platform for Aircraft Observation Equipment / O.A. Sushchenko // Aviation in the XXI-st century. Safety in Aviation and Space Technology: the Fourth World Congress. — 2010 — Vol. 1. — pp. 21.43 — 21.46.
3. Gu D.W. Robust Control Design with MATLAB / D.W. Gu, P.Hr. Petkov, M.M. Konstantinov. — London: Springer-Verlag, 2005, — 389 p.

УДК 681.5

В.Д. Дмитриенко, д-р техн. наук, проф.,  
А.Ю. Заковоротный, канд. техн. наук, доц.,  
Нац. техн. ун-т «ХПИ» arcade@i.ua

## АВТОМАТИЗАЦИЯ СИМВОЛЬНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ В ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ УПРАВЛЕНИЯ ПРИ СИНТЕЗЕ ЛИНЕЙНЫХ МОДЕЛЕЙ

Для геометричної теорії керування розроблені програмні засоби, що автоматизують символічні перетворення нелінійних моделей об'єктів до еквівалентних їм лінійним моделям. З їх допомогою виконаний синтез лінійної математичної моделі руху дизель-поїзда у формі Бруновського, яка враховує паралельну роботу чотирьох тягових асинхронних двигунів. Отримана модель може використовуватися для пошуку оптимальних керувань, а також для дослідження процесів буксування та юза, а також паралельної роботи двигунів.

*Ключові слова:* геометрична теорія керування; форма Бруновського; лінійна математична модель руху дизель-поїзда.

Для геометрической теории управления разработаны программные средства, автоматизирующие символьные преобразования нелинейных моделей объектов к эквивалентным линейным моделям. С их помощью выполнен синтез линейной математической модели движения дизель-поезда в форме Бруновского, которая учитывает параллельную работу четырех тяговых асинхронных двигателей. Полученная модель может использоваться для поиска оптимальных управлений, а также для исследования процессов буксования и юза, а также параллельной работы двигателей.

*Ключевые слова:* геометрическая теория управления; форма Бруновского; линейная математическая модель движения дизель-поезда.

For geometric control theory developed software tools that automate the symbolic transformation of nonlinear models of objects to equivalent linear model. With their help, made the synthesis of linear mathematical model of the motion of diesel-trains in the form Brunovsky, which allows for the parallel operation of four traction induction motors. The resulting model can be used to find the optimal controls, as well as for study of slipping and skidding as well as parallel operation of motors.

*Keywords:* geometric control theory; form Brunovsky; linear mathematical model of diesel-train movement.

**Введение.** Трудности анализа и синтеза нелинейных систем управления общеизвестны. Поэтому в течении десятилетий ведется поиск более мощных теоретических средств, чем существующие, для решения фундаментальных проблем теории управления. Одним из таких средств является современная геометрия, в частности, геометрический подход к теории управления на основе теории групп и дифференциальной геометрии. Успехи этого подхода привели к интенсивной разработке нового научного направления — единой геометрической теории управления [1, 2, 3]. Существенное преимущество нового научного направления состоит не только в создании математического аппарата, позволяющего описывать системы управления в пространствах состояний более общих, чем линейные пространства, что необходимо при решении целого ряда задач управления [1, 2], но и в реальной осуществимости эквивалентных преобразований нелинейных систем к линейным. Такие преобразования открывают возможности для использования при решении задач разработки нелинейных систем управления методов и средств теории линейных систем. При этом линеаризация нелинейной системы выполняется не с помощью классического разложения в ряд Тейлора, а на основе использования линейной обратной связи в пространстве «вход — выход» или «вход — состояние». Теоретически линеари-

зация с помощью обратной связи позволяет преобразовать к линейному виду широкий класс нелинейных систем управления [1 — 4]. Однако в этом случае необходимо выполнять трудоемкие аналитические преобразования, которые не автоматизированы ни в одном из известных пакетов моделирования и которые стали причиной разрыва между теоретическими результатами геометрической теории управления и решением практических задач синтеза систем управления.

**Постановка задачи.** Разработать программные средства для универсального пакета моделирования, позволяющие автоматизировать сложные аналитические преобразования, необходимые в геометрической теории управления при получении из нелинейных математических моделей объектов эквивалентных линейных моделей в форме Бруновского. Продемонстрировать работоспособность программного обеспечения при синтезе линейной математической модели в форме Бруновского, описывающей процессы движения дизель-поезда.

**Методы решения.** В процессе разработки программного обеспечения согласно описанного в работах [1 — 4] алгоритма синтезированы функции, которые выполняют следующие действия: формируют векторные поля объектов по их моделям, проверяют условия инволютивности, вычисляют производные Ли, вычисляют преобразования переменных расширенной модели объекта в переменные в форме Бруновского, а также выполняют интегрирование системы дифференциальных уравнений.

Продемонстрирован процесс синтеза линейной математической модели дизель-поезда с четырьмя тяговыми асинхронными двигателями, в результате которого получена модель объекта управления в форме Бруновского в пространстве «вход — состояние»:

$$\frac{dz_i}{dt} = z_{i+1}, \quad i = \overline{1, 26}, \quad i \neq 5, 8, 11, 14, 17, 20, 23, 26; \quad \frac{dz_{(2+3q)}}{dt} = v_q, \quad q = \overline{1, 8}, \quad (1)$$

где  $v_q (q = \overline{1, 8})$  — управления.

Модель объекта в форме Бруновского имеет 8-м клеток, т.о. необходимо определить 8-м функций  $T_j(\mathbf{y}) (j = \overline{1, 8})$ , преобразующих переменные расширенной модели объекта управления в переменные модели в форме Бруновского:

$$z_1 = T_1(\mathbf{y}); \quad z_{3+k} = T_l(\mathbf{y}), \quad k = 3, 6, 9, \dots, 21, \quad l = (3+k)/3. \quad (2)$$

Методика определения этих функций известна [2]. В данном случае они являются однокомпонентными составляющими вектора  $\mathbf{y} = (y_1, y_2, \dots, y_{26})$ . Из этих функций путем последовательного дифференцирования вдоль векторного поля объекта можно получить выражения для определения соответственно  $z_2, z_3, z_4, z_5$  (из функции  $T_1(\mathbf{y})$ ),  $z_7, z_8$  (из функции  $T_2(\mathbf{y})$ ),  $z_{10}, z_{11}$  (из функции  $T_3(\mathbf{y})$ ) и т.д.

**Выводы.** Таким образом, для универсального пакета моделирования разработано программное обеспечение, позволяющее автоматизировать сложные аналитические преобразования в геометрической теории управления при получении из нелинейных математических моделей объектов управления эквивалентных линейных моделей в форме Бруновского. С помощью разработанного программного обеспечения получена линейная математическая модель движения дизель-поезда в канонической форме Бруновского, которая учитывает параллельную работу четырёх тяговых асинхронных двигателей. Полученная модель может использоваться для поиска оптимальных управлений, а также для исследования процессов буксования и юза, а также параллельной работы двигателей.

## Литература

1. Методы классической и современной теории автоматического управления: Учебник в 5-и томах. Т. 5: Методы современной теории управления / Под ред. К.А. Пупкова, Н.Д. Егупова. — М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. — 784 с.



2. Краснощёченко В.И. Нелинейные системы: геометрический метод анализа и синтеза / В.И. Краснощёченко, А.П. Грищенко. — М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. — 2005. — 520 с.
3. Kim D.P. Automatic Control. Theory Nonlinear and Multivariable System / D.P. Kim. — Seoul: Harnol, 2000. — 558 p.
4. Дмитриенко В.Д. Моделирование и оптимизация процессов управления движением дизель-поездов / В.Д. Дмитриенко, А.Ю. Заковоротный. — Х.: Изд. центр «НТМТ», 2013. — 248 с.

УДК 681.518.3

С.И. Лагерная, аспирант,  
В.А. Хобин, д-р техн. наук, проф.,  
Одес. нац. акад. пищевых технологий,  
svetlanalagernaya@yandex.ru

## МОДЕЛЬ СПЕКТРАЛЬНОЙ ПЛОТНОСТИ РЕГУЛИРУЕМОЙ ПЕРЕМЕННОЙ САР

Для спектральної щільності регулюємої змінної отриманий вираз для її опису, побудовані графіки при різних властивостях об'єкта та налаштуваннях регулятора, запропонована її модель.

*Ключові слова:* (модель; спектральна щільність; регулюєма змінна; параметри моделі; графік спектральної щільності);

Для спектральной плотности регулируемой переменной получены выражения для ее описания, построены графики при различных свойствах объекта и настройках регулятора, предложена ее модель.

*Ключевые слова:* (модель; спектральная плотность; регулируемая переменная; параметры модели; график спектральной плотности);

Expressions to describe the spectral density of the controlled variable are obtained, spectral density plot with varying properties of object and controller settings is received, and model of the spectral density of the controlled variable is proposed.

*Keywords:* model; spectral density; controlled variable; model parameters; spectral density plot.

**Постановка задачі.** Повышение эффективности управления технологическими процессами, имеющими нестационарные свойства, требует получения информации об изменениях характера функционирования объекта. Регулируемые переменные можно рассматривать как случайные процессы, поэтому необходимо в реальном времени, используя вычислительные ресурсы контроллеров, решать задачу идентификации моделей случайных процессов, в частности их спектральных плотностей.

**Решение задачі.**

1. Пусть САР имеет структуру, представленную на рис.1, а свойства возмущений  $f(t)$  описываются, см. (1), альтернативными спектральными плотностями  $S_1(\omega)$  и  $S_2(\omega)$ .

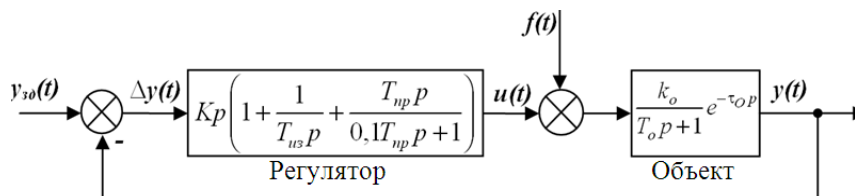


Рис. 1. Структурная схема исследуемой САР

$$S_1(\omega) = \sigma_1^2 4\alpha^3 / (\omega^2 + \alpha^2)^2; \quad S_2(\omega) = \sigma_2^2 4\alpha(\alpha^2 + \beta^2) / ((\omega^2 - \beta^2 - \alpha^2)^2 + 4\alpha^2 \omega^2). \quad (1)$$

Поскольку  $S_y(\omega) = |W_{fy}^{CAP}(j\omega)|^2 \cdot S_f(\omega)$ , см. [1], то альтернативные модели спектральных плотностей регулируемой переменной  $y(t)$  этой САР будут иметь вид:

$$S_{y1}(\omega) = \frac{((-0,1k_0T_{из}T_{пр}\omega^2 \cos(\omega\tau_0) + k_0T_{из}\omega \sin(\omega\tau_0))^2 + (0,1k_0T_{из}T_{пр}\omega^2 \sin(\omega\tau_0) + k_0T_{из}\omega \cos(\omega\tau_0))^2}{(-1,1k_0k_pT_{из}T_{пр}\omega^2 \cos(\omega\tau_0) + k_0k_p(0,1T_{пр} + T_{из})\omega \sin(\omega\tau_0) + k_0k_p \cos(\omega\tau_0) - 0,1T_{из}T_{пр}\omega^2 - T_0T_{из}\omega^2)^2 + (-0,1T_0T_{из}T_{пр}\omega^3 + T_{из}\omega + 1,1k_0k_pT_{из}T_{пр}\omega^2 \sin(\omega\tau_0) + k_0k_p(0,1T_{пр} + T_{из})\omega \cos(\omega\tau_0) - k_0k_p \sin(\omega\tau_0))^2} \times \sigma_{\gamma}^2 4\alpha^3 / (\omega^2 + \alpha^2)^2 \quad (2)$$

$$S_{y2}(\omega) = \frac{((-0,1k_0T_{из}T_{пр}\omega^2 \cos(\omega\tau_0) + k_0T_{из}\omega \sin(\omega\tau_0))^2 + (0,1k_0T_{из}T_{пр}\omega^2 \sin(\omega\tau_0) + k_0T_{из}\omega \cos(\omega\tau_0))^2}{(-1,1k_0k_pT_{из}T_{пр}\omega^2 \cos(\omega\tau_0) + k_0k_p(0,1T_{пр} + T_{из})\omega \sin(\omega\tau_0) + k_0k_p \cos(\omega\tau_0) - 0,1T_{из}T_{пр}\omega^2 - T_0T_{из}\omega^2)^2 + (-0,1T_0T_{из}T_{пр}\omega^3 + T_{из}\omega + 1,1k_0k_pT_{из}T_{пр}\omega^2 \sin(\omega\tau_0) + k_0k_p(0,1T_{пр} + T_{из})\omega \cos(\omega\tau_0) - k_0k_p \sin(\omega\tau_0))^2} \times \sigma_{\gamma}^2 4\alpha(\alpha^2 + \beta^2) / ((\omega^2 - \beta^2 - \alpha^2)^2 + 4\alpha^2\omega^2) \quad (3)$$

Вид спектральных плотностей  $f(t)$  -  $S_{f1}(\omega)$  и  $S_{f2}(\omega)$ , с различными  $\alpha$  и  $\beta$ , и спектральных плотностей  $y(t)$  -  $S_{y1}(\omega)$  и  $S_{y2}(\omega)$ , порождаемых этими  $f(t)$ , приведен на рис. 2.

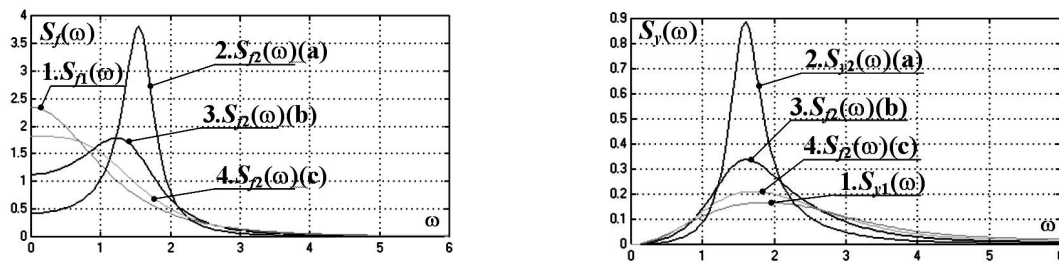


Рис. 2

2. Рисунки, приведенные ниже, иллюстрируют влияние на  $S_y(\omega)$ : а) изменений настроек регулятора ( $k_p, T_{из}, T_{пр}$ ), при их оптимизации по различным критериям, см. рис. 3 и 4; б) изменений  $\tau_0$ , см. рис.5, и  $k_0$ , см. рис. 6, при оптимизации  $k_p, T_{из}, T_{пр}$  по квадратичному критерию.

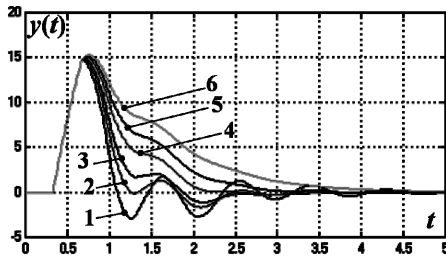


Рис. 3

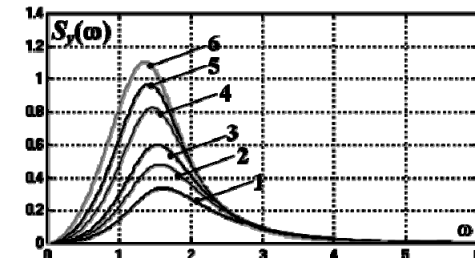


Рис. 4

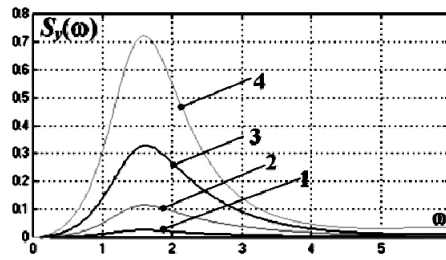


Рис. 5

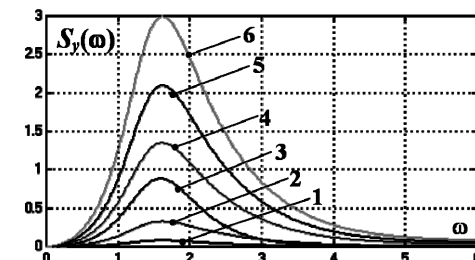


Рис. 6

3. Для практического применения выражения (2) и (3) сложны, и их расчет в реальном времени на контроллерах, при ограниченных вычислительных ресурсах, проблематичен. Проведенный выше анализ изменений характера  $S_y(\omega)$  показывает, что основная топология их графиков сохраняется, что дает возможность заменить их одной упрощенной моделью, например:

$$S_y(\omega) = \sigma_{\gamma}^2 4\alpha\omega^2 ((\alpha^2 + \beta^2)\gamma^2 + 2\alpha\gamma + 1) / (1 + \gamma^2\omega^2) ((\omega^2 - \beta^2 - \alpha^2)^2 + 4\alpha^2\omega^2), \quad (4)$$

где  $\alpha, \beta, \gamma$  — искомые параметры модели  $S_y(\omega)$ .

**Выводы.** Непрерывно оценивая параметры модели спектральной плотности (4)  $y(t)$ , например, на основе метода среднеквадратических частот случайного процесса [2], который эффективен к применению в реальном времени, можно использовать получаемую информацию как основу алгоритмов адаптации САР.

#### Литература

1. Бесекерский В.А. Теория систем автоматического управления / В.А. Бесекерский, Е.П. Попов. — Изд. 4-е, переработанное и доп. — СПб., Профессия, 2007. — 725 с.
2. Хобин В.А. Параметрическая идентификация типовых спектральных плотностей случайных процессов оцениванием их среднеквадратических частот / В.А. Хобин, С.И. Лагерная // Автоматизация технологических и бизнес-процессов. — 2014. — № 2(18) июнь 2014. — С. 13 — 19.

УДК 681.513.5:621.316.7

**Ф.Д. Пряшников**, д-р техн. наук, проф.,  
**П.Ф. Пряшникова**, канд. техн. наук,  
МГУ им. М.В. Ломоносова,  
fdp@ukr.net

## КРИТЕРИЙ ОПТИМИЗАЦИИ НЕСИММЕТРИЧНЫХ РЕЖИМОВ ТРЕХФАЗНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ В УНИТАРНОМ ПРОСТРАНСТВЕ

Запропоновано новий критерій оптимізації несиметричних режимів трифазних електричних мереж на основі використання норми Чебишева унітарного простору

*Ключові слова:* оптимізація; несиметричний режим; трифазна електрична мережа; унітарна простір.

Предложен новый критерий оптимизации несимметричных режимов трехфазных электрических сетей на основе использования нормы Чебышева унитарного пространства

*Ключевые слова:* оптимизация; несимметричный режим; трехфазная электрическая сеть; унитарное пространство.

A new optimization criterion asymmetrical modes of three-phase electrical networks through the use of Chebyshev norm unitary space

*Keywords:* optimization; unbalanced mode; three-phase electrical network; unitary space.

Рассматривается трехфазная электрическая сеть, напряжения и ток в фазах которой могут быть представлены в виде  $u_a(t) = A_a \sin(\omega t + \varphi_a)$ ,  $u_b(t) = A_b \sin(\omega t + \varphi_b)$ ,  $u_c(t) = A_c \sin(\omega t + \varphi_c)$ . Предлагается критерий оптимизации, характеризующий отклонение режима работы сети от симметричного режима, при котором  $A_a = A_b = A_c$ ,  $\varphi_b - \varphi_a = \varphi_c - \varphi_b = \frac{2\pi}{3}$ .

Математическая модель трехфазной электрической сети в унитарном пространстве  $U$  задается тройкой комплексных чисел  $(A, B, C)$ , такой что фазные напряжения (токи) определяются соотношениями  $u_a(t) = |A| \sin(\omega t + \arg A)$ ,  $u_b(t) = |B| \sin(\omega t + \arg B)$ ,  $u_c(t) = |C| \sin(\omega t + \arg C)$ . Тройка  $(A, B, C)$  называется симметричной, если  $|A| = |B| = |C|$  и  $\arg B - \arg A = \arg C - \arg B = \frac{2\pi}{3} q$  ( $q = 0, 1, 2$ ), в противном случае тройка  $(A, B, C)$  называется

несимметричной. Традиционно в качестве критерия не симметрии используют критерий  $K(A, B, C) = (k_0, k_2)^T$ , составленный из коэффициентов нулевой ( $q = 0$ ) и обратной ( $q = 2$ ) последовательностей. Недостатком критерия  $K(A, B, C)$  является его векторный характер. В докладе показано, что критерий  $K(A, B, C)$  в унитарном пространстве  $U$  соответствует среднеквадратичной норме. Предлагается скалярный критерий  $J(A, B, C)$ , соответствующий норме Чебышева и характеризующий максимальную фазную не симметрию.

Критерий  $J(A, B, C)$  определяется соотношением

$$J(A, B, C) = \min_{s \in C} \max \{ |A - S|, |B - a^2 S|, |C - aS| \}, \quad (1)$$

где  $a = e^{i\frac{2\pi}{3}}$ .

Для вычисления значения критерия (1) предлагается определить три множества

$$\Omega_1 = \{S : |A - S| \geq \max \{ |B - a^2 S|, |C - aS| \} \},$$

$$\Omega_2 = \{S : |B - a^2 S| \geq \max \{ |A - S|, |C - aS| \} \},$$

$$\Omega_3 = \{S : |C - aS| \geq \max \{ |B - a^2 S|, |A - S| \} \}.$$

Показано, что для любых  $A, B, C$  множества  $\Omega_1, \Omega_2, \Omega_3$  есть замкнутые области, граничные точки которых принадлежат трем прямым, имеющим по крайней мере одну общую точку. Каждая из областей является углом с вершиной в этой точке. В каждой из областей аналитически решена задача поиска минимума функций:  $f_1(S) = |A - S|$  для области  $\Omega_1$ ,  $f_2(S) = |B - a^2 S|$  для области  $\Omega_2$ ,  $f_3(S) = |C - aS|$  для области  $\Omega_3$ . При найденных минимумах функций  $f_1(S), f_2(S), f_3(S)$  значение критерия (1) определяется соотношением

$$J(A, B, C) = \min \{ \min_{S \in \Omega_1} f_1(S), \min_{S \in \Omega_2} f_2(S), \min_{S \in \Omega_3} f_3(S) \}. \quad (2)$$

### Литература

1. Гриб О.Г. Контроль и регулирование несимметричных режимов в системах электроснабжения / О.Г. Гриб. — Харьков: ХНАГХ, 2004. — 180 с.
2. Жежеленко И.В. Показатели качества электроэнергии и их контроль на промышленных предприятиях / И.В. Жежеленко, Ю.Л. Саенко. — М.: Энергоатомиздат, 2000. — 252 с.

UDC 681.513.5:621.316.7

V.O. Kushnir, Dept. engineer,  
O.S. Gerasin, PhD-student,  
Admiral Makarov National University of Shipbuilding,  
Ukraine, y\_kondrat2002@yahoo.com

## MOBILE ROBOT FOR TECHNOLOGICAL CLEANING OF FERROMAGNETIC SURFACES

В даній роботі представлена нова концепція підводного гусеничного мобільного робота для очищення ферромагнітних поверхонь. Наводяться математичні моделі кінематики та динаміки руху мобільного робота по вертикальних робочих поверхнях.

*Ключові слова:* мобільний робот; притискний пристрій; гусеничний привод; модель руху.

В данной работе представлена новая концепция подводного гусеничного мобильного робота для очистки ферромагнитных поверхностей. Приводятся математические модели кинематики и динамики движения мобильного робота по вертикальным рабочим поверхностям.

*Ключевые слова:* мобильный робот; прижимное устройство; гусеничный привод; модель движения.

A new concept of underwater crawler mobile robot for ferromagnetic surfaces cleaning is presented in the paper. Mathematical motion models of kinematics and dynamics of the mobile robot on the vertical work surfaces are presented.

*Keywords:* mobile robot; clamping device; crawler drive; motion model.

Nowadays in the developed countries intensive research are carried aimed at creating mobile remote-controlled robots that can move through horizontal, inclined or vertical surfaces using different types of movers and clamping devices [1 — 4]. A special need for such mobile robots (MR) is felt in shipbuilding, ship repair, particularly for technological operations performance and cleaning external ship's surfaces and other structures afloat or in dry docks [2]. The pneumatic devices of universal application are often used in such systems [1]. However, this type of MR has many control problems, moves slowly, jerkily, what often leads to the repeated cleaning of missed areas. To improve the reliability of the technological operations implementation on ferromagnetic surfaces (FMS) should consider MR with magnetic clamping devices (CD). Magnetic CDs provide adhesion to the working surface, which is calculated beforehand and created using electromagnets [5, 6] and permanent magnets [7, 8]. In addition, there is a very promising development direction of MR based on electromagnetic wheel-movers [5, 6]. The aim of this work is to develop mobile robot construction and control system with separate clamping permanent magnets that is intended for clearing ferromagnetic surfaces and equipped with crawler drive.

Crawler mobile robot kinematic model during motion through flat vertical FMS can be written as [9]:

$$\begin{cases} dX / dt = ((V_1 + V_2) \cos \varphi) / 2, \\ dY / dt = ((V_1 + V_2) \sin \varphi) / 2, \\ d\varphi / dt = \omega = ((V_2 - V_1) \cos \varphi) / 2d, \end{cases} \quad (1)$$

where  $X, Y$  — coordinates of MR current position in the flat surface coordinate system XOY;

$V_1, V_2$  — linear speeds of the left and right tracks;

$\omega$  — MR angular speed;

$\varphi$  — angle between the resultant velocity vector and the axis OX.

The MR dynamics model has the form [9]:

$$\begin{cases} mdV / dt = F_T - R, \\ Jd\omega / dt = M_T - M_R, \end{cases} \quad (2)$$

where  $F_T$  — tension force, defined as the sum of the tracks tension forces;

$R$  — resistance force;

$M_T$  — torque;

$M_R$  — resistance torque.

Permanent magnets are often set at tracks in the construction of underwater crawler type MR [7, 8]. The advantage of such MR is the high patency of due to the large adhesion area to the working surfaces and disadvantages are low reliability, energy efficiency, rapidity and service life. The authors suggest MR, in which the main clamping magnet 1 is set by spherical joint 3 on the frame 4 bottom between left and right tracks 5 with ensuring the appropriate clearance  $\delta$  concerning the hull FMS 2 (Fig. 1).

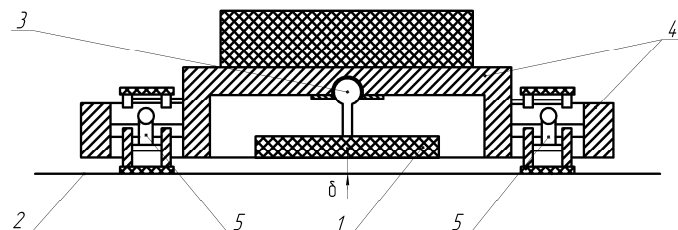


Fig. 1. Crawler MR (cross section is made by the hinge 3)

The presence of the appropriate clearance between the main permanent magnets and the surface can reduce energy consumption and increase the movement speed and passability of MR. The calculation methodology of the clamping force main vector, which generally acts on the magnet pole face, and its components are given in [2, 3].

## References

1. Souto D. Lappa: a new type of robot for underwater non-magnetic and complex hull cleaning / D. Souto, A. Faica, F. Lypez-Peca, R.J. Duro // IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), Karlsruhe, Germany, May 6-10, 2013. — P. 3394 — 3399.
2. Zaporozhets Y.M. The estimated model of clamping efforts for mobile robots with moving on ferromagnetic surfaces / Y.M. Zaporozhets, Y.P. Kondratenko, L.A. Zhuchynskyy // Automatics-2013. Materials XX International Conference on Automatic Control, dedicated to the 100th anniversary of the birth of academician A.G. Ivakhnenko (25-27 September 2013). — Mykolaiv: NUK, 2013. — P. 167-168. (in Ukrainian)
3. Zaporozhets Y.M. Problems and features of control over magnetically operated drivers of mobile robot / Y.M. Zaporozhets, Y.P. Kondratenko // Electronic Modeling. International scientific journal. — 2013. Volume 35, № 5. — P. 109 — 123. (in Russian)
4. Gerasin O.S. The complex of automatic control tasks for multi-purpose mobile robots / O.S. Gerasin // Mohyla's readings. Book of abstracts of Ukrainian scientific-practical conference. — Mykolaiv: Petro Mohyla Black Sea State University Publisher, 2014. — P. 29 — 31. (in Ukrainian)
5. Kondratenko Y.P. Propulsion wheel of mobile robot / Y.P. Kondratenko, Y.M. Zaporozhets // Patent No. 45369, Ukraine, 2009. (in Ukrainian)
6. Kondratenko Y.P. Method of magnetically operated displacement of mobile robot / Y.P. Kondratenko, Y.M. Zaporozhets, V.Y. Kondratenko // Patent No. 47369, Ukraine, 2010. (in Ukrainian)
7. Fugro Subsea Services Limited. Case Study. Hull Cleaning and Inspection Robot. 2014. [Online] <http://goo.gl/XEVRw0>.
8. Zhuchynskyy, L.A. Device for mechanical cleaning ship hull / L.A. Zhuchynskyy, M.V. Svystunov, S.L. Stoian // Patent No. 63172, Ukraine, 2011. (in Ukrainian)
9. Kabanov A.A. Modeling and movement control of crawler mobile robot / A.A. Kabanov // Control in technical, ergatic, organizational and network systems, CTEONS, 2012. — St. Petersburg (9-11 October 2012). — P. 740 — 743. (in Russian)

УДК 681.518.5

А.П. Ладанюк, д-р техн. наук, проф.  
О.В. Школьна, аспірант,  
Нац. ун-т харчових технологій, evlens@ukr.net

## УПРАВЛІННЯ ВИПАРНОЮ СТАНЦІЄЮ ЦУКРОВОГО ЗАВОДУ В СКЛАДІ ТЕПЛОЕНЕРГЕТИЧНОГО КОМПЛЕКСУ

Стаття присвячена проблемі використання ентропійного підходу при створенні автоматизованої системи управління випарною станцією цукрового заводу.

*Ключові слова:* випарна установка; теплоенергетичний комплекс; ентропійний підхід.

Статья посвящена проблеме использования энтропийного подхода к созданию автоматизированной системы управления выпарной станцией сахарного завода.

*Ключевые слова:* испарительная установка; теплоэнергетический комплекс; энтропийный подход.

The article is devoted to problems of using entropy approach when creating automated control system of evaporator station at the sugar refinery.

*Keywords:* evaporator system; heat and power complex; entropy approach.

**Постановка задачі.** Традиційні система автоматизації випарних установок (ВУ) передбачають, як правило, стабілізацію технологічного режиму та забезпечення необхідних показників готового продукту. ВУ цукрового виробництва призначені для отримання сиропу заданої якості (концентрація та забарвленість). Не менш важливим призначенням ВУ цукрових заводів є забезпечення гріючою парою зовнішніх споживачів (вакуум-апарати та теплообмінники різного призначення). Враховуючи можливість використання конденсатів з гріючих камер корпусів, можна стверджувати, що ВУ займають важливе місце в теплоенергетичному корпусі цукрового заводу. При розробці систем автоматизації ВУ цукрового заводу випарну установку слід розглядати, як складову теплоенергетичного комплексу з урахуванням усіх споживачів вторинної пари та конденсату. Та поставити за мету не лише забезпечення необхідних показників готового продукту, а й ефективне використання вторинної пари не лише між корпусами ВУ, а й зовнішніми споживачами, з метою зменшення теплоенергетичних витрат.

**Матеріали і методи.** При автоматизованому управлінні випарною установкою підвищення ефективності використання теплових ресурсів можна здійснити на основі ентропійного підходу [1].

Так, якщо у ВУ концентрація вихідного розчину (соку) підвищується від початкової масової частки твердої речовини  $\omega_0$  до кінцевої масової частки  $\omega_n$ , а масові витрати вихідного розчину (соку) та кінцевого продукту (сиропу) відповідно дорівнюють  $F_0$  та  $F_n$ , то баланс маси твердої речовини має вигляд:

$$F_0 \omega_0 = F_n \omega_n \quad (1)$$

Загальний баланс маси багатокорпусної випарної установки включатиме всю кількість вторинної пари  $\sum V_i$  з різних корпусів:

$$F_0 = \sum V_i + F_n \quad (2)$$

З (1) та (2) отримаємо кількість вторинної пари, яку необхідно видалити для досягнення необхідної концентрації розчину (сиропу):

$$\sum V_i = F_0 \left( 1 - \frac{\omega_0}{\omega_n} \right) \quad (3)$$

Кількість утвореної в першому корпусі вторинної пари пов'язана з кількістю гріючої водяної пари, що надходить в перший корпус і з її термічним к.к.д.  $E$ . Аналогічно кількість вторинної пари утвореної в другому корпусі пов'язана з кількістю пари, що надійшла з першого корпусу. Таку послідовність можна продовжувати до  $n$  корпусів і потім, додавши окремі витрати вторинної пари, отримати:

$$\sum_{i=1}^{i=n} V_i = V_0 \Delta H_0 \left( \frac{E}{\Delta H_1} + \frac{E^2}{\Delta H_2} + \dots + \frac{E^n}{\Delta H_n} \right) \quad (4)$$

Збільшення ентальпії  $\Delta H_i$  вторинної пари, що утворюється в процесі випарювання в даному корпусі, не дорівнює точно її прихованій теплоті пароутворення. Якщо приховану теплоту пароутворення використовувати для оцінки  $\Delta H$  в рівнянні (4), то можна розрахувати співвідношення кількості гріючої пари і вторинної пари для будь-якої випарної установки.

Точний контроль якості кінцевого продукту є складовою частиною будь-якої програми економії енергії. Для ефективного регулювання якості кінцевого продукту ВУ (сиропу) необхідно враховувати чутливість системи автоматичного регулювання до збурень. Вносити збурення в роботу ВУ можуть зміни кількості підведеного тепла, зміни витрати, або складу вхідного розчину (соку). У виведених вище балансах маси та енергії є вся необхідна інформація для оцінки чутливості якості кінцевого продукту ВУ (сиропу) до зазначених збурень. Провівши деякі перетворення, можна оцінити чутливість концентрації сиропу до змін відношення кількості гріючої пари до кількості вхідного соку та виявити, що чутливість концентрації сиропу до змін концентрації соку вища, ніж чутливість до змін відношення витрати гріючої пари і вхідного дифузійного соку.

Для регулювання якості продукту можна регулювати або витрату гріючої пари, або витрату дифузійного соку при заданій пропускній здатності по другій витраті. Та у будь-якому випадку необхідно щоб поведінка цих двох змінних була узгоджена.

**Висновок.** При створенні автоматизованої системи управління випарної станції цукрового заводу, розглядаючи останню як основну і невід'ємну частину теплоенергетичного комплексу, підвищити ефективність використання теплових ресурсів можна використовуючи ентропійний підхід, що дозволить знизити витрату енергетичних ресурсів без втрати якості готового продукту.

### Література

1. Інноваційні технології в управлінні складними біотехнологічними об'єктами агропромислового комплексу: монографія / А.П. Ладанюк, В.М. Решетюк, В.Д. Кишенько, Я.В. Смітюх. — К.: Центр учбової літератури, 2014. — 280 с.
2. Основи тепло технології цукрового виробництва. Навчальний посібник / М.О. Прядко, М.О. Масліков, В.П. Петренко, та ін. — Вінниця: Нова Книга, 2007. — 296 с.



УДК 67-83:621.77

Л.О. Копилова, аспірант,  
С.М. Балюта, д-р техн. наук, проф.,  
В.Д. Йовбак, канд. техн. наук, доц.,  
Наці. ун-т харчових технологій, epp11@ukr.net

## РОБАСТНА АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА РЕГУЛЮВАННЯ ТОВЩИНИ МЕТАЛОПРОКАТУ

Розроблена система автоматичного регулювання товщини в чистовій групі клітей ширококутового стану гарячої прокатки, в якій координується робота окремих підсистем і синтезований робастний регулятор із двома степенями свободи, що дозволило компенсувати вплив транспортного запізнення і забезпечити високі якості регулювання за завданням і за збуренням.

*Ключові слова:* робастний регулятор; ширококутовий стан гарячої прокатки.

Разработана система автоматического регулирования толщины в чистовой группе клетей широкополосного стана горячей прокатки, в которой координируется работа отдельных подсистем и синтезирован робастный регулятор с двумя степенями свободы, что позволило компенсировать влияние транспортного запаздывания и обеспечить высокие качества регулирования по заданию и возмущению.

*Ключевые слова:* робастный регулятор; широкополосный стан горячей прокатки.

A gauge control system for hot finishing mills has been developed. Automatic control system has the following features: strip thickness at the outlet of each rolling mill is calculated based on a constant mass flow of metal; the synthesis controller ignores the transport delay; synthesized robust controller with two degrees of freedom, providing high quality regulation tasks and disturbance

*Keywords:* robust control; broadband hot rolling mill.

**Вступ.** При побудові САУ технологічними параметрами на основі локальних САР на якість готового металопрокату в значній мірі впливають транспортне запізнення і збурення, що обумовлені спрацюванням кожної з локальних підсистем [1].

**Постановка задачі і дослідження.** Розробка робастної системи міжклітьового автоматичного регулювання товщини смуги (САРТ) в чистовій групі клітей ширококутового стану гарячої прокатки

**Матеріали досліджень.** Для синтезу САРТ використані такі математичні моделі: деформації металу в прокатній кліті; приводу і системи керування гідронатискним пристроєм; системи керування головним приводом прокатної кліті; системи керування петлетримачем; механічної системи петлетримача; системи керування нагуванням і петлею смуги. Структурна схема синтезованої робастної САУ представлена на рис. 1.

При синтезі міжклітьової САРТ враховано наявність чистого запізнення зміни товщини смуги на виході із  $i$  кліті  $\Delta h_i \cdot i$  на вході в  $i+1$  кліть:  $\Delta H_{i+1}$

$$\Delta H_{i+1} = \Delta h_i \cdot e^{-L_i s} \quad (1)$$

де  $L_i$  — відстань між прокатними клітями

Синтез робастного регулятора виконаний методом змішаної чутливості. Для цього сформовані функції чутливості передатної функції похибки і передатної функції замкнутої системи управління.

Передатна функція об'єкта керування представлена у вигляді:

$$G_{ni}(s) = \frac{K_i}{T_i s + 1} e^{-L_i s} = P_i(s) e^{-L_i s} \quad (2)$$

Вимоги до системи із послаблення дії збурень і забезпеченню запасу стійкості реалізовані за допомогою мінімізації норми [2]:

$$\left\| \frac{W_s(s)S(s)}{W_T(s)T(s)} \right\|_{\infty} < 1 \quad (3)$$

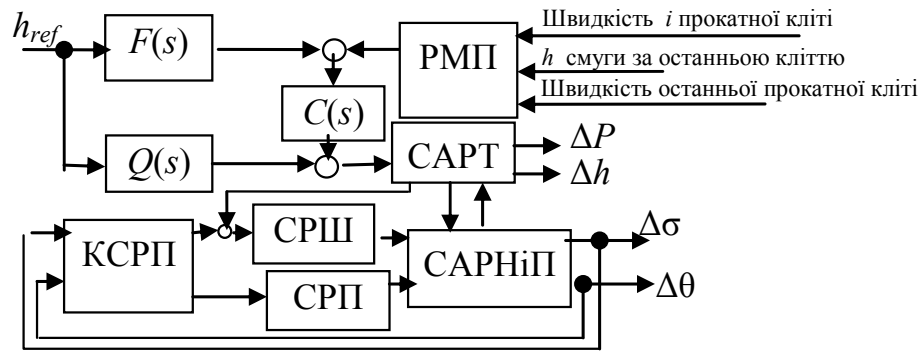


Рис. 1. Структурна схема робастної САРТ: РМП — розрахунок потоку маси; САРТ — система автоматичного регулювання товщини смуги; КСРП — контролер керування головним приводом і петелетримачем; СРШ — система регулювання швидкості прокатної кліті; СРП — система регулювання положення петелетримача; САРНіП — система регулювання натягу і петлі смуги

Робастний регулятор міжклітьової система автоматичного регулювання товщини синтезований у вигляді поліному :

$$C(s) = \frac{1}{s} \frac{m_3 s^3 + m_2 s^2 + m_1 s + m_0}{s^3 + n_2 s^2 + n_1 s + n_0} \quad (4)$$

При цьому компенсація впливу чистого запізнювання реалізується за допомогою методу двох ступенів свободи (рис. 1) з використанням попереднього формування сигналу уставки товщини за допомогою передатних функцій

$$F(s) = \frac{1}{T_{Fi}s + 1} e^{-L_i s}, \quad Q(s) = \frac{T_{Fi}s + 1}{T_i s + 1} \quad (5)$$

Проведені розрахункові дослідження показали підвищення якості металопрокату при використанні запропонованої схеми автоматичного управління.

**Висновки.** Запропонована система регулювання товщини металопрокату, що містить робастний регулятором з двома ступенями свободи і координацію окремих підсистем, що забезпечує зменшення повздовжньої різнотовщинності гарячекатаної смуги за рахунок компенсації транспортного запізнювання і забезпечити нечутливості системи регулювання товщини до збурень.

#### Література

1. Кузнецов Б.И. Синтез автоматизированных систем управления технологическими процессами прокатки / Б.И. Кузнецов, С.Н. Балюта, В.В. Коломиец, Т.Б. Никитина. — Харьков, 2011. — 356 с.
2. Hearn G. Robust Multivariable Control for Hot Strip Mills, / Gerald Hearn and Michael J. Grumble // ISIJ International, vol. 40, — 10. — 2000. — pp. 995 — 1002.

УДК 67-83:621.77

Є.О. Корольов, аспірант, Нац. ун-т харчових технологій, korolov\_332@mail.ru

## УПРАВЛІННЯ СПОЖИВАННЯМ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ

Представлені основні положення побудови автоматизованих систем управління використанням електричної енергії і комплексів технічних засобів контролю енергоспоживання.

*Ключові слова:* електроспоживання; управління; оптимізація.

Представлены основные положения построения автоматизированной системы управления электропотреблением и комплекс технических средств контроля энергообеспечения.

*Ключевые слова:* электропотребление; управление; оптимизация.

The main provisions of the construction of an automated control system power consumption and complex technical means of verification of supply

*Keywords:* power consumption; management; optimization.

**Вступ.** Управління використанням електричної енергії є актуальним для промисловості, оскільки дозволяє вирішити питання ефективного використання генеруючи потужностей, зменшення втрат електроенергії при її транспортуванні та зменшення енергоємності продукції.

**Постановка задач і дослідження.** Завдання полягає у розробці автоматизованої системи управління електроспоживанням промислових підприємств.

**Матеріали досліджень.** Процес управління електроспоживанням представляється у вигляді сукупності взаємопов'язаних відображень (рис. 1): де  $a_k$  — блок реалізації  $k$ -ї функції системи;  $f_k$  — функція відображення для  $a_k$ -го блоку;  $C$  і  $C_k$  — умови реалізації всіх функцій і  $k$ -ї функції системи відповідно;  $O$  і  $O_k$  — організаційно-технічні засоби реалізації всіх функцій і  $k$ -ї функції системи відповідно;  $I$ ,  $I_k$  і  $I_{k+1}$  — інформаційні потоки системи, вхідні і вихідні потоки для  $k$ -го блоку.

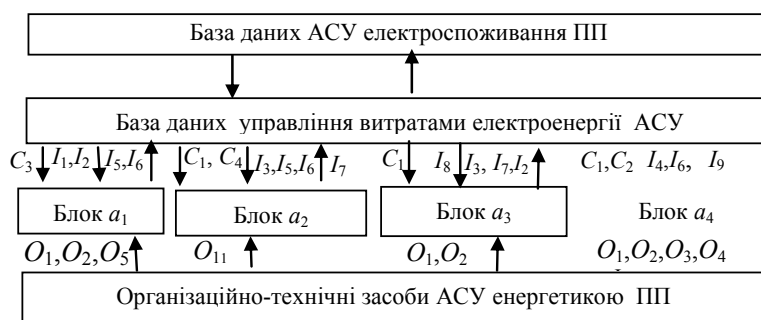


Рис. 1. Структура системи автоматизованого управління електроспоживанням промислового підприємства

Основні операції управління: блок  $a_1$  — реєстрація і перевірки на достовірність вимірювальної інформації; блок  $a_2$  — вибір моделі і прогнозування добової витрати електроенергії; блок  $a_3$  — нормування та планування електроспоживання; блок  $a_4$  — порівняння фактичного і запланованого електроспоживання, прийняття рішень по управлінню електроспоживанням;  $O_k = \{O_1, O_2, O_3, O_4, O_5\}$ , де  $O_1$  — інформаційно-обчислювальний комплекс (ІСК);  $O_2$  — енергодиспетчер;  $O_4$  — головний енергетик;  $O_5$  — датчики та вимірювальні пристрої;  $I_k = \{I_1, I_2, I_3, I_4, I_5, I_6, I_7, I_8, I_9\}$ , де  $I_1$  і  $I_5$  — середньодобова температура;  $I_2$  і  $I_6$  — електро-споживання;  $I_3$  — обсяги продукції;  $I_4$  — ліміт електроспоживання;  $I_7$  і  $I_8$  — прогнозні і планові значення електроспоживання;  $I_9$  — прийняті рішення з управління електроспоживанням.

При побудові системи управління електроспоживанням доцільно використати метод розпізнавання станів СЕС, доповнюваний методами ідентифікації станів СЕС із застосуванням нейро-нечіткої мережі та оптимізації станів СЕС на основі генетичного алгоритму.

**Висновки.** Для побудови системи управління використанням електричної енергії необхідно створення моделей, методів, програмного та інформаційного забезпечення управління електричним навантаженням споживачів та режимами систем електропостачання з метою їх оптимізації.

#### Література

1. Д. Рутковская. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы / Д. Рутковская, М. Пилиньский, Л. Рутковский. — М: Горячая линия-Телеком, 2006. — 452 с

УДК 621.391

**М.В. Чернецький**, аспірант, Нац. ун-т харчових технологій, [nickchernetski@mail.ru](mailto:nickchernetski@mail.ru)

## ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА ОБРОБКА ІНФОРМАЦІЇ В ПІДСИСТЕМІ ТЕХНОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ ПРОЦЕСУ ВАРКИ СУСЛА

Наведено загальний опис підсистеми моніторингу варочного відділення пивзаводу, основні етапи обробки інформації про об'єкт управління із використанням інтелектуального аналізу даних.

*Ключові слова:* підсистема моніторингу процесу; обробка і аналіз даних.

Приведены общее описание подсистемы мониторинга варочного отделения пивзавода, основные этапы обработки информации об объекте управления с использованием интеллектуального анализа данных.

*Ключевые слова:* подсистема мониторинга процесса; обработка и анализ данных.

The general description of the subsystem to monitor cooker branch brewery, the main stages of information processing facility management using data mining

*Keywords:* subsystem monitoring the ptoessing; analysis of data.

Варочне відділення пивзаводу — найважливіша частина виробництва пива. Якість роботи цього відділення відображається на якісних і кількісних показниках кінцевого продукту. Тому ефективне управління даним процесом неможливе без створення сучасної системи моніторингу [1].

Для створення системи моніторингу розроблений комплекс інформаційних моделей, що включає в себе обробку інформації, її передачу, збереження і відображення.

Основними задачами моніторингу є видалення аномальних вимірювань, відновлення пропусків даних, їх фільтрація на основі вейвлет-аналізу [2], фрактальне прогнозування, оцінка ефективності прийнятих рішень по управлінню.

Інтелектуальний аналіз представлених даних дозволив визначити атрактивні стани технологічного об'єкта управління варки сусли, зокрема, завдяки аналізу результатів моделювання кінетики процесів гідролізу пивних заторів методами нелінійної динаміки.

Використання підсистеми технологічного моніторингу підвищує ефективність рішень по визначенню і усуненню проблемних ситуацій технологічного процесу приготування пивного сусли, що дозволяє покращити якість продукції, підвищити продуктивність, знизити витрати ресурсів.

#### Література

1. Дворецкий С.И. Компьютерное моделирование и оптимизация технологических процессов и оборудования / С.И. Дворецкий, А.Ф. Егоров, Д.С. Дворецкий. — Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2003. — 224 с.

2. Алексеев К.А. Модели и алгоритмы вейвлет-обработки сигналов датчиков с применением лифтинга. Ч.1. Теоретические основы лифтинга, Ч.2. Численное моделирование / К.А. Алексеев // Датчики и системы, 2002, — № 1. С. 3 — 9. № 2. С. 2 — 5.

УДК 664.126.43:681.51

**Ю.В. Прокопенко**, здобувач,  
**А.П. Ладанюк**, д-р техн. наук, проф.,  
Нац. ун-т харчових технологій, м. Київ,  
yv\_prokopenko@ukr.net,

## ЗАСТОСУВАННЯ СЦЕНАРНО-СИТУАЦІЙНОГО ПІДХОДУ ПРИ УПРАВЛІННІ КОМПЛЕКСОМ ВАКУУМ-АПАРАТІВ ПЕРІОДИЧНОЇ ДІЇ

Розглядається застосування сценарно-ситуаційного підходу при розробці фреймової структури бази знань для системи управління комплексом вакуум-апаратів періодичної дії.

*Ключові слова:* вакуум-апарат; сценарно-ситуаційний підхід; фрейм; технологічний комплекс; база знань.

Рассматривается использование сценарно-ситуационного подхода при разработке фреймовой структуры базы знаний для системы управления комплексом вакуум-аппаратов периодического действия.

*Ключевые слова:* вакуум-аппарат; сценарно-ситуационный подход; фрейм; технологически комплекс; база знаний.

The application scenic-situational approach when developing frame structures knowledge base management system for complex vacuum pans Batch

*Keywords:* vacuum unit; scenario-situational approach; frame; technological complex; knowledge base.

Процес масової кристалізації цукру є найважливішою стадією промислового виробництва цукру. Від якості процесу кристалізації залежать всі основні показники роботи. Кристалізація цукру ведеться у вакуум-апаратах періодичної дії в автоматичному режимі.

Основний процес утворення кристалів і їх подальше нарощування ведеться в вакуум-апараті. На виробництві застосовуються декілька вакуум-апаратів (від чотирьох до восьми), які об'єднуються в технологічні комплекси. Всі вакуум-апарати працюють по типовій програмі. Для підвищення ефективності процесу необхідно координувати роботу комплексу.

Застосований сценарно-ситуаційний підхід для побудови системи управління вакуум-апаратом і координації комплексу дає можливість створення загальної бази знань стану процесу, яка є еталоном роботи вакуум-апарата і комплексу.

Використовуючи сценарно-ситуаційний підхід розроблено бази знань з використанням фреймових структур, як бази знань опису процесу, опису роботи комплексу вакуум-апаратів, фреймів ситуаційного стану і управління вакуум-апарата (фрейм індивідуальний) і комплексу (фрейм груповий), фреймів розв'язання конфліктів.

Використання сценарно-ситуаційного підходу для управління комплексом вакуум-апаратів дає можливість підвищити якість технологічного процесу і забезпечити взаємодію всіх технологічних комплексів заводу.

### Література

1. Ладанюк А.П. Основи системного аналізу: Навчальний посібник. Монографія / А.П. Ладанюк. — Вінниця: Нова книга, 2004. — 176 с.
2. Петровский А.Б. Теория принятия решений: Монография / А.Б. Петровский. — М.: Академия, 2009. — 400 с.

УДК 519.6:512.972, 004.27

І.А. Клименко, канд. техн. наук, доц., Нац. техн.  
ун-т України «КПІ», iklymenko@yandex.ua

## АПАРАТНІ ЗАСОБИ ПРИСКОРЕННЯ РЕКОНФІГУРАЦІЇ В РЕКОНФІГУРОВАНИХ ОБЧИСЛЮВАЛЬНИХ СИСТЕМАХ

Запропоновані апаратні засоби ефективної підтримки розкладу зберігання конфігурацій апаратних задач на локальному рівні обчислювального модуля, які забезпечують зменшення непродуктивних комунікаційних витрат часу реконфігурації з врахуванням обмежень апаратних ресурсів кристалу ПЛІС.

*Ключові слова:* реконфігуровані обчислювальні системи; накладні видатки ре конфігурації; прискорення ре конфігурації; ПЛІС.

Предложены аппаратные средства эффективной поддержки расписания хранения конфигураций аппаратных задач на локальном уровне вычислительного модуля, которые обеспечивают сокращение непродуктивных расходов времени реконфигурации с учетом ограничений аппаратных ресурсов кристалла ПЛИС.

*Ключевые слова:* реконфигурованные вычислительные системы; накладные расходы реконфигурации; ускорение реконфигурации; ПЛИС.

The efficient hardware support of the storage schedule of hardware tasks configuration at the local level of the computing module is proposed, which provide a removing overhead part-time reconfiguration considering of the restrictions of the hardware resources FPGA.

*Keywords:* reconfigurable computer systems; reconfiguration overhead; rapid configuration; FPGA.

Найбільшим негативним фактором, що впливає на продуктивність обчислень за динамічної реконфігурації часу виконання в реконфігурованих обчислювальних системах (РОС) [1, 2] є накладні витрати реконфігурації, критичною складовою яких є непродуктивні витрати часу на забезпечення процесу реконфігурації. Використання часткової динамічної реконфігурації [3] забезпечує значне прискорення реконфігурації, але непродуктивні витрати часу і обмежені апаратні ресурси все ж залишаються вагомим проблемою, що впливає на досягнення високої продуктивності обчислень, обумовлюючи актуальність аспекту зменшення накладних витрат реконфігурації в сфері високопродуктивних реконфігурованих обчислень. Переважна кількість відомих рішень цієї проблеми базуються на програмному або експериментальному моделюванні процесу реконфігурації, часто абстраговано від фізичної сторони реалізації [1, 2], або навпаки є суто технічними рішеннями, що потребують додаткового рішення задач планування та розміщення [1]. На підставі цього стає задачею розробки нових методів та засобів зменшення непродуктивних витрат часу реконфігурації, які відповідають наступним вимогам: зменшення програмної складової рівня операційної системи для рішення задач планування та розподілу, забезпечення механізмів зменшення накладних витрат, збільшення апаратної складової реалізації з врахуванням особливостей фізичного рівня реконфігурації, врахування обмежень апаратних ресурсів кристалів ПЛІС.

Для забезпечення механізму повторного використання ресурсів, ціллю якого є зменшення непродуктивних комунікаційних витрат часу реконфігурації, запропоновано новий спосіб збереження конфігурацій апаратних задач, за якого найчастіше затребувані з них зберігаються в заздалегідь зконфігурованому вигляді на поверхні реконфігурованої області ПЛІС [1]. Окрім прискорення реконфігурації цій спосіб забезпечує зберігання ресурсів внутрішньої пам'яті ПЛІС. Апаратні задачі, що затребувані з найменшою частотою, зберігаються у вигляді файлів конфігураційних даних в зовнішній швидкодіючій пам'яті. Для забезпечення розкладу зберігання ресурсів апаратних задач за підтримки механізму повторного використання апаратних ресурсів запропонована багаторівнева швидкодіюча пам'ять конфігурацій, що реалізована засобами декількох прошарків кеш-пам'яті між центральною бібліотекою конфігурацій і рекон-

фігурованою структурою мікросхеми ПЛІС [1]. Кеш першого рівня, реалізований на борту кристалу ПЛІС поряд з реконфігурованою структурою, застосовується для збереження слів стану, зконфігурованих на поверхні реконфігурованої області апаратних задач. Слово стану зберігає просторову інформацію, щодо розташування апаратної задачі, лічильники часу й бонусів зберігання, прапори та іншу функціональну інформацію. Другий рівень розміщується в безпосередній близькості до мікросхеми ПЛІС, що дозволяє максимально мінімізувати комунікаційні витрати, наприклад у локальній зовнішній пам'яті конфігурації обчислювального модуля (ОМ). Збереження в кеш-пам'яті другого рівня раніш створеного на слова стану забезпечує прискорення пошуку та повторного розміщення на кристалі конфігурацій апаратних задач.

Контролер реконфігурації (КР), який локалізує виконання фізичної послідовності реконфігурації, розвантажуючи локальний управляючий процесор ОМ, видає адресу пошуку конфігурації апаратної задачі, яка поступає на адресні входи блоків кеш-пам'яті, ініціюючи процедуру пошуку відповідних конфігурацій апаратних задач. Значним чинником в прискоренні реконфігураційного процесу є запропонована апаратний спосіб реалізації процедури пошуку конфігурації апаратної задачі, яка здійснюється на рівні інтерфейсу кеш-пам'яті першого рівня засобами спеціалізованого блоку генератора адреси (ГА). Управління реалізоване на базі цифрового автомату з жорсткою логікою. Конфігурація апаратної задачі може бути знайдена, або на поверхні реконфігурованої області ПЛІС, або в локальній пам'яті конфігурацій ОМ. В залежності від чого КР обирає подальшу стратегію здійснення процедури реконфігурації. На рис. 1 зображені порівняльні залежності під час здійснення алгоритму пошуку засобами КР та запропонованими апаратним блоком ГА на рівні інтерфейсу КЕШ пам'яті. Апаратні засоби синтезовані на мові *Verilog*, розроблені та досліджені на базі налагоджувального стенду компанії *Altera* із вбудованою ПЛІС *Cyclone II EP2C35F672C6*. Для реалізації КР застосований програмоване процесорне ядро *Nios II Altera*. Таким чином, запропоновані апаратні засоби для підтримки розкладу зберігання конфігурацій апаратних задач забезпечують їх ефективне повторне використання, та за рахунок локалізації специфіки логічної та фізичної послідовності реконфігурації на апаратному рівні обчислювального модуля прозора для операційної системи сприяють підвищенню ефективності розподілу динамічних наборів задач на гнучку фізичну структуру, надають РОС властивості мобільності та універсальності. Апаратне прискорення та реалізація швидкодіючих прошарків КЕШ пам'яті забезпечують додаткову степінь прискорення реконфігурації в середньому в 1,5 разів.

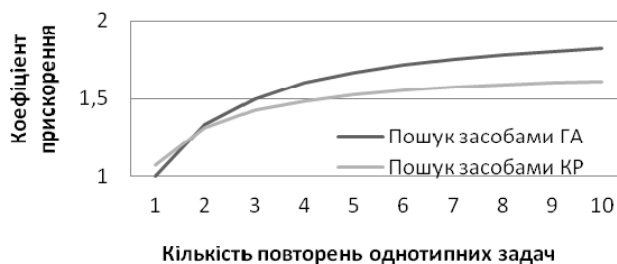


Рис. 1. Залежність коефіцієнту прискорення від кількості повторів однотипних задач в обчислювальному алгоритмі

## Література

1. Кулаков Ю.О. Організація багаторівневої пам'яті в реконфігурованих обчислювальних системах // Ю.О. Кулаков, І.А. Клименко / Вісник НТУУ «КПІ». Інформатика, управління та обчислювальна техніка: Зб. наук. пр. — К.: Век+, 2014. — № 61. — С. 18 — 26.
2. Huang M. Reconfiguration and Communication-Aware Task Scheduling for High-Performance Reconfigurable Computing / M. Huang, V.K. Narayana, H. Simmler, O. Serres, T. El-Ghazawi // Transactions on Reconfigurable Technology and Systems (TRETTS). — US, NY, New York, ACM, 2010. — Vol. 3, Issue 4, Article № 20.
3. Клименко І.А. Класифікація обчислювальних систем на ПЛІС та визначення найбільш ефективних технологій проектування / І.А. Клименко, М.В. Рудницький // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. — Вінниця: КІВЦ ВНТУ, 2014.

УДК 007.52

Р.М. Сокол, аспірант, Нац. ун-т харчових техно-  
логій, sokolrm@ukr.net

## ВИКОРИСТАННЯ НЕЧІТКОГО МОДЕЛЮВАННЯ В УПРАВЛІННЯ ПРОДУКТОВИМ ВІДДІЛЕННЯМ ЦУКРОВОГО ЗАВОДУ

Розглянуто використання одного з методів інтелектуального управління технологічними процесами продуктового відділення цукрового заводу на основі нечіткої логіки, яка забезпечує відносно простий шлях управління складних для опису слабоформалізованих процесів.

*Ключові слова:* інтелектуальне управління; нечітка логіка; функції належності.

Рассмотрено использование одного из методов интеллектуального управления технологическими процессами продуктового отделения сахарного завода на основе нечеткой логики, которая обеспечивает относительно простой путь управления сложных для описания слабоформализованных процессов.

*Ключевые слова:* интеллектуальное управление; нечеткая логика; функции принадлежности.

Considered using one of the methods of intelligent control of technological processes in the food department of the sugar factory based on fuzzy logic, which provides a relatively simple way to control difficult to describe formalized processes.

*Keywords:* intelligent control; fuzzy logic; membership functions.

Технологічні процеси уварювання та кристалізації, які проводяться у продуктовому відділенні цукрового заводу, — завершальний етап виробництва цукру.

Використання класичних методів для управління складним динамічним об'єктом, яким є продуктове відділення цукрового заводу, істотно обмежується труднощами формування єдиного критерію, що охоплює різні, а в деяких випадках і суперечливі вимоги. Так, наприклад, при вирішенні практичних завдань часто необхідно оптимізувати швидкодню уварювання утфелю і мінімізувати енергетичні.

В останні роки нечітке моделювання є одним з найбільш активних та перспективних напрямків прикладних досліджень в області управління та прийняття рішень. Нечітке моделювання є найбільш корисним, коли в описі технічних систем присутня невизначеність, яка ускладнює або виключає використання точних кількісних методів та підходів [1].

Проведені дослідження ставили за мету розробку нечіткої системи логічного висновку для технологічної схеми уварювання та центрифугування утфелю I кристалізації продуктового відділення цукрового заводу.

Для досягнення поставленої мети вирішувалися наступні задачі:

- проведення декомпозиції продуктового відділення, як складної технологічної системи;
- визначення основних вхідних та вихідних змінних для побудови функцій належності;
- визначення нечітких правил управління;
- отримання поверхонь відгуку об'єкта управління.

Для детального опису продуктового відділення проведено аналіз об'єкта автоматизації, виділено підсистеми, визначено основні технологічні режими, контролюючі та управляючі змінні для кожної підсистеми. З цією метою використано методологію IDEF0. Основна мета моделювання — описати функціонування продуктового відділення цукрового заводу. В процесі декомпозиції була отримана IDEF0-діаграма I кристалізації, представлена на рис. 1.

Для реалізації нечіткого моделювання на основі нечіткої логіки проведено лінгвістичну апроксимацію вхідних та вихідних технологічних змінних [2].

Побудовано базу знань на основі нечітких продукційних правил. Отримано множину правил, які зв'язують лінгвістичні значення вхідних і вихідних змінних.

На рис. 2 зображено одну з отриманих поверхонь відгуку нечіткого моделювання, що вибудовується на основі продукційних правил.



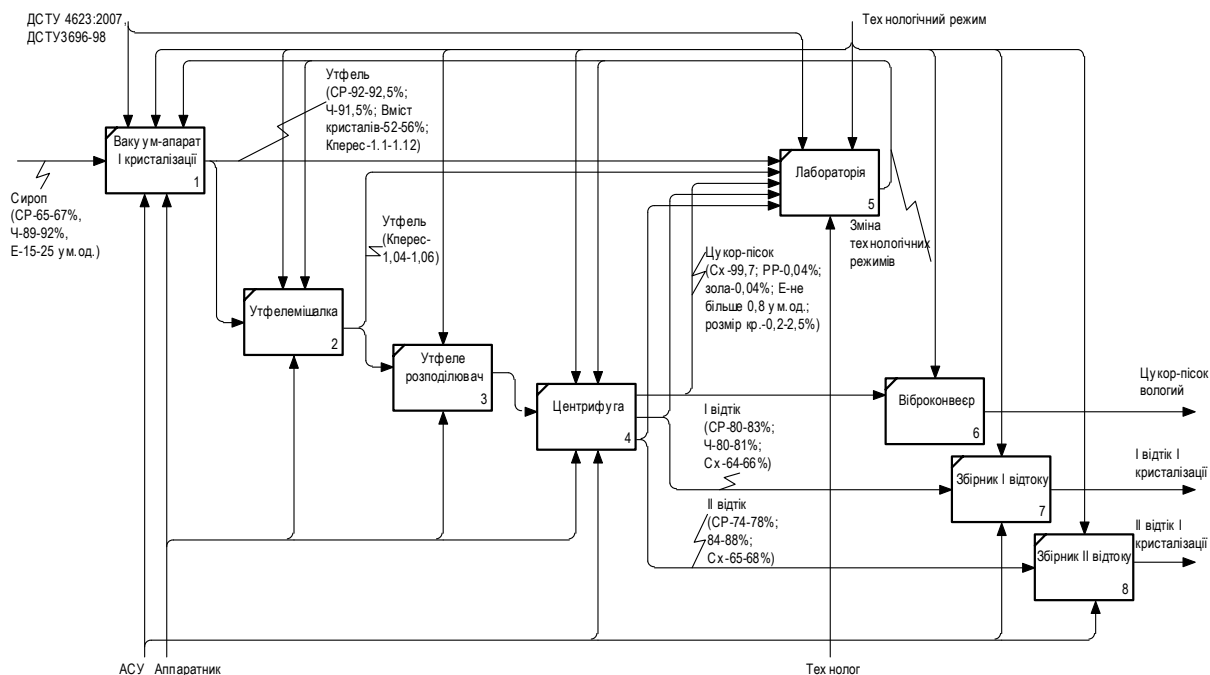


Рис. 1. Декомпозиція процесу уварювання та центрифугуванні утфелю I кристалізації

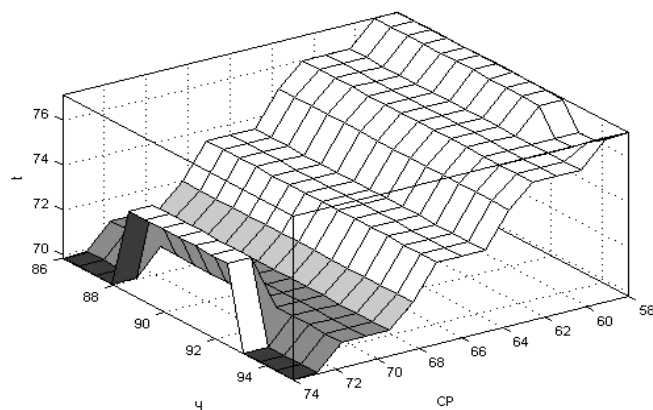


Рис. 2. Поверхня відтоку залежності температури у вакуум-апараті від вмісту сухих речовин та чистоти сиропу на уварювання утфелю I кристалізації

Впровадження інтелектуальних технологій для автоматизації продуктового відділення цукрового заводу дозволить забезпечити оптимальні показники функціонування технологічного процесу, оперативно та своєчасно реагувати на зміни стану об'єкта управління, формувати ефективні управляючі дії.

#### Література

1. Ладанюк А.П. Задачі управління технологічним комплексом в умовах ситуаційної невизначеності / А.П. Ладанюк, Я.В. Смітюх // Міжнар. наук.-техн. конф. цукровиків України «Конкурентоспроможність українського цукру на національному та світовому ринках — вимога часу», 25-27 березня: тези доп. — К.: НУХТ. — 2014. — С. 149 — 151.
2. Соловьев В.А. Искусственный интеллект в задачах управления. Интеллектуальные системы управления технологическими процессами: учеб. пособие / В.А. Соловьев, С.П. Черный. — Владивосток: Дальнаука, 2010. — 267 с.

УДК 621-83 681.51

**В.Б. Зворыкин**, доц. канд. техн. наук,  
**А.И. Михалев**, д-р техн. наук, проф.,  
**Г.Ю. Станчиц**,  
Нац. металлург. акад. Украины, stanchyts@mail.ru

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ В СИСТЕМАХ РЕГУЛИРОВАНИЯ СКОРОСТИ ПРИ НАЛИЧИИ УПРУГОЙ СВЯЗИ ДВИГАТЕЛЯ С МЕХАНИЗМОМ И БОЛЬШОМ СООТНОШЕНИИ ИНЕРЦИОННЫХ МАСС

Исследованы способы настройки контура скорости при наличии упругой связи двигателя с механизмом и большом соотношении инерционных масс. Предложен способ расчета параметров регулятора скорости. Получены переходные процессы изменения скорости исполнительного органа, близкие к настройке на модульный оптимум.

*Ключевые слова:* система автоматического управления электроприводом; упругая кинематическая связь двигателя с нагрузкой; переходные процессы.

Досліджено способи налаштування контуру швидкості при наявності пружного зв'язку двигуна з механізмом і великому співвідношенні інерційних мас. Запропоновано спосіб розрахунку параметрів регулятора швидкості. Отримані перехідні процеси зміни швидкості виконавчого органу, близькі до налаштування на модульний оптимум.

*Ключові слова:* Система автоматичного керування електроприводом; пружна кінематична зв'язок двигуна з навантаженням; перехідні процеси.

We explored ways to set the speed loop in the presence of an elastic connection with the motor mechanism and a large proportion of the inertial mass. A method for calculating the parameters of the speed controller. Obtained transients changing the speed of the executive body, close to the optimum setting for the module.

*Keywords:* Automatic control electric; elastic kinematic relationship engine load transients.

При моделировании переходных процессов в системах автоматического управления (САУ) электроприводом часто полагают, что кинематическая связь между двигателем и исполнительным органом не подвержена упругим деформациям. Однако в отдельных случаях коэффициент жесткости механических звеньев оказывается относительно небольшим, упругость и деформации звеньев становятся существенными, что значительно изменяет характер движения электропривода. Такую систему необходимо рассматривать как двухмассовую САУ скорости с учетом влияния упругости и зазоров в механических звеньях на движение электропривода.

Настройка контура скорости зависит от величины соотношения инерционных масс системы  $\gamma$ .

В результате моделирования установлено, что при больших коэффициентах инерции  $\gamma > 5,8$  изменение скорости исполнительного органа при пуске происходит без перерегулирования. В этих случаях целесообразно выбирать коэффициент усиления регулятора скорости  $k_{pc}$  так, чтобы коэффициент демпфирования составлял  $\xi_s = 0,707$ . Это позволит увеличить быстроедействие САУ скорости.

Этого можно достичь как уменьшением  $k_{pc}$ , так и его увеличением. В первом случае переходный процесс будет более длительным, чем при расчетном значении  $k_{pc}$ . Поэтому практический интерес представляет второй случай.

Получено выражение, связывающее коэффициент инерции  $\gamma$  и коэффициент демпфирования  $\xi_s = 0,707$  с требуемой величиной  $k_{pc}$ .

Показано:

— Учет демпфирующего действия контура тока приводит к снижению перерегулирования.

— Учет вязкого трения снижает результирующий момент. В результате уменьшается интенсивность протекания переходных процессов и возникает статическая ошибка регулирования.

— Поскольку привод имеет большие инерционные массы, темп изменения скорости при разгоне будет низким. В результате внутренняя обратная связь по ЭДС выражена слабо и ее компенсация не оказывает существенного влияния на качество переходных процессов

#### Литература

1. Зворыкин В.Б. Моделирование процесса регулирования скорости в двухмассовой системе с упругими связями / В.Б. Зворыкин, А.И. Михалев, Г.Ю. Станчиц, М.В. Губинский // Математическое моделирование. — Вып. 2(29). — Днепропетровск, ДГТУ — 2013.

УДК 681.523

А.Ю. Мезеря, канд. техн. наук, доц., Украинская  
инж.-педагог. акад., mezzar@mail.ru

## ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕГО УПРАВЛЕНИЯ НАГНЕТАТЕЛЬНЫМИ УСТАНОВКАМИ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

У роботі проведено аналіз і обробка даних експериментального дослідження нагнітачів Зміївської ТЕС. Показано можливий економічний ефект при використанні алгоритмів енергозберігаючого керування нагнітачами та визначено закон такого керування.

*Ключові слова:* насос; вентилятор; енергозбереження; автоматизована система керування.

В работе проведен анализ и обработка данных экспериментального исследования нагнетателей Змиевской ТЭС. Показан возможный экономический эффект при использовании алгоритмов энергосберегающего управления нагнетателями и определен закон такого управления.

*Ключевые слова:* насос; вентилятор; энергосбережение; автоматизированная система управления.

In work is organized analysis and data processing the experimental study of the superchargers Zmievskoj TES. Possible economic effect is shown when use algorithm energysave management supercharger and is determined law of such management.

*Keywords:* pump; the ventilator; energysave; the automatic managerial system.

Основными потребителями собственных нужд тепловых и атомных электростанций являются насосы и вентиляторы (нагнетатели). К основным (мощным) из них относятся главные циркуляционные насосы (АЭС), питательные насосы (ТЭС), циркуляционные насосы, дымососы, дутьевые вентиляторы и др. На их долю приходится до 70 % всей потребляемой мощности собственных нужд.

Основная научная проблема создания энергосберегающих систем управления нагнетательными установками состоит в построении точных математических моделей энергетических процессов и объектов, в определении и минимизации функций энергетических потерь, в синтезе алгоритмов управления, которые реализуют в реальном времени режимы работы нагнетателей с минимальными потерями энергии.

В работах [1 — 4] изложены основные теоретические принципы автоматизированного энергосберегающего управления нагнетательными установками электростанций, показаны алгоритмы, функциональные и структурные схемы такого управления.

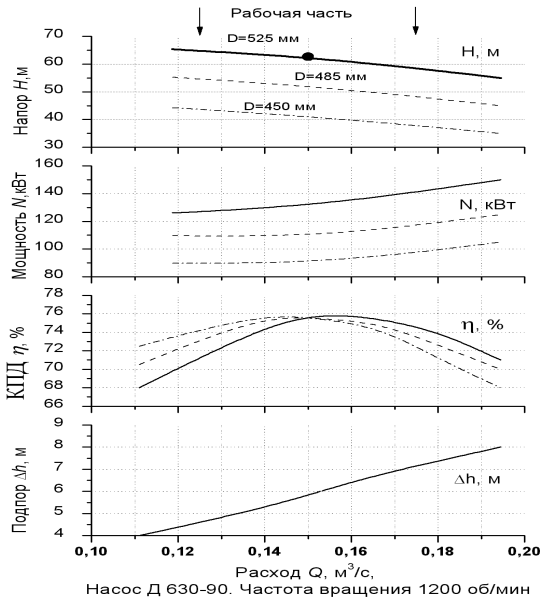


Рис. 1. Энергетические характеристики основных нагнетателей

С целью оценки практической эффективности предложенных решений, был проведен ряд экспериментов и получены энергетические характеристики основных нагнетателей Змиевской ТЭС, в частности, питательный насос, циркуляционный насос, дымосос, насос двухстороннего входа (рис. 1) и дутьевой вентилятор.

Результаты экспериментальных исследований показали работоспособность алгоритмов автоматизированного энергосберегающего управления нагнетателями, изложенных в [1 — 4] и экономическую целесообразность их использования.

Годовой экономический эффект для циркуляционного насоса (мощность циркуляционного насоса 1700 кВт) составляет 200...500 тыс.грн./год, годовой экономический эффект для насоса 250 кВт составляет 50 тыс.грн./год, а для дутьевого вентилятора (мощность 360 кВт) — до 35 тыс.грн./год.

Суммарный экономический эффект для блока 300 МВт составит порядка 1000 тыс.грн./год.

Сравнение потерь при дросселировании и 3-х ступенчатом частотном управлении для насоса Д 630-90:

	Расход $Q$ , м <sup>3</sup> /с				
	0,111	0,139	0,153	0,167	0,181
Потери при дросселировании, кВт	28,6	31,25	36,42	39,4	47,4
Потери при 3-х ступенчатом частотном управлении, кВт	14,28	17,5	26,8	—	—
Разница потерь, кВт	14,32	13,75	9,62	—	—
Годовой экономический эффект, грн	58 000	55 687	38 961	—	—

Литература

1. Энергосберегающее управление и повышение технико-экономической эффективности насосных установок тепловых и атомных электростанций / Г.И. Канюк, А.Ю. Мезеря, А.Р. Фокина и др. // Східно-Європейський журнал передових технологій. — Харків. — 2012. — №. 3/8 (57). — С. 58 — 62.
2. Резервы энергосберегающего управления технологическими процессами на действующих ТЭС и АЭС / Г.И. Канюк, А.Ю. Мезеря, Д.В. Михайский и др. — Харьков: Точка, 2012. — 184 с.
3. Научные принципы энергосбережения в тепловой и атомной энергетике / Г.И. Канюк, С.Ф. Артюх, А.Ю. Мезеря и др. — Харьков: Точка, 2013. — 140 с.
4. Канюк Г.И. Модель энергосберегающего управления нагнетательными установками тепловых электростанций / Г.И. Канюк, А.Ю. Мезеря, И.П. Лаптинов // Вісн. НТУ «ХПІ»: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. — № 12(1055), 2014. — С. 90 — 97.

УДК 621.039.56:681.5

Т.А. Цисельская, канд. техн. наук,  
М.В. Никольский, аспирант,  
Одес. нац. политехн. ун-т, bela\_donna@mail.ru

## АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ ЭНЕРГБЛОКА С ВВЭР–1000 ПРИ МАНЕВРИРОВАНИИ МОЩНОСТЬЮ В РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ ЭКСПЛУАТАЦИИ.

Умовою надійної та безпечної роботи енергоблоку АЕС є підтримка постійної величини аксіального офсету, для цього вперше було запропоновано стабілізувати температуру теплоносія на вході в активну зону реактора, а також зменшити амплітуду переміщення регулюючої групи ОР СУЗ.

*Ключевые слова:* автоматизована система керування; управління офсетом; енергоблок атомної станції; спосіб управління.

Условием надежной и безопасной работы энергоблока АЭС является поддержание постоянной величины аксиального офсета, для этого впервые было предложено стабилизировать температуру теплоносителя на входе в активную зону реактора, а также уменьшить амплитуду перемещения регулирующей группы ОР СУЗ.

*Ключевые слова:* автоматизированная система регулирования; управление офсетом; энергоблок атомной станции; способ управления.

A condition of the successful and safe operation of the nuclear power plant is to maintain a constant axial offset, for this for the first time was proposed to stabilize the temperature of the coolant at the inlet of the reactor core, as well as to reduce the amplitude of movement of the regulatory group of control rods.

*Keywords:* automated control system; control of axial offset; NPP unit; control method, simulation model.

Сегодня преимущественно все энергоблоки эксплуатируются в стационарном режиме, хотя эксплуатация в маневренном режиме является более актуальной.

Из-за нелинейности изменения технологических параметров активной зоны при изменении уровня мощности реакторной установки возникают ксеноновые колебания, которые в ряде случаев могут привести к потере устойчивости ядерного реактора.

Таким образом, возникает задача усовершенствования существующей системы автоматического управления (САУ) мощностью энергоблока АЭС, которая позволит эксплуатировать энергоблок в маневренных режимах в течение суточного цикла без возникновения ксеноновых колебаний.

В работе были решены следующие задачи:

— проведен анализ изменения аксиального офсета в маневренных режимах за счет изменения различных характеристик активной зоны;

— оценено изменение аксиального офсета для программ регулирования, которые применяются в практике эксплуатации;

— на основе новой программы регулирования усовершенствована существующая система автоматического управления;

— проведен сравнительный анализ результатов численного моделирования суточного маневра мощностью энергоблока с реактором ВВЭР-1000 для систем автоматического управления.

Количественной мерой устойчивости реактора является величина АО. Показано, что в маневренных режимах наибольшее влияние на величину АО оказывают температурный  $\rho_t$  и мощностной  $\rho_Q$  эффекты реактивности, а также эффект реактивности, вносимый изменением концентрации отравителей (ксенона и йода) в топливе  $\rho_{Xe}$  [1].

Компенсировать это влияние можно двумя управляющими воздействиями, наносимыми на активную зону реактора: вводом/выводом борной кислоты в теплоноситель первого контура и перемещением регулирующей группы ОР СУЗ. Однако, так как ввод/вывод борной кислоты в теплоноситель первого контура процесс инерционный, а регулирующая группа ОР СУЗ, в виду конструктивных особенностей, не может повлиять на энерговыделение нижней половины ак-

тивной зоны реактора без влияния на верхнюю половину, то для дальнейшего исследования были рассмотрены как изменяются технологические параметры в разных программах регулирования [2].

Показано, что так как возмущение, которое наносится изменением температуры теплоносителя на входе в активную зону реактора является некомпенсируемым, для поддержания постоянного АО, необходимо чтобы  $t_{in} = \text{const}$  или  $J = \min \Delta t_{in}$ , а также показано, что необходимо, чтобы соблюдалось следующее  $J = \min \Delta H_{rod}$ .

Для исследования изменения АО в существующих САУ была разработана имитационная модель энергоблока, главной особенностью которой является десятизонная модель реактора [3].

Также была предложена усовершенствованная система автоматического управления мощностью энергоблока, функционирующая по программе регулирования с  $t_{in} = \text{const}$ . Главной особенностью этой программы регулирования является поддержание постоянной температуры теплоносителя первого контура на входе в активную зону реактора. Это позволило устранить ксеноновые колебания и стабилизировать нижнюю половину реактора.

На имитационной модели были реализованы САУ, функционирующие по представленным программам регулирования и проведен сравнительный анализ между ними. Анализ результатов сравнительного анализа показал, что при работе усовершенствованной САУ, которая функционирует по программе регулирования  $t_{in} = \text{const}$ , реактор имеет стабильный АО по сравнению с САУ, функционирующей по программе регулирования  $t_{med} = \text{const}$  и с САУ, функционирующей по программе регулирования  $P_{II} = \text{const}$ .

Таким образом, поскольку АО является количественной мерой устойчивости реактора, его постоянство на протяжении маневра свидетельствует о том, что аксиальные ксеноновые колебания не возникают и что при работе усовершенствованной САУ мощности энергоблока реактор находится в устойчивом состоянии.

### Литература

1. Maksimov M.V. The method of fuel rearrangement control considering fuel element cladding damage and burnup/ S.N. Pelykh, M.V. Maksimov // Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Physics of Radiation Effect and Radiation Materials Science. — 2013. — Iss. 5(87). — P. 24 — 36 .
2. Maksimov M.V. Theory of VVER-1000 fuel rearrangement optimization taking into account both fuel cladding durability and burnup / S.N. Pelykh, M.V. Maksimov // Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Physics of Radiation Effect and Radiation Materials Science. — 2013. — Iss. 2(84). — P. 50 — 54
3. Maksimov M.V. A model of a power unit with VVER-1000 as an object of power control / M.V. Maksimov, K.V. Beglov, T. A. Tsiselskaya // Пр. Одес. політехн. ун-ту. — Одеса, 2012. — Вип. 1(38). — С. 99 — 106.

UDC 519.711.3

N.D. Pankratova, Dts, professor, Institute for applied  
system analysis NTUU "KPI", natalidmp@gmail.com

## FORESIGHT AND FORECAST FOR PREVENTING AND RECOVERING AFTER SOCIAL DISASTERS DIFFERENT NATURE

Розглядаються методології передбачення та прогнозування для запобігання та відновлення після соціальних лих різної природи. Пропоновані підходи і методи можуть бути ефективно застосовані для моделювання та оцінювання заходів щодо запобігання і управління потенційними лихами і забезпечення підтримки прийняття рішень при катастрофічних ситуаціях. Розроблені підходи є дуже гнучкими при використанні в системах різної природи, таких як технічні, екологічні, соціальні, гуманітарні, економічні та інші. Розроблені інструменти дозволяють скоротити час, фінансові та людські ресурси при відновленні наслідків стихійних лих в умовах неточності, неповноти, нечіткості, несвоечасності, недостовірності і суперечливості інформації.

*Ключові слова:* передбачення; прогноз; сценарний аналіз; соціальне лихо; запобігання; відновлення; прийняття рішень.

Рассматриваются методологии предвидения и прогнозирования для предотвращения и восстановления после социальных бедствий различной природы. Предлагаемые подходы и методы могут быть эффективно применены для моделирования и оценивания мер по предотвращению и управлению потенциальными бедствиями и обеспечения поддержки принятия решений при катастрофических ситуациях. Разработанные подходы являются очень гибкими при использовании в системах различной природы, таких как технические, экологические, социальные, гуманитарные, экономические и другие. Разработанные инструменты позволяют сократить время, финансовые и человеческие ресурсы при восстановлении последствий стихийных бедствий в условиях неточности, неполноты, нечеткости, несвоевременности, недостоверности и противоречивости информации.

*Ключевые слова:* предвидение; прогноз; сценарный анализа; социальное бедствие; предотвращение; восстановление; принятия решений.

The methodology for foresight and forecast for preventing and recovering after social disaster different nature are considered. The proposed approaches and methods can be effectively applied for modelling and evaluation of measures to prevent and control potential disasters and provide decision-making support for disaster situations. Developed approaches are very flexible to use in systems of various nature, such as technical, environmental, social, human, economic and others. Developed tools allow reduce the time, financial and human resources for recovering from the effects of disasters in conditions under inaccuracy, incompleteness, fuzziness, untimeliness, noncredibility, and contradictoriness of information.

*Key words:* foresight; forecast; scenario analysis; social disaster; preventing; recovering; decision-making.

The practice of the last decades of the last century suggests that the risks of man-made and natural disasters with the consequences of regional, national and global scale are continuously increasing, that is due to various objective and subjective conditions and factors.

In this paper the methodology for scenario analysis regarding the field of social disasters is applied. The mathematical forecast models are useful while the process is monotonous, which is rarely the case for social disasters. During social disasters, certain events can happen that significantly change the attitudes and sentiments of the involved sides of conflict, causing the usual forecasts to be incorrect or inaccurate. Moreover, social disasters can lead to other accidents and catastrophes. To analyze these cases in situations of uncertainty and multi-factor risks, a certain methodology called foresight is developed. In such cases it is advisable to apply modified qualitative methods of the foresight methodology (Delphi method, morphological analysis method, analytical hierarchy method) to develop models suitable for description of the social disasters [1,2]. The application of the proposed above methodologies and techniques to solve problems associated with environmental, technical and social disasters as a software tool is developed [3]. On the basis of system methodology using the foresight methods the project in direction of environmental and technical disasters was realized.

In this paper the integrated modeling tools of modeling and microbiological technologies for restoration of oil-polluted soils and water bodies are proposed. Application of this tools on the stage of modeling allows to determine the geometrical parameters of pollution, its density, concentration, rate

of distribution, to study the forecast and foresight of the spread of contamination and then to efficiently solve the problem of calculating the required volume and concentration of the sorbent. As soon as the stage of modeling is fulfilled and the required volume of the sorbent is defined the stage of the sorbent production is carried out. The only feasible way of dealing with oil spills nowadays is a complex of measures, including modelling, new technology, safety, low cost and high effect [4].

Analysis of accidents and catastrophes can identify the most important causes and weaknesses of control principles for survivability and safety of complex engineering objects (CEO). One of such reasons is the peculiarities of the functioning of the diagnostic systems aimed to identify failures and malfunctions. This approach to safety precludes a possibility of a priori prevention of abnormal modes and as a consequence, there is the possibility of its subsequent transition into an accident and catastrophe. Here a strategy that is based on the conceptual foundations of systems analysis, multicriteria estimation and risk forecasting is proposed [5, 6]. The essence of the proposed concept is the replacement of a standard principle of identifying the transition from operational state of the object into inoperable one on the basis of detection of failures, malfunctions, defects, and forecasting the reliability of an object by a qualitatively new principle. The essence of this principle is the timely detection and elimination of the causes of an eventual transition from operational state of the object into inoperable one on the basis of systems analysis of multifactorial risk of abnormal situations, a reliable estimation of margin of permissible risk of different modes of complex engineering objects operation, and forecast the key indicators of the object survivability in a given period of its operation.

The proposed strategy of system coordination of survivability and safety engineering objects operation, implemented as a tool of information platform of engineering diagnostics of the complex objects, ensures the prevention of inoperability and the danger of object's functioning. By force of systematic and continuous evaluation of critical parameters of object's functioning in the real time mode, the reasons, which could potentially cause the object's tolerance failure of the functioning in the normal mode, are timely revealed. For situations, development of which leads to possible deviations of parameters from the normal mode of the object's functioning, it is possible timely to make a decision about the change of the operation mode of the object, or an artificial correction of the parameters to prevent the transition from the normal mode into the abnormal one, accident and catastrophe. The used principles provide the flexible approach to timely detection, forecasting and system diagnosis of factors and risk situations, formation of sustainable solutions during the acceptable time within the fatal time limit.

## References

1. Pankratova N. Estimation of Sensitivity of the DS. AHP Method While Solving Foresight Problems with Incomplete Data / N. Pankratova, N. Nedashkovskaya // *Intelligent Control and Automation*. — 2013, V. 4(1). — pp. 80 — 86.
2. Pankratova N.D. A system approach to solving foresight problems on the basis of Delphi method / N.D. Pankratova, L.Y. Malafeeva // *International Journal. «Information technologies&knowledge»*. ITHEA. SOFIA. — 2013. V.7, № 4. — pp. 313 — 324.
3. Zgurovsky M.Z. System analysis: Theory and Applications / M.Z. Zgurovsky, N.D. Pankratova. — Springer, 2007. — 475 p.
4. Pankratova N. Integrated tools for restoration of oil polluted soils and water bodies / N. Pankratova, L. Khokhlova // *International Journal «Information theories&applications»*. — ITHEA. SOFIA. — 2012. — V.12, № 1. — pp. 39 — 49.
5. Pankratova N.D. System strategy for guaranteed safety of complex engineering systems / N.D. Pankratova // *Cybernetics and Systems Analysis*. — 2010. — V. 46, №2. — pp. 243 — 251.
6. Pankratova N.D. Safety operations of the complex engineering objects / N.D. Pankratova // *International Journal. «Information technologies&knowledge»*. ITHEA. SOFIA, — 2011. — V. 5, № 2. — pp.152 — 167.



УДК 681.51

М.В. Левинский, аспирант, Одес. нац. акад. пи-  
щевых технологий, maxlevinskiyi@gmail.com

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ОБЪЕКТАМИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ТИПА

У доповіді розглядаються особливості технологічних об'єктів як об'єктів керування, а також можливі шляхи удосконалення алгоритмів самоналаштування та адаптації керуючих пристроїв для подальшого використання в промислових системах керування.

*Ключові слова:* адаптація; самоналаштування; алгоритм.

В докладе рассматриваются особенности технологических объектов как объектов управления, а также возможные пути совершенствования алгоритмов самонастройки и адаптации управляющих устройств для последующего использования в промышленных системах управления.

*Ключевые слова:* адаптация; самонастройка; алгоритм.

The report examines the specifics of technological objects as control objects, as well as possible ways to improve the self-tuning algorithms and adaptation of control devices for further use in industrial control systems.

*Keywords:* adaptation; autotuning; algorithm.

Самонастройка регуляторов является безальтернативным инструментом сохранения принятого компромисса между показателями качества и устойчивости процессов в системах автоматического управления (САУ) объектами любой природы, для которых характерен высокий уровень нестационарности их свойств как объектов управления (ОУ). Вместе с тем, возможность и эффективность использования разных принципов самонастройки существенно зависит именно от конкретных особенностей ОУ.

Цель настоящего доклада — охарактеризовать особенности технологических объектов как ОУ, а также возможные пути совершенствования алгоритмов самонастройки и адаптации управляющих устройств для последующего использования в промышленных системах управления.

В целом все ОУ можно разделить на две группы: 1) «нетехнологические», куда входят ОУ электротехнического (электропривод), механического (манипуляторы), электронного (усилители и фильтры радиотехнических устройств), мобильного (транспортные средства) типов; 2) «технологические», куда входят технологические и энергетические установки и агрегаты (далее — ТА).

Особенности ОУ первой группы:

1.1) низкая интенсивность внешних возмущений на ОУ и высокая интенсивность изменения задающих переменных САУ;

1.2) высокий уровень обусловленности всех причинно-следственных связей, включая параметрические, который позволяет аналитическими методами получать математические модели ОУ высокого уровня адекватности;

1.3) отсутствие запаздывания в каналах управления ОУ.

Особенность «1.1» позволяет часть задач самонастройки решать на основе разомкнутого принципа управления, т.е. с использованием информации о текущем состоянии ОУ, а это обеспечивает высокое быстродействие самонастройки и минимальное негативное влияние этого процесса на основной процесс управления.

Особенности «1.1» и «1.2» позволяют качественно решать задачи самонастройки на основе эталонной модели САУ, а, дополнительно, «1.3» - на основе модели самонастройки ОУ.

Особенности ОУ второй группы:

2.1) очень низкая интенсивность изменения задающих переменных САУ и большое количество интенсивно изменяющихся внешних возмущений, которые достаточно существенно влияют на работу ТА, но практически недоступны для измерения (характеристики сырьевых

потоков, состояние рабочих органов и активных зон ТА), которые одновременно часто изменяют значения управляемых переменных, а также свойства каналов управления и оптимальные режимы работы ТА (т.е. для ТА разделение возмущений на координатные и параметрические достоточно условное);

2.2) высокий уровень неопределенности причинно-следственных связей между переменными, особенно параметрических, что обуславливает невозможность получения моделей этих связей с достаточно высоким уровнем адекватности;

2.3) физическая распределенность каналов управления ОУ, что проявляется в значительных запаздываниях реакции управляемых переменных на управляющие влияния.

Особенности «2.1» и «2.2» принципиально не позволяют решать задачи самонастройки на основе эталонной модели САУ и делают малоэффективной самонастройку на основе модели ОУ, которая настраивается. Параметрическая оптимизация САУ в реальном времени малоэффективна из-за длительных переходных процессов, обусловленных «2.3», и негативным влиянием процесса поиска на основной процесс управления.

Сформулированные особенности объясняют почему, несмотря на значительный объем научно-исследовательских работ, до сих пор отсутствуют работоспособные алгоритмы самонастройки в библиотеках контроллеров, предназначенных для построения САУ ТА, в частности самонастройки ПИД регуляторов. Эти алгоритмы необходимы, чтобы для большого разнообразия ТА перевести задачу самонастройки из класса научно-исследовательских работ в класс инженерных. Ее решение следует искать, учитывая и формализуя в виде моделей, особенности движения САУ ТА в таких режимах, когда ее собственное движение превалирует над вынужденным.

Процесс самонастройки целесообразно проводить по инициативе оператора, используя режимы выхода САУ на рабочую нагрузку либо в ожидаемых случаях резких изменений нагрузки. Непрерывную адаптацию алгоритмов управления к изменяющимся свойствам объекта в установившихся режимах необходимо проводить беспойсковыми методами за счёт анализа составляющих вектора координат системы как случайных процессов.

Выводы: 1) особенности ОУ технологического типа требуют совершенствования известных и поиск новых алгоритмов самонастройки и адаптации алгоритмов САУ ТА;

2) разрабатываемые алгоритмы должны несущественно влиять на основной процесс управления.

### Литература

1. Techniques for adaptive control / Edited by Vance J. VanDoren // Butterworth-Heinemann. 2002. — p. 289.
2. Автоматизация настройки систем управления / В.Я. Ротач, В.Ф. Кузицин, А.С. Ключев и др.; Под ред. В.Я. Ротача. — М.: Энергоатомиздат, 1984. — 272 с.

УДК 007.51

С.В. Шевченко, канд. техн. наук, доц., Нац. техн.  
ун-т «ХПИ» sv-shevchenko@ukr.net

## ОПТИМИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫМИ СИСТЕМАМИ

Розглядаються питання оптимізації управління виробничими системами на різних рівнях ієрархії. Визначаються особливості обліку динамічних властивостей об'єкта управління, що дозволяє формувати послідовність керуючих впливів для його переходу в цільовий стан відповідно до обраного критерію оптимальності. Наведено результати розрахунків на прикладі енергоблоків ТЕС.

*Ключові слова:* оптимальне управління; виробничі системи; електростанція; енергоблок.

Рассматриваются вопросы оптимизации управления производственными системами на различных уровнях иерархии. Определяются особенности учета динамических свойств объекта управления, которые позволяют формировать последовательность управляющих воздействий для его перехода в целевое состояние согласно выбранного критерия оптимальности. Приведены результаты расчетов на примере энергоблоков ТЭС.

*Ключевые слова:* оптимальное управление; системы производства; электростанция; энергоблок.

Questions of management optimization of production systems at different levels of the hierarchy are considered. The characteristics of the dynamic properties of the object controls that let you create a sequence of control actions for its transition to the target state according to the chosen optimality criterion determined.. The results of calculations on the example of power units.

*Keywords:* optimal control; manufacturing systems; power; unit.

Учет динамических свойств объекта управления оказывает существенное влияние на эффективность процессов управления [1]. Будем считать, что состояние объекта управления описывается вектором  $Q(t)$ , компоненты которого представляют собой числовые и качественные характеристики состояния объекта управления в момент времени  $t$ . Переход объекта управления в состояние  $Q(t_n)$  в момент времени  $t_n$ ,  $t_n \geq t$ , может быть следствием воздействия управляющих параметров, образующих вектор  $Y(t)$ , и результатом выполнения существующих процессов в составе системе. Переход может быть представлен в виде:

$$Q(t_n) = F(t_n, Q(t), Y(t)), \quad (1)$$

где  $F(\ )$  — определенная векторная функция, идентифицирующая изменение состояния объекта управления под воздействием выделенных процессов.

В таком случае, целью оптимального управления можно считать формирование временной последовательности таких значений управляющих параметров, которые обеспечивают переход объекта управления в требуемое состояние с учетом значений выбранного критерия оптимальности. Процедуры оптимизации управления могут быть построены с использованием векторного критерия оптимальности или с построением множества эффективных решений и применением процедур многокритериальной оптимизации в зависимости от содержания и согласованности выбранных критериев.

Пусть  $\Omega(t)$  — множество, определяющее целевое состояние объекта управления на момент времени принятия решения  $t$ ;  $R_0(t)$  — доступные ресурсы для перевода объекта управления в целевое состояние;  $Y_0(t)$  — множество допустимых значений управляющих параметров.

Тогда, если задать  $E(Q(t_n), Q(t), Y(t))$  — вектор выбранных критериев оптимальности, то рассматриваемая задача оптимального управления может быть представлена в следующем виде.

Для заданного момента времени  $t$  найти вектор  $Y(t)$ , обеспечивающий

$$E(Q(t_n), Q(t), Y(t)) \rightarrow opt \quad (2)$$

при ограничениях

$$Q(t_n) = F(t_n, Q(t), Y(t)) \quad (3)$$

$$Q(t_n) \in \Omega(t) \quad (4)$$

$$R(\tilde{Q}(t_n), Q(t), Y(t)) \leq R_0(t) \quad (5)$$

$$Y(t) \in Y_0(t) \quad (6)$$

Применение рассматриваемой концепции управления производственными системами было рассмотрено на примере организации управления в электроэнергетической системе, нижний уровень которой предполагает формирование графика нагрузки энергоблоков для производства электроэнергии в соответствии с заданным спросом. Основным критерием оптимальности был выбран минимум суммарных затрат. Данная задача представлена задачей частично-целочисленного линейного программирования [2].

Результаты решения представлены на рис. 1 в виде графиков генерации электроэнергии.

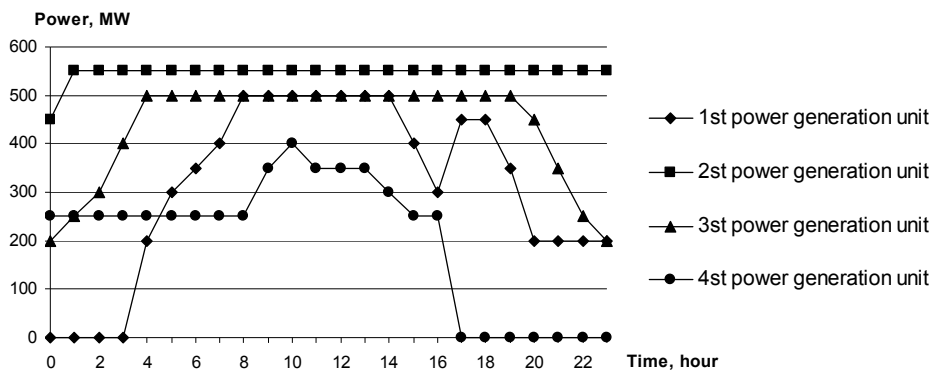


Рис. 1. Результаты решения задачи

Полученные результаты соответствуют определенным значениям критерия оптимальности в виде оценки минимальной суммарной стоимости выполнения заданного объема производства электроэнергии для каждого часа в течение суток. Результаты расчетов показывают, что применение данного подхода позволяет повысить эффективность управления сложными производственными системами, благодаря учету динамических свойств объекта управления.

### Литература

1. Шевченко С.В. О задачах совершенствования управления состоянием динамических производственных систем / С.В. Шевченко // Труды XLIII Межд. конф. IT + S&E'14. Запорожский национальный университет. — Запорожье, 2014. — С. 33 — 35.
2. Шевченко С.В. Формирование планов производства электроэнергии с учетом динамики изменения состояния энергосистемы / С.В. Шевченко, А.М. Пивненко // Вісник НТУ«ХП». Зб. наук. праць. «Системний аналіз, управління та інформаційні технології». — Харків: НТУ «ХП». — 2010. — № 67. — С. 196 — 202.

УДК 621.039.56

Е.А. Кокол, аспирант, Одес. нац. политехн. ун-т,  
jenia1991@i.ua

## ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ МОЩНОСТЬЮ ВВЭР-1000 ЗА СЧЕТ ЦЕЛЕВОГО ВЫБОРА ПРОГРАММЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ

У даній роботі представлена ідея оптимального вибору програми управління ядерним реактором, першим кроком якої є вибір цільової функції, яка об'єднує критерії безпеки ядерного палива.

*Ключові слова:* програма регулювання; цільова функція; глибина вигорання палива; руйнування паливної оболонки.

В данной работе представлена идея оптимального выбора программы управления ядерным реактором, первым шагом которой является решение целевой функции, ограниченной критериями безопасности ядерного топлива.

*Ключевые слова:* программа регулирования; целевая функция; глубина выгорания топлива; разрушение топливной оболочки.

This paper presents the idea of the optimal choice of program management of the nuclear reactor, the first step of which is the solution of the objective function that is limited by the safety criteria of nuclear fuel.

*Keywords:* control program; the objective function; fuel burn-up; the destruction of the fuel cladding.

Исходя из основной задачи регулирования паросиловой установки, которая заключается в поддержании равенства между количеством производимой и потребляемой энергии, вытекает использование различных программ регулирования:

— с постоянной средней температурой теплоносителя первого контура, которая обеспечивает стабильные температурные условия для его оборудования;

— с постоянным давлением пара во втором контуре, которая также благоприятна для его оборудования;

— компромиссно-комбинированная, предусматривающая эксплуатацию энергоблока АЭС с ВВЭР-1000 в маневренном режиме [1].

Мера эффективности использования ядерного топлива определяется следующим выражением

$$E_{ff} = f(\omega, B), \quad (1)$$

где  $\omega$  — параметр поврежденности оболочки топлива;

$B$  — глубина выгорания топлива.

Эффективность использования ядерного топлива на АЭС с реакторами на тепловых нейтронах характеризуется величиной среднегодовой энерговыработки на 1 т (или 1 кг) загруженного и отработавшего в реакторе топлива — средней глубиной его выгорания, которая зависит от фактической средней энергонапряженности топлива, при которой работает реактор, календарного времени и среднего коэффициента нагрузки. Также значение глубины выгорания зависит от типа реактора, начального обогащения, истории облучения.

Из-за неравномерности нейтронного потока и несовершенства регулирования в активных зонах ядерных реакторов имеет место значительная неравномерность энерговыделения по высоте и диаметру активной зоны, по отдельным ТВС и ТВЭЛам, поэтому локальные значения глубины выгорания топлива отличаются между собой, а максимальные — определяются учетом неравномерности энерговыделения по активной зоне в целом [2].

$$B = \int_0^t Q \cdot d\tau, \quad (2)$$

где  $Q$  — энерговыделение в твэле.

В публикации [3] приведена модель энергетического варианта ползучести топлива (ЭВПТ) изменения свойств твэла. Если не анализировать аварийные режимы, приводящие к пластической деформации оболочки за счет снижения предела текучести при аварийном повышении температуры, для оценки времени целостности оболочки при многократных циклических изменениях мощности РУ с  $\nu \ll 1$  Гц достаточно вычислить работу (удельную энергию рассеяния  $A$ ), накопленную в процессе ползучести к моменту разрушения оболочки и затраченную на разрушение.

ЭВПТ-критерий разгерметизации оболочки записан в виде:

$$\omega(\tau) = A(\tau) / A_0 = 1; \quad A(\tau) = \int_0^{\tau} \sigma_e \cdot \dot{p}_e \cdot d\tau, \quad (3)$$

где  $\omega(\tau)$  — поврежденность оболочки;

$A(\tau), A_0$  — удельная энергия рассеяния в момент времени  $\tau$  и при разрушении оболочки (Дж/м), соответственно;

$\sigma_e(\tau), \dot{p}_e(\tau)$  — эквивалентное напряжение (Па) и скорость эквивалентной деформации ползучести ( $s^{-1}$ ), соответственно.

Также причинами разгерметизации топлива являются фреттинг-износ, мусор в теплоносителе, незначительное влияние оказывают механическое взаимодействие между топливом и оболочкой, коррозионное растрескивание под напряжением на ранних стадиях облучения топлива, коррозия при больших глубинах выгорания.

Примем, что оптимальность управления будет оцениваться следующими критериями: глубиной выгорания  $B$ , степенью разрушения оболочки топлива  $A$  и глубиной манёвра мощности  $N$ . Данная задача относится к классу задач многокритериальной оптимизации. Для синтеза целевой функции оптимизации предлагается использовать метод целевого программирования.

В этом случае целевая функция запишется как:

$$J = \sqrt{\kappa_1 \bar{B}^2 + \kappa_2 \bar{A}^2 + \kappa_3 \bar{N}^2}, \quad (4)$$

где  $B, A, N$  — критерии оптимальности;

$\kappa_1, \kappa_2, \kappa_3$  — весовые коэффициенты,  $\sum \kappa_i = 1$ .

Моделируя работу реактора по различным программам регулирования и на различных уровнях мощности, можно будет оценить эффективность работающих реакторов с точки зрения выбранной целевой функции, учитывающей такие критерии, как глубина выгорания топлива и разрушение оболочки, и на основе анализа создать рекомендации по улучшению работы реактора. Также можно будет узнать, какое влияние определенная программа регулирования оказывает на граничные условия целевой функции, а именно вышеперечисленные критерии. Таким образом, сформируется массив данных – факторов, влияющих на целевую функцию, рассмотрим и изучив которые, будет составлен алгоритм оптимального выбора программы управления ядерным реактором.

## Литература

1. Цисельская Т.А. Анализ устойчивости активной зоны ВВЭР-1000 при различных программах регулирования энергоблока / Т.А. Цисельская, С.Н. Пельх, А.А. Назаренко // Тр. Одес. политехн. ун-та. — 2011. — Вып. 2 (36). — С. 109 — 114.
2. Nuclear Fuel Safety Criteria Technical Review / Nuclear Energy Agency Organisation For Economic Co-Operation And Development. — 2012. — Second Edition. — ISBN 978-92-64-99178-1.
3. Управление ресурсом оболочек твэлов в переменном режиме нагружения ВВЭР-1000 / С.Н. Пельх, М.В. Максимов, Р.Л. Гонтарь, Т.А. Цисельская // Щорічна наук. конф. ІЯД, 25-28 січня 2011 р. — С. 54 — 55.

УДК 621.039.56

Т.В. Фощ, аспирант, Одес. нац. политехн. ун-т,  
antariuz@gmail.com

## МОДЕЛЬ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЯ В КИСУ ВВЭР-1000

У роботі описано поле енерговиділення активної зони реактора ВВЕР-1000 і необхідність його прагнення до рівномірності, яке дозволить, за інших рівних умов, збільшити глибину і рівномірність вигорання палива, скоротити об'ємну частку теплоносія і конструкційних матеріалів.

*Ключові слова:* поле енерговиділення; активна зона реактора; розподіл тепловиділення, Matlab.

В работе описано поле энерговыделения активной зоны реактора ВВЭР-1000 и необходимость его стремления к равномерности, которое позволит, при прочих равных условиях, увеличить глубину и равномерность выгорания топлива, сократить объемную долю теплоносителя и конструкционных материалов.

*Ключевые слова:* поле энерговыделения; активная зона реактора; распределение тепловыделения, Matlab.

The paper described the field of energy release of the core of the WWER-1000 and the need for its pursuit of uniformity, which will allow, ceteris paribus, to increase the depth and uniformity of fuel burn-up, reduce the volume fraction of the coolant and structural materials.

*Keywords:* field of energy release; reactor core; distribution of heat release, Matlab.

На сьогоднішній день однією з важливіших задач в ядерній енергетиці є створення реактора з максимально рівним і стабільним полем енерговиділення. При стабільному і рівномірному енерговиділенні значительно уліцшаються фізическіє і економіческіє характерістїкї реакторної установкаї. Помїмо всього, таке енерговиділення впливає на ряд вопроєов регулювання реактора і його безпеку. В зв'язї с тем, що максимальне енерговиділення обмежено предельними характерістїкїма матеріалів як реактора, так і окремих його компонентів, то відповідно, зниження нерівномірності забезпечить можливість підвиєити середню теплову нагрузку на ділячий матеріал і, відповідно, збільєити потужність активної зони или зменєити її об'єм [1].

Пространственное распределение тепловыделения описывается произведением двух функций (косинус — по высоте, функция Бесселя — по радиусу) [2]:

$$q_v \approx \cos\left(\pi \frac{z}{H_{a.z.}}\right) J_0\left(2,405 \frac{r}{R_{a.z.}}\right), \quad (1)$$

где текущие значения координат изменяются в пределах:

$$-\frac{H_{a.z.}}{2} \leq z \leq \frac{H_{a.z.}}{2}; \quad 0 \leq r \leq R_{a.z.}.$$

Энерговывделение симметрично относительно центра активной зоны:

$$q_v = q_v^{\max} \text{ при } z=0, r=0;$$

$$q_v = 0 \text{ при } z = \pm \frac{H_{a.z.}}{2} \text{ или } r = R_{a.z.}.$$

Таким образом, приведенное уравнение дает возможность описать распределение тепловыделения в каждом тепловыделяющем элементе всей активной зоны ВВЭР-1000. В дальнейшем это позволит усовершенствовать существующую математическую модель реактора с распределенными параметрами, реализованную в программном пакете Matlab, и добавить описание энерговыделения каждого тепловыделяющего элемента, тем самым появится возможность более точной оценки энерговыделения в целом.

### Литература

1. Постников В.В. Контроль распределения энерговыделения в активной зоне ядерного реактора: учебное пособие / В.В. Постников, И.С. Якунин. — М.: НИЯУ МИФИ, 2012. — 92 с.

2. Бойко В.И. Физический расчет ядерного реактора па тепловых нейтронах: учебное пособие / В.И. Бойко, Ф.П. Кошелев, И.В. Шаманил и др. — Томск: Изд-во Томского политехн. ун-та, 2009. — 504 с.

УДК 681:51:681.181.126.2

В.А. Трубніков, аспірант, Одес. нац. акад.я хар-  
чових технологій, vat20061@ua.ru

## ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ ПАРОВИХ ТА ВОДОГРІЙНИХ КОТЛІВ

Розглядаються способи підвищення ефективності роботи парових та водогрійних котлів за рахунок зменшення втрат тепла з димовими газами за допомогою системи автоматичного управління розрідженням в топці котлів з функцією гарантування.

*Ключові слова:* котел; система управління; розрідження; функція гарантування; ефективність.

Рассматриваются способы повышения эффективности работы паровых и водогрейных котлов за счет уменьшения потерь тепла с дымовыми газами с помощью системы автоматического управления разрежением в топке котлов с функцией гарантирования.

*Ключевые слова:* котел; система управления; разрежение; функция гарантирования; эффективность.

Consider ways to increase the efficiency of steam boilers by reducing heat loss from the flue gases by means of automatic control system in the vacuum furnace boiler with function guarantee.

*Keywords:* boiler; control system; depression; guarantee function; effectiveness.

**Мета та постановка задачі.** Оцінити ефективність роботи котла можливо за його коефіцієнтом корисної дії ( $n$ ). Зазвичай  $n$  визначають за методом зворотного балансу:

$$n = 100\% - (q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6) \quad (1)$$

де  $q_2$  — доля витрат з димовими газами, %;

$q_3$  — доля витрат від хімічної неповноти згорання, %;

$q_4$  — доля витрат тепла від механічного неспалювання, %;

$q_5$  — доля витрат тепла в навколишнє середовище, %;

$q_6$  — доля витрат тепла з фізичним теплом шлаку (для котлів на твердому паливі), %.

Відомо, що витрати  $q_3$ ,  $q_5$  і  $q_6$  в сумі не перевищують 1 %. Витрати теплоти з механічним неспалюванням  $q_4$  у твердопаливних котлах при спалюванні твердих палив (кам'яне вугілля) можуть складати 2...5 %. Доля витрат  $q_2$  є найбільшою, вона становить 5...12 %.

Враховуючи викладене, для підвищення ефективності роботи котла в першу чергу доцільно розглянути способи зниження витрат тепла з димовими газами  $q_2$ . Оскільки відомо, що зростання температури димових газів (Тдг) на 12...15 % призводить до збільшення втрат тепла  $q_2$  на 1 %, то логічним рішенням є знайти способи зниження цих самих Тдг. Одним з варіантів зменшення Тдг є встановка розвинених поверхонь нагріву (економайзери та підігрівачі повітря димовими газами). Однак таке рішення потребує залучення значних коштів на модернізацію котла, крім того збільшуються габарити котла, його металоемність, аеродинамічний опір руху газів і повітря, а також витрата енергії вентилятора та димососа на їх подолання [1]. З іншого боку на Тдг впливає швидкість їх течії в газо-повітряному тракці котла, яка контролюється розрідженням ( $dP$ ). Збільшення величини  $dP$  підвищує присоси «холодного» повітря в топку котла, яке заміщає «горяче», при цьому течія димових газів в тракці котла також збільшується, а тепловіддача випромінюванням зменшується. Зменшення тепловідаччі випромінюванням призводить до підвищення Тдг. Тому очевидним рішенням є завдати величину  $dP$  в топці котла до встановленого регламентом гранично допустимого (мінімального) значення. Важливо, що порушення цієї межі приведе до обгорання паливників і нижньої частини топки, а димові гази почнуть проникати з топки котла в приміщення котельні, що спричинить аварійну ситуацію (АС).



**Побудова системи гарантуючого управління розрідженням в топці котла.** Враховуючи викладене, в САУ розрідженням в топці котла була реалізована функція гарантування, яка дозволила підтримувати  $dP$  на гранично допустимому (граничному) рівні, тим самим підвищила ефективність роботи котла за рахунок зменшення втрат тепла з димовими газами і забезпечила гарантування невиходу розрідження в топці котла за граничне значення [2].

Для оцінки ефективності розробленої системи гарантуючого управління (СГУ) проведено ряд комп'ютерних експериментів, див. рис. 1, що включає порівняльний аналіз роботи СГУ з різним значенням ймовірності безаварійної роботи ( $P_t$ ) та роботи штатної САУ.

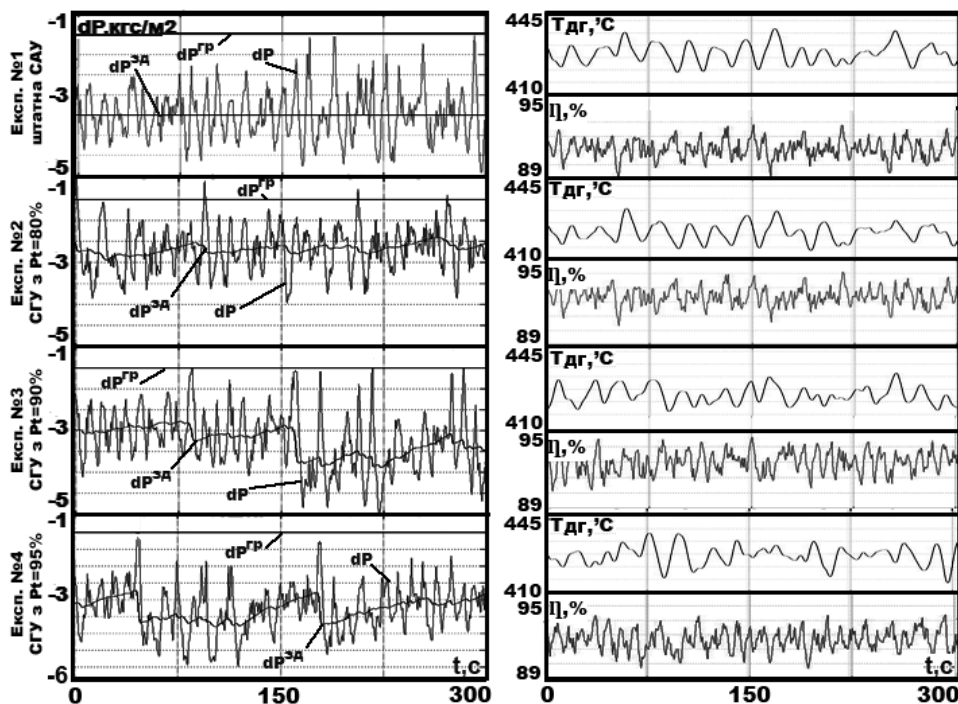


Рис. 1. Фрагменти моделювання штатної САУ (експ. №1) та СГУ (експ. №2-4)

**Висновки.** Робота з СГУ при  $P_t=80\%$  (експ. №2) неможлива, так як є викиди за допустиму межу, що приводить до виникнення АС. При збільшенні  $P_t$  для СГУ від  $90\%$  та вище викиди відсутні, але зростає значення середнього відхилення від границі, що веде за собою зростання температури димових газів та зниження ККД котла. Для максимально досяжної ефективності роботи котла необхідно шукати компроміс між цими взаїмосуперечливими факторами. Слід зазначити, що при розрахунку ККД котла не враховувалися втрати від неповноти згоряння палива  $q_3$ . Це означає, що ККД котла з використанням СГУ фактично повинно бути більше, ніж отримано методом моделювання. Одним з важливих резервів підвищення ефективності СГУ є підвищення динамічної точності стабілізації розрідження в топці котла. Це дозволить вести процес ближче до гранично допустимого значення розрідження і, отже, знизити енерговитрати на роботу димососа і підвищити ефективність роботи котла. Інструментами підвищення цієї точності може стати розвиток системи управління в напрямі інтелектуального рівня алгоритмів контролю і управління.

## Література

1. Воликов А.Н. Повышение эффективности сжигания топлива в котлоагрегатах / А.Н. Воликов, О.Н. Новиков, А.Н. Окатьев // Энергонадзор-информ. — СПб: — 2010. — Вып. 1(43). — С. 54 — 57.
2. Хобин В.А. Системы гарантирующего управления технологическими агрегатами: основы теории, практика применения / В.А. Хобин. — Одесса: ТЕС, 2008. — С. 306 — 308.

УДК [664.723.011:631.365]:681.51

М.Т. Степанов, канд. техн. наук, доц., Одес. нац.  
акад. пищев. технолог., stepanov1978@mail.ru

## УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ СУШКИ ЗЕРНА КВАЗИИНВАРИАНТНОЕ К ЕГО НАЧАЛЬНОЙ ВЛАЖНОСТИ

Разработана система автоматического регулирования влажности зерна на выходе сушилки реализующая комбинированный принцип регулирования. Результаты моделирования подтверждают эффективность системы и возможность повысить экономическую эффективность процесса сушки.

*Ключевые слова:* зерносушилка; комбинированный принцип регулирования; влажность зерна; инвариантность.

Розроблено систему автоматичного регулювання вологості зерна на виході сушарки реалізує комбінований принцип регулювання. Результати моделювання підтверджують ефективність системи і можливість підвищити економічну ефективність процесу сушіння.

*Ключові слова:* зерносушарка; комбінований принцип регулювання; вологість зерна; інваріантність.

A system of automatic regulirovaniyavlazhnosti grain output dryer combo implementing the principle of regulation. Simulation results confirm the effectiveness of the system and the ability to increase the economic efficiency of the drying process.

*Keywords:* grain dryer; combined principle of regulation; grain moisture; invariance.

**Постановка задачи.** Сушка зерна является важным технологическим процессом по сохранению и улучшению его показателей качества. Основной целью процесса является обеспечение заданной конечной влажности зерна при сохранении его качества. Наиболее распространенными на предприятиях Украины являются прямоточные зерносушилки шахтного типа, обеспечивающие высушивание больших объемов зерна в потоке. При уборке урожая на предприятия поступает зерно, влажность которого изменяется в достаточно широких диапазонах. Предварительное формирование партий зерна для сушки, исходя из его начальной влажности, в силу разных причин на предприятиях не выполняется. Зерно сразу после разгрузки транспорта поступает в приемный бункер влажного зерна, а от туда в зерносушилку. При изменении начальной влажности зерна в широких диапазонах оператору зерносушилки сложно обеспечить заданную конечную влажность зерна и возникают процессы пересушивания и недосушивания зерна. И в целом среднюю влажность зерна на выходе приходится уменьшать, ухудшая экономическую эффективность процесса сушки.

**Сущность проблемы.** В современных системах автоматического управления шахтными прямоточными зерносушилками функция регулирования влажности как правило реализуется оператором. Этому есть ряд причин: 1) сложность организации стабильно точного измерения влажности зерна в потоке; 2) свойства зерносушилки как объекта управления по каналу управления конечной влажностью не позволяют решать задачу в классе типовых алгоритмов управления. Поэтому целью исследования является разработка САР влажности зерна на выходе сушилки высокой динамической точности, обеспечивающей повышение экономической эффективности процесса сушки зерна.

**Структура и моделирование САР.** Структурная схема варианта такой САР для шахтной прямоточной зерносушилки с одной зоной сушки представлена на рис. 1.

Структурная схема САР реализующей комбинированный принцип регулирования влажности зерна ( $T_3$  — температура зерна,  $W_n$ ,  $W_k$  — начальная и конечная влажности зерна,

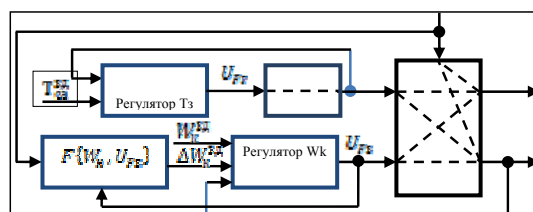


Рис. 1

$T_{ca}$  — температура сушильного агента,  $U_{F_T}$  управляющее воздействие изменяющее расход газа,  $U_{F_3}$  управляющее воздействие изменяющее производительность зерносушилки).

Получение оператора связи  $F\{W_n, U_{F_3}\}$  обеспечивающего инвариантность  $W_k$  относительно  $W_n$ , является сложной задачей. Она связана с проблемой его математического описания так как по каналам  $U_{F_3, k}$  и  $W_n - W_k$  свойства объекта являются нестационарными зависят от вида зерна и его начальной влажности, обладают значительными переменными запаздываниями. Применение содержательных моделей в качестве оператора связи  $F\{W_n, U_{F_3}\}$  ограничивается сложностью таких моделей, большим количеством параметров и невозможностью их реализации на контроллерах. Поэтому предлагается вариант получения  $F\{W_n, U_{F_3}\}$  в виде формальной модели на основе принципа инвариантности Б.Н. Петрова с использованием комбинированного (аналитического и экспериментального) метода. Все эксперименты для получения формальных моделей  $F\{W_n, U_{F_3}\}$  для конкретной зерносушилки и вида зерна проводятся на основе содержательных моделей в специальной среде имитационного моделирования зерносушилок. Фрагмент моделирования разных вариантов САР влажности зерна на выходе зерносушилки при изменении влажности зерна на ее входе представлен на рис 2.

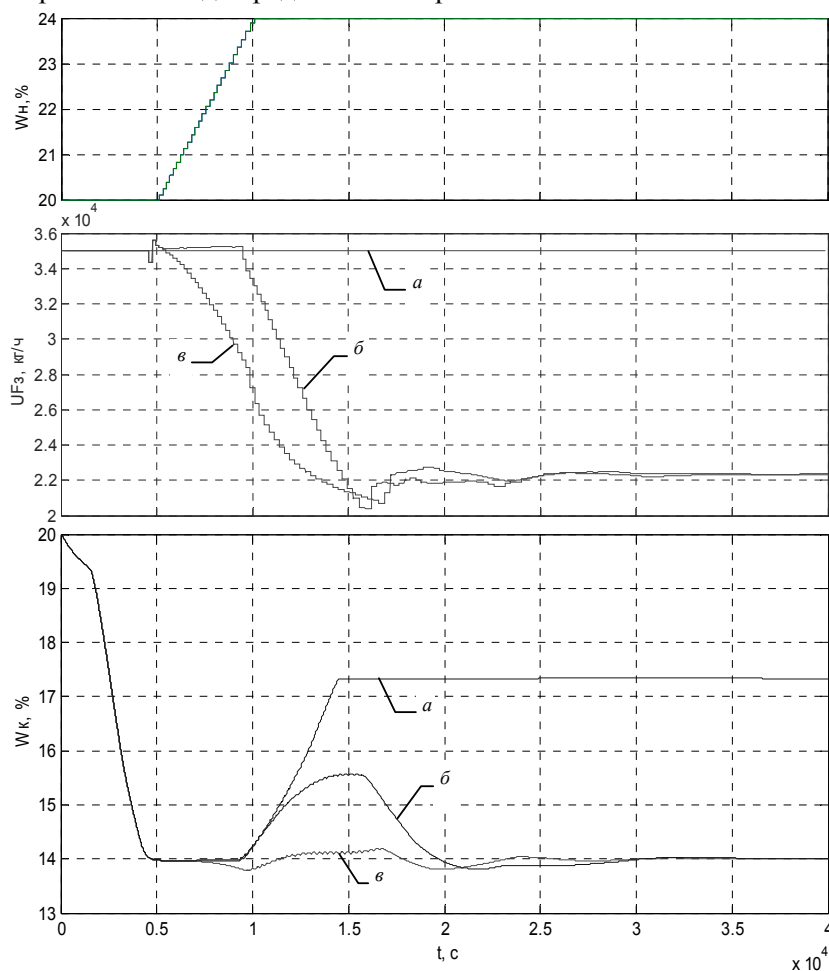


Рис. 2. Фрагмент моделирования САР влажности зерна на выходе сушилки с разными принципами управления (а — с разомкнутым управлением; б — с управлением по отклонению; в — с комбинированным управлением)

**Результаты моделирования.** Система с комбинированным принципом регулирования уменьшает диапазон колебаний конечной влажности зерна относительно заданного значения, что позволит поддерживать влажность зерна в максимальной близости к верхней допустимой границе влажности, практически не выходя за нее, т.е. соблюсти все требования к влажности зерна, поддерживая ее на максимально высоком уровне. Ожидаемый экономический эффект: 1) снижение затрат топлива на удаление влаги из зерна; 2) снижение потерь массы товарного зерна за счет предотвращения его пересушивания; 3) снижение времени на сушку партии зерна, что одновременно и пропорционально снижает затраты топлива на потери в окружающую среду и электроэнергию на работу вентиляторов.

#### Литература

1. Степанов М.Т. Математическое имитационное моделирование зерносушилок как основа разработки эффективных систем управления / М.Т. Степанов, П.А. Веридусов, М.А. Еремин // Автоматизация технологических бизнес-процесов. — Одеса: ОНАХТ, 2014. — № 3(19). — С. 16 — 22.

УДК 681.513.6

А.С. Гольцов, д-р техн. наук, доц., Нац. аэрокосмический ун-т им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»

## АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМЫ АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ГИДРОАГРЕГАТОМ С ПОВОРОТНО-ЛОПАСТНОЙ ТУРБИНОЙ

Керують активною потужністю та частотою електричного струму на шинах генератора за допомогою адаптивних ПІ-регуляторів відкриття спрямувального апарату та розвороту лопатей робітного колеса турбіни. Параметри регуляторів оцінюють у процесі керування за допомогою принципу максимуму з використанням нелінійної моделі гідроагрегату у просторі станів. Параметри моделі оцінюють рекурентним методом найменших квадратів.

*Ключові слова:* поворотно-лопатєва гідротурбіна; адаптивна система керування; нелінійна модель гідроагрегату; простір станів.

Управляют активной мощностью и частотой электрического тока на шинах генератора с помощью адаптивных ПИ-регуляторов открытия направляющего аппарата и разворота лопастей рабочего колеса турбины. Параметры регуляторов оценивают в процессе управления с помощью принципа максимума с использованием нелинейной модели гидроагрегата в пространстве состояний. Параметры модели определяют рекуррентным методом наименьших квадратов.

*Ключевые слова:* поворотно-лопастная гидротурбина; адаптивная система управления; нелинейная модель гидроагрегата; пространство состояний.

It is operated by active power and frequency of electric current on the Adaptive PI controllers opening of the guide vanes and turning impeller blades the of the turbine. The controller parameters are estimated on-line with the help of the maximum principle using a non-linear model of hydraulic unit in the state space. The model parameters are estimated by the recurrent algorithm of least squares.

*Keywords:* Kaplan turbines; adaptive control system; the non-linear model hydro aggregate; state space.

Управляют активной мощностью и частотой электрического тока на шинах генератора гидроагрегата (ГА) с поворотно-лопастной турбиной (ПЛТ) за счет изменения величины открытия направляющего аппарата (НА) и угла установки лопастей рабочего колеса (РК) турбины. В штатных системах автоматического управления (САУ) величину открытия НА изменяют с помощью ПИД-регулятора активной мощности, а для синхронизации углов установки лопастей РК и лопаток НА турбины применяют комбинаторную зависимость (КЗ) — значения углов установки лопастей РК, обеспечивающие максимальный индексный к. п. д. ПЛТ в стационар-

ных режимах работы при разных величинах открытия НА и разных значениях напора. При настройке параметров ПИД-регулятора активной мощности используют линейную модель (передаточную функцию) ГА с ПЛТ. Заводскую КЗ определяют на специальном гидродинамическом стенде по результатам экспериментальных исследований макета рабочего колеса гидротурбины. Статические и динамические характеристики гидроагрегатов, оснащенных расходомерами воды, улучшают за счет индивидуальной коррекции заводской КЗ при выполнении натуральных энергетических испытаний [1].

Но на большинстве ГА с ПЛТ, установленных на ГЭС Украины и России, нет расходомеров воды. Гидроагрегаты находятся в эксплуатации много лет, поэтому их статические и динамические характеристики существенно изменились, но в штатных САУ этих ГА используют заводские КЗ, так как коррекцию заводской КЗ без измерения расхода воды через турбину выполнить нельзя. Кроме того, штатные САУ с одними и теми же параметрами регуляторов используют для стабилизации активной мощности в широком диапазоне требуемых значений мощности (от 20 до 120 МВт). Эти же гидроагрегаты (оснащенные штатными САУ), применяют в системах нормированного первичного и вторичного регулирования активной мощности и частоты электрического тока в энергетических сетях. В этих случаях индивидуальное задание САУ каждого ГА, формирует групповой регулятор активной мощности. При этом основную часть времени эти ГА работают в переходных режимах. Улучшить статические и динамические характеристики гидроагрегатов с ПЛТ можно за счет применения в САУ адаптивных ПИ-регуляторов открытия НА и разворота лопастей РК. Параметры этих регуляторов определяют в процессе управления (без измерения расхода) с помощью принципа максимума с использованием нелинейной модели гидроагрегата в пространстве состояний [2]. Был выполнен сравнительный анализ статических и динамических характеристик штатных САУ гидроагрегатов с ПЛТ, использующих заводскую КЗ и индивидуальные КЗ, и адаптивной САУ при работе в системе нормированного первичного регулирования активной мощности и в режимах стабилизации при различных нагрузках на генератор. Для этого в процессе натуральных энергетических испытаний семи гидроагрегатов Волжской ГЭС, оснащенных расходомерами, ручным управлением были реализованы режимы, имитирующие работу штатной и адаптивной САУ при разных напорах (от 16 до 25 м) и нагрузке на генератор, которую изменяли в диапазоне от 30 до 115 МВт.

В стационарных режимах работы штатной САУ активная мощность, угловая скорость вращения ротора и величина открытия направляющего аппарата совершают колебания относительно своих средних значений. При этом амплитуда колебаний активной мощности существенно изменяется в зависимости от величины напора и нагрузки на генератор, а амплитуды колебаний остальных переменных от напора и нагрузки практически не зависят. Среднеквадратическое отклонение колебаний активной мощности относительно своего математического ожидания (СКО активной мощности) имеет минимальную величину в середине рабочего диапазона нагрузок на генератор (0,15...0,2 МВт при разных напорах и активной мощности ГА  $P_a = 60...80$  МВт). При нагрузке на генератор  $P_a < 40$  МВт СКО активной мощности увеличивается до 0,23...0,28 МВт, а при  $P_a > 100$  МВт СКО активной мощности увеличивается до 0,3...0,45 МВт при увеличении напора. Индексные к.п.д. гидроагрегатов, реализующих штатные КЗ, оказались меньше оптимальных на 1,5...2,5 %.

ГА, участвующие в нормированном первичном регулировании, более 90 % времени работали в переходных режимах. Динамическая погрешность регулирования мощности штатной САУ достигала 10...15 МВт, а динамическая погрешность регулирования частоты достигала величины  $\pm 1,5$  Гц. Автоматическое восстановление допустимого уровня частоты ( $50 \pm 0,2$  Гц) происходило в течение 15...25 минут (допустимое время восстановления не более 15 мин.). При этом уровни вибрации крышки турбины, диска подпятника и биение вала турбины увеличились на 15...35 % по сравнению с их значениями в стационарных режимах работы ГА. С помощью алгоритмов адаптивного управления динамическая погрешность нормированного первичного регулирования активной мощности была уменьшена до 1,0...3,0 МВт.

Индексный к. п. д. ГА, реализующих алгоритм адаптивного управления, во всех режимах работы был увеличен на 1,0...2,5 % по сравнению со штатной САУ с заводской комбинаторной зависимостью. При этом СКО активной мощности было снижено на 30...40 %, а уровни вибрации крышки турбины, диска подпятника и биение вала турбины уменьшились на 15...30 %.

Таким образом, при реализации алгоритмов адаптивного управления в системах стабилизации и нормированном первичном регулировании активной мощности и частоты электрического тока в энергетических сетях можно обеспечить требуемую точность при меньших гидравлических потерях мощности, снизить уровень вибрации и уменьшить вероятность вывода ГА в ремонт до окончания планового межремонтного периода работы.

### Литература

1. Линник А.В. Современный уровень и основные направления развития гидротурбостроения в Украине / А.В. Линник, В.Д. Хаитов // Проблемы машиностроения. — 2010. — Т. 13, № 1. — С. 11 — 18.
2. Гольцов А.С. Система адаптивного управления активной мощностью гидроагрегата ГЭС с поворотно-лопастной турбиной / А.С. Гольцов, А.А. Силаев, А.В. Клименко, С.А. Гольцов // Приборы и системы управления. — 2008. — № 11. — С. 1—4.

УДК 621.317.39

Е.Ю. Голуб, аспирант, Нац. аерокосм. ун-т  
ім. Н.Е. Жуковського «ХАІ», golub-ekaterina@bk.ru

## ОТРИМАННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДАНИХ ДЛЯ СПОСОБУ ВИЗНАЧЕННЯ ВОЛОГОСТІ

Проведена апробація способу визначення вологості речовин. Основним завданням є перевірка можливості компенсації «сортової невизначеності» вимірювань діелькометричними вологомірами. Перевірка проводиться шляхом порівняння значень вологості, отриманих для різних речовин при додаванні в них однієї і тієї ж кількості води (тестовий метод). Отримано результати експериментів, і дано висновок про можливість компенсації розглянутим способом сортової залежності діелькометричних вологомірів.

*Ключові слова:* вологість; діелькометричний вологомір; «сортова невизначеність»; тестовий метод.

Проведена апробація способу определения влажности веществ. Основной задачей является проверка возможности компенсации «сортовой неопределённости» измерений диэлькометрическими влагомерами. Проверка проводится путём сравнения значений влажности, полученных для различных веществ при добавлении в них одного и того же количества воды (тестовый метод). Получены результаты экспериментов, и даны заключения о возможности компенсации рассматриваемым способом сортовой зависимости диэлькометрических влагомеров.

*Ключевые слова:* влажность; диэлькометрический влагомер; «сортовая неопределённость»; тестовый метод.

Approbation of the method for substances moisture determination is carried out. The main objective is check of possibility of compensation of «uncertainty of substance type» for measurements by capacitive moisture meters. An inspection is carried out by comparison of the moisture values received for various substances at addition in them the same amount of water (a test method). Results of experiments are received, and the conclusions about possibility of compensation of substance type dependence for capacitive moisture meters by the considered method are drawn.

*Keywords:* moisture; capacitive moisture meter; «uncertainty of substance type»; test method.

Україна є одним з найбільших світових експортерів зерна. При цьому вартість зерна значною мірою залежить від його якості. Присутність вологи в зерні істотно впливає на його цінність, термін зберігання та подальшу обробку. Гранично допустиме (критичне) значення вологості для зернових культур становить 14,5 % [1]. Саме тому існує необхідність у високоякісних вологомірах, здатних з високою точністю визначати вологість досліджуваних матеріалів. На сьогоднішній день найбільше поширення отримали діелькометричні вологоміри. Невизначен-

ність дієлькометричних вологомірів становить близько 0,5 %, і, як показує практика, для більшості випадків вимірювання вологості такої точності цілком достатньо. До числа інших переваг даних вологомірів слід віднести їх простоту виготовлення і використання, а також відносно дешевизну в порівнянні з іншими вологомірами. Одним з основних недоліків застосування дієлькометричних вологомірів є залежність виміряного значення вологості від початкової діелектричної проникності (сорт) речовини — т.зв. «сортна невизначеність». Так, наприклад, для зернових матеріалів, діелектрична проникність яких варіюється в діапазоні від 2 до 4, «сортна невизначеність» може сягати декількох відсотків.

Розрахунковий вираз для визначення вологості із застосуванням тестових методів, отриманий авторами в роботі [2], має вигляд:

$$W = \frac{W_2 + W_1}{(W_2 - W_1) \cdot (1 + 0,0045 \cdot C_1)}, \quad (1)$$

де  $W_1, W_2$  — значення вологості, отримані в результаті першого і другого етапів застосування тестових методів;

$C_1$  — ємність з досліджуваною пробою речовини.

Перевірка можливості застосування тестового підходу проводиться шляхом порівняння значень вологості, отриманих для різних речовин при додаванні в них однієї і тієї ж кількості води.

Послідовність дій наступна. Спочатку вибирається група досліджуваних матеріалів, і визначаються ємності первинного вимірювального перетворювача (ПВП) з сухими пробами речовин. Потім визначаються ємності ПВП з досліджуваними матеріалами при додаванні в них заданої кількості води. Отримані значення підставляються в розрахунковий вираз і визначається вологість речовини. Результати експерименту вважаються позитивними, якщо при одній і тій же добавці води отримані для різних речовин величини вологості будуть мати одне і те ж значення, що дорівнює заданій добавці води.

Для проведення експериментів авторами обрані наступні матеріали: пшениця, ячмінь, перлова крупа, мак, горох колотий і пісок. В якості первинного перетворювача використовуються ємнісні датчики Д1 і Д2. Застосування у вимірювальному процесі двох різних первинних перетворювачів викликано прагненням одержати максимально незалежні від різних факторів результати вимірювання.

Результати експериментальної перевірки вологості речовин наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Результати перевірки вологості речовин

Найменування матеріалу	Вологість			
	Датчик Д1		Датчик Д2	
	0,0 %	10,0 %	0,0 %	10,0 %
Пшениця	0,76	9,364	0,4	9,977
Ячмінь	0,685	9,689	0,392	10,0
Перлова крупа	0,886	9,407	0,304	9,979
Мак	0,704	9,751	0,136	9,97
Горох колотий	0,092	9,438	0,0	9,902
Пісок	0,0	10,0	0,065	9,977

З табл. 1 видно, що отримані в результаті експерименту значення вологості практично не залежать від зміни початкової діелектричної проникності речовини. Так, у випадку датчика Д1 при заданому значенні вологості 0,0 % для різних матеріалів (з різними діелектричними проникностями) отримаємо нормовані значення вологості, що змінюються від 0,0 % до 0,886 %; при вологості 10,0 % для тих самих матеріалів нормовані значення вологості змінюються від 10,0 % до 9,751 %. Максимальна похибка, пов'язана з «сортною невизначеністю» вимірювань дієлькометричними вологомірами, становить 0,886. Для датчика Д2 ця похибка дорівнює 0,4.

---

Таким чином, розглянутий спосіб визначення вологості речовин діелькометричними вологомірами дозволяє в достатній мірі компенсувати «сортову невизначеність» для матеріалів, діелектрична проникність яких дорівнює  $\epsilon_n = 2 \dots 4$  (наприклад, зерна, нафти і нафтопродуктів) з вмістом води від 0 % до 30 %.

#### Литература

1. Жито. Технічні умови : ДСТУ-4522:2006. — [Чинний від 2006-02-28]. — К.: Держспоживстандарт України 2009. — 18 с. — (Національний стандарт України).
2. Голуб Е.Ю. Применение тестового подхода для обеспечения инвариантности диелькометрических влагомеров к сорту вещества / Е.Ю. Голуб, А.В. Заболотный, Н.Д. Кошевой // Радиоэлектронні і комп'ютерні системи. — 2014. — № 4(68). — С. 60 — 66.



## Секція 4

# УПРАВЛІННЯ АЕРОКОСМІЧНИМИ, МОРСЬКИМИ ТА ІНШИМИ РУХОМИМИ ОБ'ЄКТАМИ

УДК 531.13

**А.П. Алпатов**, д-р техн. наук, проф.,  
**А.А. Фоков**, канд. техн. наук, ст. науч. сотр.,  
**С.В. Хорошилов**, д-р техн. наук, ст. науч. сотр.,  
н-т технической механики НАНУ и ГКАУ,  
skh@ukr.net,  
**А.Е. Закржевский**, д-р техн. наук, ст. науч. сотр.,  
Ин-т механики им. С.П. Тимошенко НАНУ

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ФОТОСНИМКОВ МИШЕНИ ПРИ БЕСКОНТАКТНОМ УДАЛЕНИИ КОСМИЧЕСКОГО МУСОРА

Запропоновано підхід і розроблено алгоритми для визначення сили впливу факела електрореактивного двигуна на орбітальний об'єкт по його центральній проекції на вибрану площину. Досліджено можливість використання інформації про контур мішені в алгоритмах керування при безконтактному видаленні космічного сміття з використанням іонного променя.

*Ключові слова:* Видалення космічного сміття; іонний промінь; контур проекції мішені.

Предложен подход и разработаны алгоритмы для определения силы воздействия факела электрореактивного двигателя на орбитальный объект по его центральной проекции на выбранную плоскость. Исследована возможность использования информации о контуре мишени в алгоритмах управления при бесконтактном удалении космического мусора с использованием ионного луча.

*Ключевые слова:* удаление космического мусора; ионный луч; контур проекции мишени.

An approach and algorithms to determine the force transmitted to an orbital object by the plume of the ion thruster using its central projection on an auxiliary plane are proposed. The possibility to use the information about the contour of a target in control algorithms for the contactless space debris removal using the ion beam is investigated.

*Keywords:* space debris removal; ion beam; contour of target projection.

Не смотря на значительные усилия ведущих космических держав, проблема космического мусора с каждым годом стоит все более остро. Последние исследования по моделированию популяции космического мусора (КМ) показывают, что ситуация для некоторых околоземных орбит уже является критической [1]. В связи с этим в настоящее время космическим сообществом активно изучаются способы и разрабатываются технологии непосредственного удаления КМ с околоземных орбит.

Для решения проблемы КМ была предложена концепция бесконтактного увода объектов КМ, получившая название «Пастух с ионным лучом (ПИЛ)» [2]. Основной принцип этой концепции, заключается в использовании потока ионов электрореактивного двигателя (ЭРД) в качестве средства, передающего силовой импульс объекту КМ для его торможения.

Одним из ключевых вопросов, возникающих при исследовании концепции ПИЛ, является определение силы, передаваемой пастухом объекту КМ. Знание этой силы необходимо как для успешной реализации выбранной программы увода, так для решения задач навигации и управления относительным движением системы «пастух-объект КМ».

Традиционный подход определения передаваемой силы основывается на интегрировании элементарных сил по поверхности объекта и для его реализации необходима информация о точной форме, размерах объекта и его ориентации. Однако его применение для рассматриваемой задачи представляется затруднительным с учетом того, что объекты КМ неуправляемы, могут характеризоваться сложным движением вокруг центра масс, сильно различаться по форме и механическим свойствам.

В связи с этим, авторами предлагается другой подход, позволяющий определять передаваемую силу, на основании существенно меньшего объема информации об уводимом объекте (мишени), а именно по информации о контуре его центральной проекции на выбранную плоскость (рис. 1).

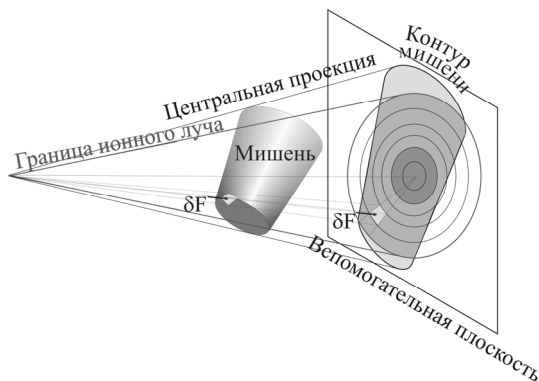


Рис. 1. Центральная проекция мишени на вспомогательную плоскость

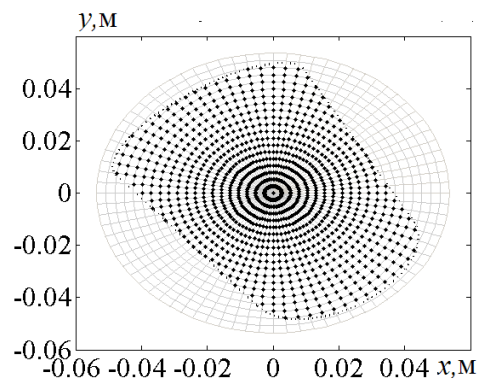


Рис. 2. Узлы конечных элементов луча, ограниченные контуром мишени

В докладе представлены алгоритмы определения передаваемой потоком ионов ЭРД силы по центральной проекции мишени на вспомогательную плоскость, перпендикулярную оси ионного луча ЭРД, и результаты исследования особенностей их применения для задач управления при бесконтактном удалении космического мусора.

Для получения изображения центральной проекции мишени на орбите предложено использовать фотокамеру. Разработаны алгоритмы вычисления контура мишени, определения на основании этого контура элементов луча, попадающих на уводимый объект (рис. 2), а также расчета передаваемой силы. Исследованы вопросы неточности определения контура мишени вследствие несовпадения фокальной точки фотокамеры с вершиной воображаемого конуса луча. Предложены алгоритмы коррекции контура, определенного по фотоснимкам смещенной камеры. Проведены численные расчеты, иллюстрирующие эффективность предложенного подхода. Представлен общий алгоритм обработки фотоснимков для получения контура мишени. Исследована возможность использования фотоснимков мишени как для реализации выбранной программы увода, так и для решения задач навигации и управления относительным движением системы «пастух-объект КМ».

### Литература

1. Liou J.-C. Stability of the Future Leo Environment – an IADC Comparison Study / J.-C. Liou, A.K. Anilkumar, B. Bastida et al. // Proc. “6th European Conference on Space Debris” Darmstadt, Germany, 22–25 April 2013 (ESA SP-723, August 2013). – 2013.
2. Бомбарделли К. Проект «Космического Пастуха» с сонным лучом. Идеи и задачи / К. Бомбарделли, А.П. Алпатов, А.В. Пироженок, и др. // Космічна наука і технологія, 2014. — Т. 20, № 2. — С. 55 — 60.

УДК 004.75

С.С. Великодний, канд. техн. наук, доцент, Одес.  
нац. морська акад. dotsent1981@mail.ru

## РЕІНЖІНІРИНГ СИСТЕМ МОНІТОРИНГУ ТА ДИСТАНЦІЙНОГО УПРАВЛІННЯ СУДНОВИМИ ЕНЕРГЕТИЧНИМИ УСТАНОВКАМИ

У тезах доповіді розглянуто теоретичні аспекти побудови SCADA-систем та їх подальшого удосконалення шляхом реінжинірингу. Окреслено функціональні підходи до виконання реінжинірингу основних видів забезпечення SCADA-систем.

*Ключові слова:* суднова енергетична установка; SCADA-система; проектування; реінжиніринг; вид забезпечення; модуль.

В тезисах доклада рассмотрены теоретические аспекты построения SCADA-систем и их дальнейшего усовершенствования путем реинжиниринга. Определены функциональные подходы к выполнению реинжиниринга основополагающих видов обеспечения SCADA-систем.

*Ключевые слова:* судовая энергетическая установка; SCADA-система; проектирование; реинжиниринг; вид обеспечения; модуль.

In the theses of the report deals with the theoretical aspects of the construction of SCADA-systems and their further improvement through reengineering. Defined functional approach to the implementation of reengineering the basic types of collateral SCADA-systems.

*Keywords:* ship power plants; SCADA-system; design; reengineering; type of collateral; module.

Система моніторингу та дистанційного управління (СМДУ або SCADA-система) судновою енергетичною установкою (СЕУ) — це система, що об'єднує різні види забезпечення (технічне, математичне, програмне, інформаційне, лінгвістичне, методичне, організаційне, ергономічне та правове), параметри і характеристики якої вибирають із максимальним урахуванням особливостей завдань інженерного проектування, конструювання, технологій виготовлення та експлуатації СЕУ.

Створення SCADA-системи — складна і трудомістка робота, виконання якої під силу тільки великому висококваліфікованому та злагодженому колективу розробників, оскільки тільки сам процес її створення вже містить у собі понад десяток стадій: передпроектні дослідження, технічне завдання, технічна пропозиція, ескізний проект, технічний проект, робочий проект, виготовлення, налагодження, випробування, введення в дію та (здебільшого) подальший технічний супровід та підтримка. Розробка SCADA-системи являє собою величезну науково-технічну проблему, а її впровадження вимагає значних капіталовкладень. Всі SCADA-системи, що створені та ті, що створюються за допомогою сформованої методології — містять у собі результати багаторічних досліджень сотень та тисяч інженерів, конструкторів та технологів, що брали участь у розробці проектних рішень.

За сучасними світовими тенденціями проектування — СМДУ повинна бути такою, що розвивається. Існує, принаймні, дві вагомі причини, за якими SCADA-система повинна бути змінюваною за часом. По-перше: розробка такого складного об'єкта, як СМДУ, займає тривалий час і економічно вигідно вводити до експлуатації частини системи по мірі їх готовності (введений в експлуатацію базовий варіант — надалі розширюється). По-друге: постійний прогрес об'єктів проектування, технологій виготовлення, обчислювальної техніки та обчислювальної математики призводить до появи нових, більш досконалих математичних моделей і методів, які повинні замінювати старі, менш вдалі аналоги. У зв'язку з цим, SCADA-система повинна мати властивість зручності використання та можливості розширення за допомогою підключення розроблених та / або удосконалених видів забезпечення СМДУ. Ось тут постає питання подаль-

шого вирішення цієї проблеми — це може бути нова розробка або реінжиніринг (reengineering). З комерційної точки зору, реінжиніринг часто вважають єдиним способом збереження успадкованих модулів у експлуатації SCADA-системи, у той час як нову розробку СМДУ — не рекомендується розглядати не тільки з точки зору дефіциту часу, що вже було затрачено на первинну розробку, та, як слід — збільшення економічних витрат, а й з точки зору ризику виникнення структурних помилок. У цей же час реінжиніринг — дає змогу виконати еволюціонування СМДУ шляхом позитивних змін видів її забезпечення з метою підвищення зручності її експлуатації та супроводу.

Завжди перед розробником SCADA-системи поставало питання: у якому вигляді передати розроблену СМДУ замовникові. У деяких випадках замовник сам звужував рамки цієї дилеми та вимагав інсталяційний пакет або вже зібрані його компоненти, також певні обмеження накладає технічне завдання (при його присутності). Проте все це — є етапами вже налагодженого процесу, участь у якому беруть менеджери проекту, прикладні програмісти, інженери-конструктори, технологи, експерти з експлуатації тощо. А що робити, коли велика корпорація (а саме такі створюють SCADA-системи, які дійсно популярні) постає перед питанням розширення ринку за рахунок підключення принципів крос-платформності та мультимовності?

Перший — являє собою сумісність різноманітних операційних систем (що стало особливо актуальним у зв'язку із вільним розповсюдженням \*NIX-подібних систем) та саме при його застосуванні впливає неготовність багатьох виробників СМДУ підтримувати відкриті платформи. Другий — це, взагалі, принцип, із яким пов'язана одна з найважливіших проблем створення SCADA-систем, а саме уніфікація або універсальність.

Цю проблему, можна віднести до «проблеми початку», під якою слід розуміти, що всі сучасні SCADA-системи (різного галузевого призначення), на превеликий жаль, сучасними не є — і це пов'язано, перш за все, з тим, що створювались вони на тих мовах, які були актуальні у самому початку їх розробки. Більшість з них — через 3...4 роки не витримує підвищених вимог щодо швидкості роботи із відтвореним графічним зображенням та його обчислювальним відновленням (рендерінгом), а трансформація вихідного коду з однієї мови в іншу, виходячи з того, що сучасні SCADA-системи можуть складатися з декількох мільйонів рядків коду, може зайняти місяці і навіть роки (!). Процес проектування нової SCADA-системи триває, при встановленому порядку, кілька років. За цей час, у більшості галузей з'являються нові наукові ідеї та рішення, які виводять виробництво на новий рівень і породжують нове покоління машин, приладів та установок. Високої ефективності СМДУ, яка виражається, перш за все, через мінімізацією часових, а, відповідно, й матеріальних витрат при вирішенні проектних завдань, домагаються за рахунок удосконалення видів забезпечення СМДУ.

Удосконалена СМДУ — спеціалізована система із максимальним використанням уніфікованих модулів. Вимоги високої ефективності та універсальності, як правило, суперечливі (стосовно до SCADA-систем це положення зберігає свою силу). Вочевидь, що при цьому зростає число різноманітних технічних засобів проектування. Щоб знизити витрати на розробку багатьох спеціалізованих технічних засобів, доцільно будувати їх на основі максимального використання уніфікованих складових частин, де необхідною умовою уніфікації — стає пошук спільних рис та здатностей у різноманітних технічних об'єктах, які планується використовувати під час створення SCADA-систем. Таким чином, реінжиніринг містить у собі процеси реорганізації та реструктуризації СМДУ, переведення окремих компонентів системи в іншу, сучаснішу мову програмування, а також процеси модифікації або модернізації структури і системи даних. При цьому архітектура системи може залишатися незмінною. Реінжиніринг SCADA-систем дозволить, значною мірою, подолати протиріччя між темпами розвитку науки і техніки та процесів проектування, підвищити ефективність обслуговування СЕУ, скоротити експлуатаційні витрати. Головним результатом при розробці цільової програми реінжинірингу SCADA-систем — стане формування основ його методології, що утворить фундамент наукового потенціалу, який забезпечить подальший успіх усім СМДУ СЕУ, що були перепроєктовані.

УДК 517.977.5:626.54

А.А. Омельчук, аспірант,  
А.В. Рудакова, канд. техн. наук, доц.,  
О.В. Поливода, канд. техн. наук,  
Херсонський нац. техн. ун-т, steel\_john@mail.ru

## ЗАДАЧА ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ СПУСКА-ПОДЪЕМА СУДНА С ПОМОЩЬЮ СЛИПА

У статті розглянута постановка задачі оптимального управління складною багатоприводною системою спуску і підйому судна. Отримано модель у просторі станів, що описує рух судна в процесі спуску-підйому. Сформований функціонал цілі, який дозволяє мінімізувати відхилення значень параметрів руху від заданих.

*Ключові слова:* сліп; керований спуск судна на воду; оптимальне керування.

В статье рассмотрена постановка задачи оптимального управления сложной многоприводной системой спуска и подъема судна. Получена модель в пространстве состояний, описывающая движение судна в процессе спуска-подъема. Сформирован функционал цели, который позволяет минимизировать отклонения значений параметров движения от заданных.

*Ключевые слова:* слип; управляемый спуск судна на воду; оптимальное управление.

The article considers the problem of optimal control of the complex multiple motors system to launch and pull out ships. The state space model, which describes the movement of the vessel during the descent-ascent, is obtained. The functional purpose, that allows to minimize the deviations of values from the set values of motion parameters, is formed.

*Keywords:* slipway; controlled launch of the ship; optimal control.

Для перемещение судов в процессе спуска-подъема широко применяются такие многоприводные судоподъемные комплексы как поперечный слип [1]. Движение судна на слипе должно осуществляться с постоянной скоростью, без перекосов, но из-за влияния различных случайных факторов при движении зачастую возникают нештатные и аварийные режимы работы [2, 3]. Для управления движением сложного объекта «судно-тележки» используется изменение тяговых усилий электродвигателей лебедок слипа. При этом в зависимости от положения, перемещаемого на слипе судна, должны формироваться соответствующие сигналы управления движением тележек, связанных общим объектом (корпусом судна) [4]. На рис. 1 рассмотрены силы, действующие на распределенный, движущийся по направлению оси  $x$ , объект «судно-тележки».

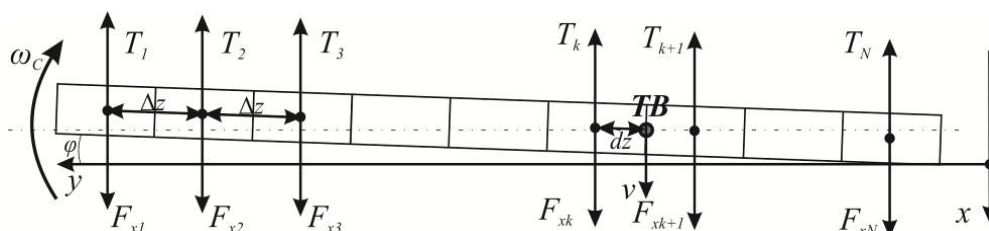


Рис. 1. Действие сил на объект «судно-тележки»

Сложный процесс перемещения можно разделить на два вида движений: поступательное со скоростью  $v$  и ускорением  $a$ , и вращательное с угловой скоростью  $\omega$  и углом поворота  $\varphi$ .

Уравнение поступательного движения судна имеет вид

$$\sum_{i=1}^N F_{xi} - \sum_{i=1}^N T_i = ma \quad (1)$$

где  $T_i$  — сила натяжения троса  $i$ -той тележки;

$F_{xi}$  — проекция всех сил, действующих на  $i$ -тую тележку и обуславливающих ее перемещение по слипу;

$m = m_c + N \cdot m_t$  — масса объекта «судно-тележка»,

$m_c$  — масса судна,

$N$  — количество тележек,

$m_t$  — масса тележки;

$a$  — ускорение движения центра масс объекта «судно-тележки».

Уравнение вращательного движения судна имеет вид

$$J \frac{d\omega}{dt} = \sum M = -\sum_{i=1}^N F_{xi} [(k-i)\Delta z + dz] \cos \varphi + \sum_{i=1}^N T_i [(k-i)\Delta z + dz] \cos \varphi \quad (2)$$

где  $J$  — момент инерции судна,

$\omega$  — скорость вращения судна вокруг точки вращения (ТВ);

$\sum M$  — суммарный момент сил, действующих на объект;

$\Delta z$  — расстояние между центрами соседних тележек;

$dz$  — расстояние от точки вращения (центра масс объекта) до центра  $k$ -й тележки (см. рис. 1).

На основе уравнений движения (1) и (2) можно записать модель объекта «судно-тележки» в пространстве состояний в виде

$$\dot{x}_1 = x_2, \quad \dot{x}_2 = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^N F_{xi}(x_1) - \frac{T_m}{m} \sum_{i=1}^N u_i, \quad (3)$$

$$\dot{x}_3 = x_4, \quad \dot{x}_4 = \frac{1}{J} \sum_{i=1}^N (T_m u_i - F_{xi}(x_1)) \cdot [(k-i)\Delta z + dz] \cdot \cos x_3, \quad (4)$$

где  $x_1 = l$  — перемещение центра масс судна по оси  $x$ ;

$x_2 = v$  — скорость поступательного движения центра масс вдоль оси  $x$ ;

$x_3 = \varphi$  — угол поворота судна;

$x_4 = \omega$  — скорость вращения судна;

$\mathbf{u} = (u_1 \quad u_2 \quad \dots \quad u_N)^T$  — вектор управления,  $u_i = T_i / T_m$ , с ограничениями на управление  $0 \leq u_i \leq 1, i = \overline{1, N}$ ;

$T_m$  — предельно допустимое натяжение троса.

Полученная модель является нелинейной, 4-го порядка, с переменной структурой (в зависимости от нахождения центра вращения в соответствующей матрице могут изменяться знаки коэффициентов на «+» или «-»). Задача оптимального управления представляет собой задачу стабилизации (прекращения) вращательных движений и поддержания равномерного поступательного движения. Это обеспечивается включением в функционал цели отклонений параметров движения объекта от эталонных значений и затрат на управление, таким образом

$$\mathbf{J} = \int_{t_0}^{t_f} (\Delta \mathbf{x}^T \mathbf{R}_1 \Delta \mathbf{x} + \Delta \dot{\mathbf{x}}^T \mathbf{R}_2 \Delta \dot{\mathbf{x}} + \mathbf{u}^T \mathbf{Q} \mathbf{u}) dt \rightarrow \min, \quad (5)$$

$$\Delta \mathbf{x} = \mathbf{x} - \mathbf{x}_s, \quad \mathbf{x}_s = (x_1 \quad v_s \quad 0 \quad 0)^T, \quad \Delta \dot{\mathbf{x}} = (0 \quad \dot{x}_2 - a_s \quad 0 \quad 0)^T.$$

Для управления движением судна (процессом спуска или подъема) необходимо использовать методы адаптивного управления.

Решение поставленной задачи позволит получить необходимые параметры для сигналов задания по управлению отдельными электродвигателями. Обеспечение согласованной работы электроприводов судоподъемного сооружения в соответствии с предложенными стратегиями управления позволит повысить эффективность функционирования слипа.

## Литература

1. Пиляев С.И. Судоподъемные и судоспускные сооружения / С.И. Пиляев, Ф.В. Морозов. — М.: МИСИ, 1993. — 107 с.

2. Омельчук, А.А. Проблемы узгодженого управління складною електромеханічною системою / Ю.О. Лебеденко, Г.В. Рудакова // Наук. пр. НУХТ, 2013, № 49. — С. 19 — 23.
3. Омельчук, А.А. Моделирование движения спусковых тележек слипа / Ю.А. Лебеденко, А.В. Рудакова // Вестн. Херсонского нац. техн. ун-та, 2013, № 2(47). — С. 265 — 270.
4. Омельчук А.А. Стратегия согласованного управления многоприводной системой спуска и подъема судна / А.А. Омельчук, Ю.А. Лебеденко, А.В. Рудакова // Автоматика-2014: XXI міжнар. конф. з автоматичного управління, м. Київ, 23-27 вересня 2014р. — К.: Вид-во НТУУ «КПІ» ВПІ ВПК «Політехніка», 2014. — С. 323

УДК 629.78

**Н.В. Ефименко**, канд. тех. наук, доц., НПП  
«Хартрон-Юком»,

**А.Г. Меланченко**, канд. тех. наук,

**В.С. Хорошилов**, д-р тех. наук, проф., ГП «КБ  
«Южное»

## **УПРАВЛЕНИЕ ОРИЕНТАЦИЕЙ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ БЕЗ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИНФОРМАЦИИ ИЗМЕРИТЕЛЕЙ УГЛОВЫХ СКОРОСТЕЙ**

Розглядаються питання побудови алгоритмів управління орієнтацією без використання інформації вимірювачів кутової швидкості. Приведені результати моделювання роботи запропонованих алгоритмів.

*Ключові слова:* космічний апарат; вимірювач кутової швидкості; алгоритми управління.

Рассматриваются вопросы построения алгоритмов управления ориентацией без использования информации измерителей угловой скорости. Приведены результаты моделирования работы предложенных алгоритмов.

*Ключевые слова:* космический аппарат; измеритель угловой скорости; алгоритмы управления.

The problems of construction of attitude control algorithms without using of angular rate sensors information are considered. The results of proposed algorithms work modeling are given.

*Keywords:* spacecraft; angular rate sensor, control algorithms.

Космическая техника сегодня представлена широким спектром летательных аппаратов, различающихся своим назначением, габаритно-массовыми характеристиками, составом бортового оборудования. Независимо от назначения и размеров космического аппарата (КА), одной из основных его систем является система управления движением (СУД). От ее работоспособности зависит эффективность функционирования всего аппарата в целом, а отказ СУД фактически означает «потерю» аппарата с точки зрения его использования по назначению. Основная функция СУД — управление движением КА распадается на две практически независимые задачи: управление движением центра масс КА и управление вращением аппарата вокруг центра масс. Решение последней задачи осуществляется с помощью отдельной подсистемы управления ориентацией и стабилизации (СУОС). Любая система управления угловым движением КА предполагает использование позиционных датчиков и гироскопических измерителей угловой скорости (ИУС). Несмотря на высокую надёжность ИУС, существует вероятность их отказов. В этом случае для обеспечения работоспособности СУОС необходимо полностью или частично восстановить информацию об угловой скорости по показаниям позиционных датчиков. Примером такой ситуации является нештатная ситуация, возникшая на КА «Січ-2», когда были выявлены периодические сбои (отсутствие обменов по одному из измерительных каналов) ИУС. Кроме того, при отказе от использования в контуре управления КА ИУС снижается масса и энергопотребление КА, что тоже не маловажно при создании КА различного назначения. В до-

кладе рассмотрен широкий спектр разрабатываемых в настоящее время космических аппаратов: от малых КА массой до 1000 кг, до больших КА массой свыше 1000 кг. Проанализированы задачи, которые должны решать системы управления таких аппаратов, и приведен необходимый приборный состав. Особое внимание уделено вопросам построения алгоритмов управления ориентацией, в которых в случае отказа ИУС информация об угловой скорости получается путем обработки информации позиционного датчика. Первая подобная система была реализована на космическом аппарате «Egypstsat-1», [1]. В этой системе управления в двух режимах работы: первоначального построения ориентации и дежурном режиме информация об угловой скорости получалась путем обработки информации о проекциях вектора магнитной индукции Земли на оси связанной системы координат в регуляризованном эллипсоидальном наблюдателе [2]. Алгоритм наблюдателя имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} \tilde{x}_{k+1} &= A_k \hat{x}_k, \quad \tilde{H}_{k+1} = A_k \hat{H}_{k+1} A_k^T, \quad \tilde{y}_{k+1} = y_k - C_{k+1} \tilde{x}_{k+1}, \quad \hat{x}_{k+1} = \tilde{x}_{k+1} + \beta_{k+1} K_{k+1} \tilde{y}_{k+1} \\ \hat{H}_{k+1} &= \rho_{k+1} \left( \tilde{H}_{k+1} - \beta_{k+1} K_{k+1} C_{k+1} \tilde{H}_{k+1} \right), \quad K_{k+1} = \tilde{H}_{k+1} C_{k+1}^T \sigma_{k+1}^{-2}, \quad \sigma_{k+1}^2 = C_{k+1} \tilde{H}_{k+1} C_{k+1}^T, \\ \beta_{k+1} &= \begin{cases} 0, & |\tilde{y}_{k+1}| \leq \delta; \\ 1 - \frac{\delta}{|\tilde{y}_{k+1}|}, & |\tilde{y}_{k+1}| > \delta, \end{cases} \quad \rho_{k+1} = 1 + \beta_{k+1} \tilde{y}_{k+1}^2 \sigma_{k+1}^{-2}, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $x_k$  — вектор состояния системы,

$y_k = C_k x_k$  — скалярный выход системы,

$\delta$  и  $h$  — параметры настройки фильтра,

$H_k$  — положительно определенная матрица, определяющая геометрию эллипсоида ошибки оценивания.

При построении алгоритма оценки параметров углового движения КА использовалась модель вида

$$J\dot{\omega} = -\omega \times (J\omega) + M_u, \quad 2\dot{Q} = (Q \circ \omega - \omega \circ Q), \quad y = B(Q), \quad (2)$$

где  $\omega$  — вектор абсолютной угловой скорости КА, заданный проекциями на оси связанной системы координат,

$M_u$  — управляющий момент,

$\omega_o$  — орбитальная угловая скорость,

$Q$  — нормированный кватернион, определяющий ориентацию орбитальной и связанной систем координат,

$B(Q)$  — вектор выходных сигналов магнитометра.

По приведенным выше уравнениям была получена линеаризованная модель наблюдаемого процесса, и для нее был построен регуляризованный эллипсоидальный наблюдатель. Оценивались вектор абсолютной угловой скорости  $\omega$  и элементы кватерниона  $Q$ . Алгоритм оценивания структурно подобен алгоритму фильтрации из [3]. Система ориентации обеспечивала следующие технические характеристики:

— точность ориентации в орбитальной системе координат — не хуже  $5^\circ$ ;

— точность стабилизации по угловой скорости — не хуже  $0,01^\circ/\text{с}$ .,

— точность определения параметров углового положения — не хуже  $3^\circ$ .

Алгоритмы управления ориентацией, в которых не использовалась информация ИУС, реализованные на КА «Egypstsat-1» обеспечивают низкие точностные характеристики. Обусловлено это тем, что в качестве позиционного датчика в них использовался магнитометр, являющийся грубым прибором. В настоящее время появились звездные датчики (ЗД), которые имеют высокую частоту обновления информации (до 10 Гц) и способны функционировать при относительно больших угловых скоростях КА (до  $2^\circ/\text{с}$ ). Эти ЗД в принципе позволяют расчетным путем по их



измерениям определять угловые скорости КА с высокой точностью. В докладе исследованы алгоритмы определения параметров углового движения КА структурно подобные тем, которые использовались в системе управления КА «EgypTsat-1» в которых в качестве измерений использовались выходная информация ЗД. Было исследовано два варианта построения алгоритмов: вариант, когда в качестве измерений использовались единичные вектора направления на звезды и вариант, когда в качестве измерений использовался кватернион, определяющий положение КА в инерциальной системе координат. Получены результаты моделирования, подтверждающие возможность получения в этом случае достаточно высоких точностных характеристик системы ориентации.

### Литература

1. Ефименко Н.В. Магнитная система ориентации и стабилизации космического аппарата «EGYPTSAT-1» / Н.В. Ефименко // Проблемы управления и информатики. — 2010. — № 6. — С. 91 — 96
2. Ефименко Н.В. Регуляризованные эллипсоидальные наблюдатели и их применение в задаче определения ориентации космического аппарата / Н.В. Ефименко, А.К. Новиков // Проблемы управления и информатики. — 1998. — № 6. — С. 145 — 155.
3. Лебедев Д.В. Магнитная система управления угловым движением спутника / Д.В. Лебедев, А.И. Ткаченко, Ю.Н. Штепа // Космічна наука і технологія. — 1996. Т.2, № 5. — 6 С.

УДК 629.78

А.Г. Меланченко, канд. техн. наук, ГП «КБ «Южное» им. М.К. Янгеля, a.g.melanchenko@gmail.com

## ЦЕЛЕВОЕ УПРАВЛЕНИЕ КОСМИЧЕСКИМИ АППАРАТАМИ В СОСТАВЕ РАЗРЕЖЕННОГО КЛАСТЕРА

Розглядається метод розподілу цільових завдань проміж КА у складі розрідженого кластеру спостереження Землі, що поєднує відомі підходи вибору КА — переможця за результатами аукціону з наступним узгодженням отриманих результатів на підставі консенсусу. Метод що пропонується потребує менших обчислювальних ресурсів ніж відомі аналоги та не є чутливим до неузгодженості між КА інформації про обстановку та до топології інформаційної мережі кластеру.

*Ключові слова:* космічний апарат; кластер; цільова задача; інформація про обстановку.

Рассматривается метод распределения целевых задач между КА в составе разреженного кластера наблюдения Земли, объединяющий известные подходы выбора КА — победителя по результатам аукциона с последующим согласованием полученных результатов на основе консенсуса. Предлагаемый метод требует меньших вычислительных ресурсов, чем известные аналоги, и нечувствителен к несогласованности между КА информации об обстановке и к топологии информационной сети кластера.

*Ключевые слова:* космический аппарат; кластер; целевая задача; информация об обстановке.

Method of objective problems distribution among satellites of sparse Earth observation cluster that combines certain approaches to selection of satellite-auction winner and successive agreement of results on basis of consensus is proposed. The method demands less computing power than certain analogues and is insensible to inconsistency of situation awareness among satellites and topology of cluster's informational network.

*Keywords:* satellite, cluster, objective problem, situation awareness.

**Введение.** В [1] предложен субоптимальный метод децентрализованного распределения задач наблюдения Земли для разреженного кластера КА, показана высокая эффективность и быстрая сходимость процесса распределения задач. Однако метод базировался на допущении, что одному КА может быть назначено не более одной целевой задачи. С практической точки

зрения иногда более важно иметь возможность пакетного планирования, когда каждому КА кластера назначается не одна, а несколько целевых задач. Для случая компактного кластера, в котором расстояния между КА малы по сравнению с размерами объектов наблюдения (ОН), решение такой задачи было предложено в [2], где кластер может рассматриваться как виртуальный многоэлементный КА, и распределение целевых задач между КА кластера может осуществляться произвольным образом. Для разреженного кластера условия наблюдения одного и того же ОН различными КА могут различаться, что исключает произвольное распределение целевых задач между КА. Для успешного достижения цели, поставленной перед разреженным кластером, необходимо скоординированное пакетное распределение целевых задач между КА.

**Основной материал.** Пусть известен перечень  $N_T$  целевых задач. Необходимо распределить их между  $N_A$  КА кластера так, чтобы каждая задача была назначена не более чем одному КА, максимизировав при этом показатель эффективности миссии. Каждому КА может быть назначено не более  $L_T$  целевых задач, и процесс распределения задач считается завершенным, как только будет распределено  $N_{\min} = \min\{N_T, N_A L_T\}$  задач. КА кластера объединены в неориентированную информационную сеть, имеющую симметричную матрицу смежности  $G(\tau)$  такую, что  $g_{ik}(\tau) = 1$ , если в момент времени  $\tau$  существует линия связи между КА  $i$  и  $k$ . Глобальную целевую функцию определим как сумму локальных показателей эффективности, в качестве которых будем использовать функцию оценки всех целевых задач, назначенных конкретному КА. В такой постановке распределение целевых задач в кластере КА задач представляет собой задачу целочисленного программирования следующего вида:

$$\begin{aligned} \max \sum_{i=1}^{N_A} \left( \sum_{j=1}^{N_T} c_{ij}(x_i, p_i) x_{ij} \right), \sum_{i=1}^{N_A} x_{ij} \leq L_T, \forall i \in I, \sum_{j=1}^{N_T} x_{ij} \leq 1, \forall j \in J, \\ \sum_{i=1}^{N_A} \sum_{j=1}^{N_T} x_{ij} = N_{\min} = \min\{N_T, N_A L_T\}, x_{ij} \in \{0, 1\}, \forall (i, j) \in I \times J, \end{aligned} \quad (1)$$

где двоичная переменная решения  $x_{ij} = 1$ , если выполнение задачи  $j$  назначено КА  $i$ , а  $x_i \in \{0, 1\}^{N_T}$  — вектор,  $j$ -м элементом которого является переменная  $x_{ij}$ .

Вектор  $p_i \in (J \cup \{\emptyset\})^{L_T}$  представляет собой упорядоченную последовательность целевых задач для КА  $i$ , и соответствует маршруту, вдоль которого выполняется наблюдение. Элемент  $p_k$  этого вектора равен  $j \in J$ , если КА  $i$  назначено выполнение целевой задачи  $j$  в точке  $k$  маршрута, и  $\emptyset$  (будем обозначать так «пустую» задачу), если этому КА назначено выполнение менее  $k$  задач. Оператор суммирования в скобках соответствует локальному эффекту выполнения целевых задач для КА  $i$ . Предполагается, что функция оценки удовлетворяет условию  $c_{ij}(x_i, p_i) \geq 0$ . Применительно к рассматриваемой задаче функция оценки может быть интерпретирована как эффект, зависящий от маршрута конкретного КА: длина маршрута (количество отснятых ОН), ценность снимка конкретного ОН для потребителя, убывающая со временем, и т.п.

В отличие от известных подходов, предусматривающих формирование пакетов целевых задач с последующим проведением аукциона по выбору пакета-победителя, предлагаемый метод предусматривает проведение аукционов на уровне отдельных целевых задач до включения их в пакет. Задачи выбираются из априорного плана [2], который формируется на Земле и передается на борт каждого КА кластера. Предлагаемый метод децентрализованного пакетного распределения задач (ДПА) реализуется циклически в виде двухэтапного процесса: формирование единого пакета целевых задач по результатам аукционов на первом этапе с последующим разрешением конфликтов по принципу консенсуса без необходимости согласования информации об обстановке (ИО) между КА кластера.

Моделирование показало, что время распределения задач прямо зависит от  $N_T$  и обратно — от  $L_T$ ; при этом оно практически не зависит от погрешности ИО  $\bar{\Delta}_{SA}$ . Для оценки качества распределения задач полученный результат сравнивался с результатами, полученными с использо-

ванием оптимального алгоритма координации задач при отсутствии погрешностей ИО, и вычислялось среднее значение показателя субоптимальности  $\bar{\Delta}_{opt}$  как разность решения задачи (1) и оптимального решения, выраженная в процентах. Было установлено, что при отсутствии погрешностей ИО результаты предлагаемого метода практически не отличаются от оптимальных ( $\bar{\Delta}_{opt}$  не превышает 3 %). С ростом  $\bar{\Delta}_{SA}$  значение показателя субоптимальности также растет, однако даже при максимальной погрешности ИО его значение не превышает 30 %, что можно считать вполне приемлемым результатом.

**Выводы.** Предлагаемый метод обеспечивает хорошую сходимость и получение приемлемого результата за ограниченное время, что позволит экономно расходовать вычислительные ресурсы бортового компьютера.

### Литература

1. Меланченко А.Г. Децентрализованное распределение задач наблюдения Земли для разреженного кластера низкоорбитальных КА / А.Г. Меланченко, А.А. Синча // 15-я Украинская конференция по космическим исследованиям. — Одесса, 2015.
2. Меланченко А.Г. Целевое управление кластерами космических аппаратов наблюдения Земли / А.Г. Меланченко // Автоматика-2014: Материалы 21-й Междунар. конф. по автоматическому управлению. — К.: «Политехника», 2014. — С. 158 — 159.

УДК 62-50

Л.Д. Акуленко, до-р физ.-мат. наук, проф.,  
ИПМех им. А.Ю. Ишлинского РАН,  
Д.Д. Лещенко, д-р физ.-мат. наук, проф., Одес.  
гос. акад. строит. и архитект.,  
А.Л. Рачинская, канд. физ.-мат. наук, доц., Одес.  
нац. ун-т им. И.И. Мечникова  
rachinskaya@onu.edu.ua

## ОПТИМАЛЬНОЕ ТОРМОЖЕНИЕ ВРАЩАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ ТВЕРДОГО ТЕЛА С ПОЛОСТЬЮ В СРЕДЕ С СОПРОТИВЛЕНИЕМ

Проведено дослідження оптимального за швидкодією гальмування обертань вільного твердого тіла під дією малого керуючого моменту. Припускається, що тіло містить сферичну порожнину, заповнену рідиною великої в'язкості. Крім того, на тверде тіло діє малий гальмуючий момент сил дисипації середовища. Вважається, що тіло динамічно несиметрично. Для динамічно симетричного тіла аналогічні результати одержані в [1]. Визначено оптимальний і квазіоптимальний закони керування для гальмування обертань твердого тіла у формі синтезу, час швидкодії і фазові траєкторії.

*Ключові слова:* оптимальне гальмування; квазіоптимальне гальмування; тверде тіло; в'язка рідина; середина з опором, метод усереднення.

Проведено исследование оптимального по быстродействию торможения вращений свободного твердого тела под действием малого управляющего момента. Предполагается, что тело содержит сферическую полость, заполненную жидкостью большой вязкости. Кроме того, на твердое тело действует малый тормозящий момент сил диссипации среды. Считается, что тело динамически несимметрично. Для динамически симметричного тела аналогичные результаты получены в [1]. Определены оптимальный и квазиоптимальный законы управления для торможения вращений твердого тела в форме синтеза, время быстродействия и фазовые траектории.

*Ключевые слова:* оптимальное торможение; квазиоптимальное торможение; твердое тело; вязкая жидкость; среда с сопротивлением, метод усреднения.

Two minimum-time problems on deceleration of rotations of a free rigid body affected by a small control torque are studied. The problems of time-optimal deceleration of rotations of a rigid body affected by small equal coefficients were studied in [1] for dynamically symmetric and asymmetric bodies. It is assumed that the body contains a spherical cavity filled with highly viscous fluid. The body is subjected to a small retarding torque of viscous friction. A minimum-time problem on deceleration of rotations of a body affected by a small control torque with close but not identical coefficient is studied. This problem can be considered as a quasi-optimal control. It is assumed that the body is dynamically asymmetric. An optimal control law for the deceleration of rotations of the body is synthesized, and the corresponding time and phase trajectories are determined in the first problem. A quasi-optimal feedback control for the deceleration of rotations of the body is constructed the optimal control law, and phase trajectories are found in the second problem.

*Key words:* optimal deceleration, quasi-optimal deceleration, rigid body, viscous fluid, resistive medium, averaging method.

Для проведения исследования рассматривается динамически несимметричное твердое тело. Уравнения управляемых вращений в проекциях на оси, связанной с твердым телом системы координат (уравнения Эйлера) могут быть представлены в виде [1]

$$\dot{\mathbf{G}} + \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{G} = \mathbf{M}^u + \mathbf{M}^r + \mathbf{M}^c \quad (1)$$

где  $\mathbf{G}$  — кинетический момент тела,

$\boldsymbol{\omega} = (p, q, r)$  — вектор абсолютной угловой скорости,

$\mathbf{M}^u$  — вектор управляющего момента сил;

$\mathbf{M}^r$  — момент сил диссипации;

$\mathbf{M}^c$  — момент сил вязкой жидкости в полости тела.

Считается, что момент сил диссипации в (1) порядка  $O(\varepsilon)$ , где  $\varepsilon$  — малый параметр. Рассматривается момент сопротивления среды пропорциональный кинетическому моменту тела [1, 2].

Предполагается, что в полости находится жидкость большой кинематической вязкости, т.е.  $\nu^{-1} \sim \varepsilon$ . Форма полости считается сферической [1, 3].

Управление вращениями твердого тела производится с помощью момента сил, ограниченного по модулю. Компоненты управляющих моментов представлены в виде произведений  $\varepsilon b_i u_i$  ( $i = 1, 2, 3$ ), где величины  $\varepsilon b_i$  характеризуют эффективность системы управления относительно  $i$ -ой оси,  $u_i$  - безразмерные управляющие функции.

Для прикладных задач представляет интерес исследование движения твердого тела с заданным законом управления вида:

$$M_i^u = \varepsilon b_i u_i, \quad u_i = -\frac{G_i}{G}, \quad i = 1, 2, 3. \quad (2)$$

Построено решение задачи оптимального по быстродействию торможения вращений твердого тела с законом управления (2) для коэффициентов управляющего момента  $b_1 = b_2 = b_3 = b$ , где  $b = b(t, G)$ ,  $b = b(t)$  или  $b = \text{const}$ .

Проведено исследование задачи квазиоптимального управления вращениями твердого тела для близких величин  $b_i = \text{const}$  [1, 2].

Получены и исследованы системы нелинейных дифференциальных уравнений, описывающие эволюцию вращения твердого тела. Найдены закон изменения кинетического момента тела и время торможения в аналитическом виде для  $b = \text{const}$ . В рамках асимптотического подхода получены усредненные системы уравнений. Следует отметить, что в случае решения задачи квазиоптимального управления, исследована многопараметрическая система.

В результате проведенных исследований для задач оптимального и квазиоптимального управления определены управляющие функции, время быстродействия (функция Беллмана), эволюции квадрата модуля эллиптических функций  $k^2$ , безразмерных кинетической энергии и кинетического момента. Показано, что на изменение кинетического момента не влияют внутренние силы, обусловленные действием вязкой жидкости в полости. На эволюцию кинетической энергии твердого тела оказывают влияние все возмущающие моменты. Установлены качественные свойства оптимального движения.

## Литература

1. Акуленко Л.Д.. Возмущенные и управляемые вращения твердого тела / Л.Д. Акуленко, Д.Д. Лещенко, А.Л. Рачинская, Я.С. Зинкевич. — Одесса: ОНУ, 2013. — 288 с.
2. Акуленко Л.Д. Квазиоптимальное торможение вращений несимметричного тела в сопротивляющейся среде / Л.Д. Акуленко, Д.Д. Лещенко, А.Л. Рачинская // Известия РАН. Теория и системы управления. — 2014. — № 3. — С. 38 — 45.
3. Акуленко Л.Д. Эволюция вращений спутника с полостью, заполненной вязкой жидкостью / Л.Д. Акуленко, Д.Д. Лещенко, А.Л. Рачинская // Механика твердого тела. — 2007. — Вып. 37. — С. 126 — 139.

УДК 681.533.44

А.М. Топалов, аспірант, НУК ім. адм. Макарова,  
y\_kondrat2002@yahoo.com

## КОМП'ЮТЕРИЗОВАНА СИСТЕМА КОНТРОЛЮ ТА УПРАВЛІННЯ ПАРАМЕТРАМИ ПЛАВУЧОГО ДОКУ

У даній роботі представлена комп'ютеризована система контролю та управління параметрами плавучого доку. Дана система дозволяє проводити докові операції з достатньо високою точністю.

*Ключові слова:* плавучий док; баластний танк; комп'ютеризована система; ПЛК.

В данной работе представлена компьютеризированная система контроля и управления параметрами плавучего дока. Данная система позволяет проводить доковые операции с достаточно высокой точностью.

*Ключевые слова:* плавучий док; балластный танк; компьютеризированная система; ПЛК.

The computerized control system of floating dock parameters is presented in the paper. This system allows to carry out dock operations with sufficient high accuracy.

*Keywords:* floating dock; ballast tank; computerized system; PLC.

В період експлуатації судна, незалежно від його типу, виникає необхідність в повному огляді і ремонті підводної частини. В даний час основними засобами підйому і ремонту корпусів суден з подальшим спуском вважається застосування плавучих доків.

Операції спуску чи підняття судна представляють собою складні відповідальні процеси, що вимагають оперативного контролю та керування параметрами виконавчих механізмів плавучого доку (таких як затвори, баластні насоси та ін.), а також контролю параметрів посадки доку в цілому (рівень води в баластних відсіках, осадка, кути крену і диференту, величини перегину і прогину та ін.) [1]. При цьому плавучий док повинен мати достатню остійність в будь-якому положенні при зануренні (спливанні) з судном чи без нього, а загальна і місцева міцність повинні виключати можливість деформації судна і доку.

Для моніторингу і управління параметрами плавучого доку авторами розроблена спеціальна комп'ютеризована система, що основана на принципах дистанційного моніторингу та операторського управління операціями плавучого доку з використанням програмного забезпечення SCADA [2, 3]. Система плавучого доку призначена для вимірювання значень осадки, перегину, прогину, кутів крену і диференту плавучого доку, а також для контролю клапанів вхід-вихід та вимірювання рівня рідини, температури і об'єму баластних танків. Функціональна схема комп'ютеризованої системи контролю та управління плавучого доку наведена на рис. 1.

Система для управління операціями плавучого доку має трирівневу структуру (рівень датчиків, контролерний рівень, рівень оператора). Датчики рівня ДР і датчики температури ДТ використовують для отримання інформації щодо поточного значення рівня  $L$  і температури  $T$  в баластних танках, а також для визначення глибини занурення контрольних точок лівої і правої веж плавучого доку. Вихідні сигнали датчиків надходять на модуль збору даних (МЗД). МЗД перетворює аналогові сигнали з датчиків рівня  $L$  і датчиків температури  $T$  у відповідні цифрові сигнали, які передаються в програмований логічний контролер (ПЛК). ПЛК містить програмний блок розрахунку параметрів доку ПБРПД, програмний блок розрахунку об'єму рідини ПБРОР, а також програмний блок управління клапанами ПБУК. Всі програмні блоки реалізовані з використанням спеціалізованого програмного забезпечення SCADA [2, 3]. Інформація про поточні значення рівня  $L$  рідини і температури  $T$  в кожному баластному танку, остійність  $Q$ , крен  $R$ , диферент  $D$ , значення перегину і прогину  $H/S$  плавучого дока відображається на екрані комп'ютера оператора (КО) за допомогою спеціалізованого людино-машинного інтерфейсу.

Людино-машинний інтерфейс дозволяє оператору контролювати вхідні ( $K_{вх}$ ) та вихідні ( $K_{вих}$ ) клапани для наповнення і відкачування баластних танків доку. Керувальні сигнали  $U_v$ , що надходять з КО, обробляються в ПБУК на ПЛК і надсилаються в модуль дискретного виводу (МДВ). МДВ здійснює розподіл дискретних сигналів відкриття і закриття клапанів  $K_{вх}$  і  $K_{вих}$ .

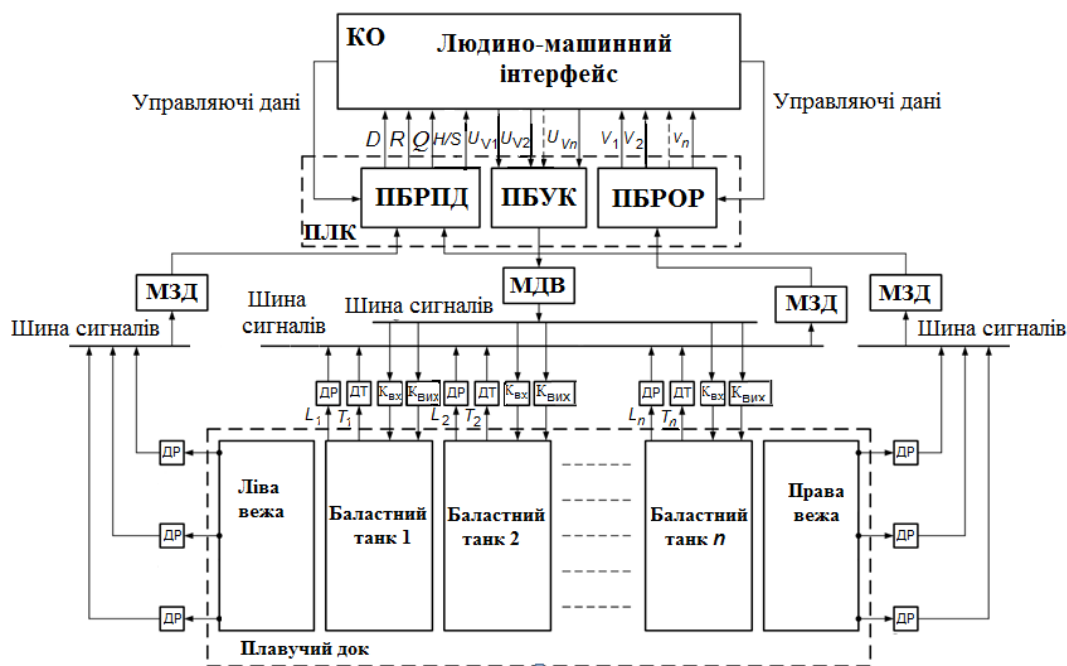


Рис. 1. Структура системи контролю та управління параметрами плавучого доку

Запропонована комп'ютеризована система контролю і управління параметрами плавучого доку дозволяє проводити докові операції спуску та підйому судна з достатньо високою точністю, зокрема контролювати в режимі реального часу осадку, кути крену та диференту, значення перегину та прогину плавучого доку. Застосування програмного забезпечення SCADA дає можливість підвищити оперативність керування та скоротити технологічні витрати при проведенні докових операцій. Слід відзначити, що авторами також розроблена експериментальна модель комп'ютеризованої системи контролю і управління параметрами плавучого доку. Результати експериментальних досліджень, що отримані за допомогою даної моделі, підтверджують високу ефективність розробленої комп'ютеризованої системи та детально обговорюються в доповіді. Подальші дослідження доцільно проводити в напрямку розробки систем автоматичного управління доковими операціями.

### Література

1. Гордеев Б.Н. Автоматизированная система управления доковыми операциями / Б.Н. Гордеев, В.И. Каратеев, В.Н. Чегринцев, В.Д. Юрков // Портовые технологии и техника мореплавания. — 2007. — Спецвыпуск. — С. 93 — 98.
2. Андреев Е.Б. SCADA-системы: взгляд изнутри / Е.Б. Андреев, Н.А. Куцевич, О.В. Синенко. — М.: РТСОфт, 2004. — 176 с.
3. Kondratenko Y.P. Measurement of Liquid Level in Tanks under Non-Stationary Conditions Based on Radar Sensor System / Y.P. Kondratenko, O.V. Korobko, O.V. Kozlov, O.S. Gerasin, A.M. Topalov // Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications, and Computer Science, in Proc. Int. Conf. TCSET'2014. — Lviv-Slavske. — 2014. — P. 797 — 799.

УДК 621.9.04+62.505;519.7

С.І. Осадчий, д-р техн. наук, проф.,  
М.М. Мельніченко, інженер,  
Кіровоград. нац. техн. у-т srg2005@ukr.net

## ОПТИМАЛЬНЕ СПОСТЕРЕЖЕННЯ ЛІНІЙНИХ ПРИСКОРЕНЬ ОБ'ЄКТУ ЗА ДАНИМИ ВІД 3D MEMS АКСЕЛЕРОМЕТРУ

Обґрунтовано новий алгоритм синтезу оптимального стохастичного спостерігача у частотній області та знайдено структуру і параметри такого спостерігача, який забезпечує отримання оцінки вектору прискорень платформи гексапода за сигналами мікомеханічного акселерометру. Наведені матрична передавальна функція такого акселерометру та матриця спектральних щільностей його шуму, знайдені за експериментальними даними.

*Ключові слова:* гексапод; акселерометр; спостерігач; факторизація; спектральна щільність.

Обосновано новый алгоритм синтеза оптимального стохастического наблюдателя в частотной области и найдено структуру и параметры такого наблюдателя, который обеспечивает получение оценки вектора ускорений платформы гексапода по сигналам микромеханического акселерометра. Приведены матричная передаточная функция такого акселерометра и матрица спектральных плотностей его шума, найденные по экспериментальным данным

*Ключевые слова:* гексапод; акселерометр; наблюдатель; факторизация; спектральная плотность

It was justified a new synthesis optimal stochastic algorithm in the frequency domain of the observer and the structure and parameters of such an observer were found. This observer provides estimation of a hexapod platform acceleration vector on the basis of the output signals of a micromechanical accelerometer.

*Key words:* hexapod; accelerometer; observer; factorization; spectral density.

Забезпечення руху центру мас платформи гексапода, безпілотного літального апарату або іншого рухомого об'єкту по заданій просторово-часовій траєкторії вимагає виміру координат центру мас зазначеного об'єкту з високою точністю. Автономне розв'язання такої задачі може бути здійснене методом числення шляху [1] за сигналами від лінійних 3d мікро електромеханічних (mems) акселерометрів. Основною вадою на шляху застосування такого методу визначення координат є значні шуми вимірювання притаманні зазначеним акселерометрам. Боротьба з такими шумами ґрунтується на побудові оптимальних систем спостереження або комплексування.

Аналіз досвіду розробки оптимальних спостерігачів прискорень рухомих об'єктів за сигналами від mems сенсорів, синтезованих у просторі станів, вказує на нестабільний характер роботи таких пристроїв в реальних умовах функціонування. Експериментальне дослідження динаміки 3d mems акселерометрів в умовах випадкової просторової хитавиці їх основи, частина результатів якої представлена в роботі [2], дозволило визначити декілька джерел погіршення точності роботи оптимальних калмановських спостерігачів. По-перше, це вузько смуговий та векторний характер дії випадкових завад вимірювання, заміна яких білим шумом є достатньо грубою. По-друге – суттєвий перехресний вплив каналів вимірювання 3d mems сенсору, що не дозволяє здійснювати синтез оптимального спостерігача окремо для кожного вимірювального каналу.

Мета даної роботи полягає в обґрунтуванні нового методу синтезу оптимального багатовимірного спостерігача, призначеного для роботи в умовах дії векторних кольорових стаціонарних випадкових корисних сигналів та завад вимірювання.

Для досягнення цієї мети розроблено новий алгоритм синтезу оптимального багатовимірного спостерігача у частотній області, визначено динаміку 3d mems акселерометру, знайдена матриця передавальних функцій оптимального спостерігача та визначені граничні можливості підвищення точності оцінювання прискорень центру мас платформи гексапода за рахунок оптимальної фільтрації.

Експериментальна перевірка рішень на прикладі оцінювання сигналів на виході акселерометра tri-6050 довела можливість зменшення інтенсивності похибок на порядок.



## Література

1. Філяшкін М.К. Інерційно-супутникові навігаційні системи: навч. посіб./ М.К. Філяшкін, В.О. Рогожин, А.В. Скрипиць, Т.І. Лукінова. — К.: НАУ-друк, 2009. — 272с.
2. Osadchy S.I. Optimal suppression of an electromagnetic interference effect on an acceleration measuring device/ S.I. Osadchy, V.A. Zozulya // Scientific Journal “Electronics and control systems”. — № 4. — 2014. — К.: НАУ, 2014. — С. 25 — 29

УДК 681.51

**В.Л. Тимченко**, д-р техн. наук, проф., Нац. ун-т  
кораблестроения, vl\_timchenko@mail.ru

# ОПТИМИЗАЦИЯ НЕЛИНЕЙНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ МОРСКИМИ ПОДВИЖНЫМИ ОБЪЕКТАМИ

Розглянуто синтез керуючих функцій для забезпечення оптимальних траєкторій стабілізації морських рухомих об'єктів на основі нелінійних систем змінної структури зворотних зв'язків. Сформовано рівняння балансувальних режимів та нелінійні моделі реалізації керуючих функцій.

*Ключові слова:* нелінійні моделі; морські рухомі об'єкти; системи змінної структури.

Рассмотрен синтез управляющих функций для обеспечения оптимальных траекторий стабилизации морских подвижных объектов на основе нелинейных систем переменной структуры обратных связей. Сформированы уравнения балансируемых режимов и нелинейные модели реализации управляющих функций.

*Ключевые слова:* нелинейные модели; морские подвижные объекты; системы переменной структуры.

The synthesis of controls is considered for providing of optimal trajectories of stabilizing of marine mobile objects on the basis of the nonlinear systems of variable structure of feed-backs. Equalizations of the balancing modes and nonlinear models of realization of controls are formed.

*Keywords:* nonlinear models; marine mobile objects; systems of variable structure.

Для підвищення ефективності управління морськими подвижними об'єктами (МПО) в умовах неопределенності на основі оптимізації динамічних процесів основної і принципіальної складністю при використанні класических методів синтезу являється необхідність рішення крайових задач для синтезу програмного управління і матричних урівнень Риккати при побудові оптимального регулятора. Формування критерієв оптимальності на основі квадратичних критерієв оптимальності передбачає формалізацію матриць вагових коефіцієнтів, що не завжди може бути зроблено коректно і потребує виконання додаткових процедур вичислень. В цій зв'язі існує потреба розвитку на основі робастно-оптимальних систем [1,2] інженерних методів оптимального управління для задач стабілізації МПО, які дозволяють при високих вимогах до точності управління виділити два основних оптимізуємих, природно екстремальних, фізических якостів: мінімум витрати енергії при управлінні і максимальне швидке дієвство для перехідного процесу управління.

Системи на основі зворотних зв'язків змінної структури дозволяють вирішувати практическі задачі побудови оптимальних траєкторій руху для різних критерієв оптимальності і виду гранических умов. Даний підхід складається з основних етапів [3]: планування оптимальної траєкторії з урахуванням фізическої обмеженості керуючих впливів; визначення моментів переключення керуючих функцій в ланках зворотних зв'язків об'єкта; синтез керуючих функцій в ланках зворотних зв'язків багатовимірного об'єкта.

Уравнения оптимальных траекторий, например процесса «разгона» МПО, возможно представить в виде [3]

$$\mathbf{V}(t_1) = \mathbf{V}(0) + \dot{\mathbf{V}}(0)(t_1 - t_0), \dots \dots \dots (1)$$

$$\mathbf{V}(t_{i+1}) = \mathbf{V}(t_{i1}) + \dot{\mathbf{V}}(t_i)(t_{i+1} - t_i) + \dots + \mathbf{V}(0) \frac{(t_{i+1} - t_i)^k}{k!}.$$

где  $k \leq k_{\text{огр}}$  — ограничено требованием физической реализуемости управления;

$t_i$  — моменты переключения управляющих функций в обратных связях ( $i = 1, \dots, m$ ).

Возможность построения оптимальной траектории движения для общей нелинейной модели МПО вида

$$\dot{\mathbf{V}}(t) = \mathbf{A}[\mathbf{V}(t)]\mathbf{V}(t) + \mathbf{B}\mathbf{U}(t) + \mathbf{C}\mathbf{F}(t), \quad (2)$$

где  $\mathbf{V}(t)$ ,  $\mathbf{U}(t)$ ,  $\mathbf{F}(t)$  — векторы скорости движения, управления и возмущения, соответственно;

$\mathbf{A}(\mathbf{V})$ ,  $\mathbf{B}$ ,  $\mathbf{C}$  — матрицы параметров нелинейной модели МПО.

Позволяет [3] на основе представления траекторий вида (1) и предложенного порядка формирования уравнений баланса сил (моментов) для соответствующих производных координат состояния объекта провести синтез управляющих воздействий.

Определим соответствующие управляющие функции на основе дифференциального преобразования уравнения (2) относительно соответствующих нулевых производных вектора скоростей МПО, что формирует баланс приведенных сил управления, демпфирования и контролируемого возмущения, а также их производных, для нелинейных моделей МПО в виде

$$\ddot{\mathbf{V}} = \mathbf{A}(\mathbf{V})\dot{\mathbf{V}} + \dot{\mathbf{A}}(\mathbf{V})\mathbf{V} + \mathbf{B}\dot{\mathbf{U}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{F}}; \quad (3)$$

$$\ddot{\mathbf{V}} = \mathbf{A}(\mathbf{V})\dot{\mathbf{V}} + 2\dot{\mathbf{A}}(\mathbf{V})\dot{\mathbf{V}} + \ddot{\mathbf{A}}(\mathbf{V})\mathbf{V} + \mathbf{B}\ddot{\mathbf{U}} + \mathbf{C}\ddot{\mathbf{F}}.$$

Векторно-матричные преобразования системы (3) дают выражения управлений (опуская аргумент  $\mathbf{V}$  при  $\mathbf{A}$ ) для нулевых векторов соответствующих производных скорости

$$\mathbf{B}\ddot{\mathbf{U}} + \mathbf{A}\mathbf{B}\dot{\mathbf{U}} = -(\dot{\mathbf{A}} + \mathbf{A}^2)\mathbf{V} - \mathbf{A}\mathbf{C}\dot{\mathbf{F}} - \mathbf{C}\dot{\mathbf{F}}; \quad (4)$$

$$\mathbf{B}\ddot{\mathbf{U}} + \mathbf{A}\mathbf{B}\dot{\mathbf{U}} + (\mathbf{A}^2 + 2\dot{\mathbf{A}})\mathbf{B}\mathbf{U} = -(\mathbf{A}^3 + 2\dot{\mathbf{A}}\mathbf{A} + \mathbf{A}\dot{\mathbf{A}} + \ddot{\mathbf{A}})\mathbf{V} - (\mathbf{A}^2 + 2\dot{\mathbf{A}})\mathbf{C}\mathbf{F} - \mathbf{A}\mathbf{C}\dot{\mathbf{F}} - \mathbf{C}\ddot{\mathbf{F}}.$$

Таким образом, уравнения (4) формируют систему управления (рис. 1, представлено без учета сил возмущения) для движения по соответствующим отрезкам траекторий с нулевыми значениями вектора координат  $\ddot{\mathbf{V}}(t) = 0$  и  $\ddot{\mathbf{V}}(t) = 0$ . При этом уравнения (4) определяют баланс приведенных сил (моментов) управления и демпфирования (т.е. балансировочный режим), которые, собственно, и обеспечивают движение объекта управления по заданным оптимальным траекториям МПО.

**Литература**

1. Кунцевич В.М. Синтез робастно-оптимальных адаптивных систем управления нестационарными объектами при ограниченных возмущениях / В.М. Кунцевич. // Междунар. науч.-техн. журн. «Проблемы управления и информатики». — 2004. — № 2. — С. 19 — 31.
2. Емельянов С.В. Новые типы обратной связи: управление при неопределённости / С.В. Емельянов, С.К. Коровин. — М.: Наука, Физматлит, 1997. — 352 с.
3. Тимченко В.Л. Робастно-оптимальные системы динамического позиционирования морских подвижных объектов / В.Л. Тимченко, О.А. Ухин // Тр. Всероссийского совещания по проблемам управления. — М.: ИПУ РАН, 2014. — С. 3597— 3605. — Режим доступа: <http://vspu2014.ipu.ru/about>

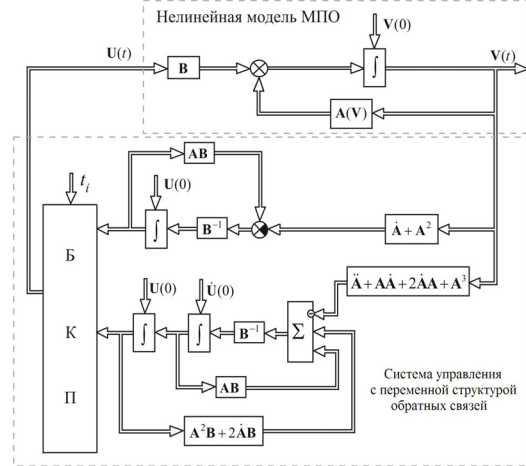


Рис. 1. Структурная схема системы управления нелинейным объектом

УДК 621.9.04+62.505;519.7

В.А. Зозуля, канд. техн. наук, доц., Кіровоград.  
нац. техн. ун-т irish38@ukr.net

## СТАБІЛІЗАЦІЯ КУТОВОГО ПОЛОЖЕННЯ РУХОМОЇ ПЛАТФОРМИ МЕХАТРОННОЇ МАШИНИ В УМОВАХ СТОХАСТИЧНОЇ ХИТАВИЦІ ЇЇ ОСНОВИ

Обґрунтовано ряд нових алгоритмів синтезу оптимальних робастних систем стабілізації кутового положення рухомої платформи в умовах регулярної, випадкової та стохастичної хитавиці основи мехатронної машини.

*Ключові слова:* оптимальна багатовимірна система; регулятор; рухома платформа.

Обосновано ряд новых алгоритмов синтеза оптимальных робастных систем стабилизации углового положения подвижной платформы в условиях регулярной, случайной и стохастической качки мехатронной машины.

*Ключевые слова:* оптимальная многомерная система; регулятор; подвижная платформа.

Substantiated a number of new algorithms for optimal synthesis of robust systems for stabilizing the angular position of the movable platform in a regular, random and stochastic pitching mechatronic machine.

*Keywords:* optimal multidimensional system; the regulator; the moving platform.

В результаті нової постановки та розв'язку задачі синтезу оптимальної багатовимірної системи стабілізації розроблено новий метод проектування структури та параметрів багатовимірного регулятора з робастними властивостями для рухомої платформи мехатронної машини. Відмінною рисою методу є комплексне використання підходів до розробки оптимальних систем, обґрунтованих проф. Лариним В.Б. [1] та проф. Блохіним Л.М. [2], що дозволило формалізувати процедуру вибору службових матриць.

В результаті застосування нового методу розроблено ряд алгоритмів синтезу оптимальних робастних систем стабілізації кутового положення рухомої платформи в умовах регулярної, випадкової та стохастичної хитавиці основи мехатронної машини. Отримані алгоритми реалізовані у вигляді пакетів програм, орієнтованих на використання у середовищі MatLab.

Досягнення робастних властивостей досягнуто за рахунок використання у квадратичному критерію якості стабілізації додаткових складових, які враховують чутливість замкненої системи до зміни параметрів моделі динаміки об'єкта керування. При цьому розглянуті три типи параметричних збурень: адативні, мультиплікативні та дробово-раціональні.

Алгоритмізація процедур синтезу здійснена на основі нового класу факторизації відповідним чином складеної поліноміальної матриці комплексного аргументу з використанням ідей К.І. Науменко [3].

### Література

1. Ларин В.Б. О синтезе стабилизирующих регуляторов с использованием линейных матричных неравенств / В.Б. Ларин // Пробл. упр. и информатики. — 2000. — № 5. — С. 18 — 23.
2. Азарсков В.Н. Методология конструирования оптимальных систем стохастической стабилизации: Монография / В.Н. Азарсков, Л.Н. Блохин, Л.С. Житецкий / Под ред. Блохина Л.Н. — К.: Книжное издательство НАУ, 2006. — 440 с.
3. Оптимизация линейных инвариантных во времени систем управления: Монография / Ф.А. Алиев, В.Б. Ларин, К.И. Науменко, и др. — К.: Наук. думка, 1978. — 327с.

УДК 629.78.783

Ю.А. Кузнецов, канд. техн. наук, доц.,  
О.А. Лабазов,  
НПП Хартрон-Аркос yur\_kuznyets@rambler.ru

## БЕЗГИРОСКОПНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ МАЛОГО СПУТНИКА

У статті представлені результати дослідження алгоритму оцінки кутової швидкості малого супутника за допомогою астровимірювальної системи у випадку несправності вимірників кутової швидкості. Отримані чисельні значення помилок, представлені результати математичного моделювання.

*Ключові слова:* датчик кутової швидкості; астровимірювальна система; оцінка кутової швидкості; динамічна фільтрація; спостерігач Льюїнбергера.

В статье представлены результаты исследования алгоритма оценки угловой скорости малого спутника по показаниям астронизмерительной системы при неисправности измерителей угловой скорости. Получены численные значения ошибок, представлены результаты математического моделирования.

*Ключевые слова:* датчик угловой скорости; астронизмерительная система; оценка угловой скорости; динамическая фильтрация; наблюдатель Льюинбергера.

In a article are presented results of research of small satellite angular speed estimation algorithm under measurements of the astromeasuring system at fault of the angular speed sensor. Numerical values of errors are received, results of mathematical simulation are presented.

*Keywords:* angular speed sensor; astromeasuring system; angular speed estimation; dynamic filtration; Luenberger observer.

**Введение.** При создании системы управления (СУ) космического аппарата является актуальным вопрос разработки алгоритмов, обеспечивающих функционирование СУ в случае полного отказа датчиков угловой скорости (ДУС) [1]. В составе СУ малых или микроспутников ДУС могут отсутствовать вовсе. В [2] авторами исследовался алгоритм оценки угловой скорости, основанный на обратном кинематическом уравнении спутника. Такой алгоритм при повышенных шумах и увеличенном времени обновлении информации астронизмерительной системы (АИС) может не обеспечить требуемой точности оценки угловой скорости. В настоящей работе рассматривается подход, основанный на методе динамической фильтрации, а именно, для оценки угловой скорости используется наблюдатель Льюинбергера.

**Постановка задачи.** Математическая модель спутника описывается динамическими уравнениями Эйлера и кинематическими уравнениями:

$$\mathbf{I}\dot{\boldsymbol{\omega}} + \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{I}\boldsymbol{\omega} = \mathbf{M}_{упр} + \mathbf{M}_в, \quad \dot{\boldsymbol{\Lambda}} = 0,5\boldsymbol{\Lambda} \circ \boldsymbol{\omega}, \quad (1)$$

где  $\boldsymbol{\omega}$  — вектор абсолютной угловой скорости спутника;

$\mathbf{I}$  — матрица моментов инерции спутника;

$\mathbf{M}_{упр}$ ,  $\mathbf{M}_в$  — векторы управляющего и возмущающего моментов;

$\boldsymbol{\Lambda}$  — кватернион ориентации спутника.

Математическая модель АИС может быть представлена следующими уравнениями:

$$\gamma_A = \gamma + \gamma_c + \gamma_s,$$

где  $\gamma_A$  — угол ориентации спутника, измеряемый АИС;

$\gamma$  — «идеальный» угол, полученный из кинематического уравнения;

$\gamma_c$  — постоянная ошибка измерений АИС;

$\gamma_s$  — шум измерений АИС.

Обновление измерительной информации АИС происходит с тактом  $T_{АИС}$ . Ставится задача разработать и исследовать алгоритм оценки вектора угловой скорости спутника для реализации в бортовом компьютере СУ, в составе комплекса командных приборов которой отсутствуют ДУС.

**Разработка алгоритма.** Линеаризуем уравнения спутника (1) и дополним их уравнением для постоянного возмущающего момента. Далее будем рассматривать один канал управления, дополнив уравнения объекта уравнением наблюдения.

Нетрудно показать, что такая система является полностью наблюдаемой по Калману, и дискретный стационарный наблюдатель типа Льюинбергера для нее запишется в виде:

$$\begin{aligned}\hat{\gamma}(n) &= \hat{\gamma}(n|n-1) + K_1(\gamma_A(n) + \hat{\gamma}(n|n-1)), \\ \hat{\omega}(n) &= \hat{\omega}(n-1) + T(\hat{m}_b(n-1) + tu(n-1)) + K_2(\gamma_A(n) + \hat{\gamma}(n|n-1)), \\ \hat{m}_b(n) &= \hat{m}_b(n-1) + K_3(\gamma_A(n) + \hat{\gamma}(n|n-1)),\end{aligned}\quad (2)$$

где  $\hat{\gamma}(n|n-1) = \hat{\gamma}(n-1) + T\hat{\omega}(n-1) + 0,5T^2(\hat{m}_b(n-1) + tu(n-1))$  — прогноз угла ориентации;

$\hat{\gamma}(n)$ ,  $\hat{\gamma}(n-1)$  — оцененный угол ориентации спутника на  $n$ ,  $n-1$  тактах соответственно;

$\hat{\omega}(n)$ ,  $\hat{\omega}(n-1)$  — оцененная угловая скорость спутника на  $n$ ,  $n-1$  тактах соответственно;

$T$  — такт интегрирования уравнений;

$t$  — эффективность управляющих органов;

$\hat{m}_b(n)$ ,  $\hat{m}_b(n-1)$  — оцененный возмущающий момент на  $n$ ,  $n-1$  тактах соответственно;

$u(n-1)$  — управляющий момент, действующий на спутник на  $n-1$  такте;

$\gamma_A(n)$  — угол ориентации спутника, измеренный АИС на  $n$  такте;

$K_1, K_2, K_3$  — коэффициенты наблюдателя, выбираемые из условия устойчивости и требуемого качества процесса наблюдения.

**Результаты математического моделирования.** В табл. 1 представлены варианты и результаты математического моделирования. В качестве критериев точности оценки угловой скорости принимались математическое ожидание (М) и среднеквадратическое отклонение ( $\sigma$ ) модуля разности оцененной и «идеальной» угловых скоростей спутника  $\delta\omega(n) = |\hat{\omega}(n) - \omega(n)|$ .

Таблица 1

Результаты математического моделирования

№ п/п	Варианты моделирования	Алгоритм оценки (2)		Алгоритм оценки [2]	
		М, град/с	$\sigma$ , град/с	М, град/с	$\sigma$ , град/с
1	$T_{\text{АИС}}=0,1$ с, 1 АИС, $\gamma_c=20''$ , $\gamma_s=45''$	0,00396	0,00274	0,02470	0,02405
2	$T_{\text{АИС}}=0,1$ с, 2 АИС, $\gamma_c=5''$ , $\gamma_s=6''$	0,00124	0,00105	0,00369	0,00304
3	$T_{\text{АИС}}=0,2$ с, 1 АИС, $\gamma_c=20''$ , $\gamma_s=45''$	0,00547	0,00420	—	—
4	$T_{\text{АИС}}=0,2$ с, 2 АИС, $\gamma_c=5''$ , $\gamma_s=6''$	0,00284	0,00338	—	—

На рис. 1 приведены графики варианта 3 процесса оценки для алгоритма (2).

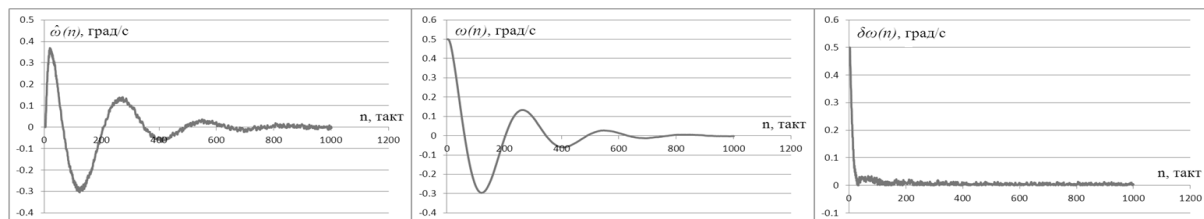


Рис. 1. Графики для варианта 3

**Выводы.** Как видно из результатов моделирования, предложенный алгоритм оценки угловой скорости по измерениям АИС обеспечивает вполне приемлемую для безгироскопных систем управления спутников точность.

### Литература

1. Соловьев А.Н. Безгироскопная инерциальная система на основе акселерометров / А.Н. Соловьев, В.Е. Алексеев / Научн.-техн. журн. «Нано и микросистемная техника». — 2012. — № 4. — С. 27 — 31.
2. Кузнецов Ю.А. Обеспечение надежности системы управления микроспутника при полном отказе измерителей угловой скорости / Ю.А. Кузнецов, О.А. Лабазов // Научн. журн. «Вестник Днепропетровского университета». — 2010. — № 4. — С. 102 — 108.

УДК 681.513.6

**К.Ю. Дергачов**, канд. техн. наук, ст. науч. сотр.  
Нац. аэрокосмический ун-т им. Н.Е. Жуковского  
«ХАИ» kdergachev@ukr.net

## АЛГОРИТМЫ ВИЗУАЛЬНОЙ НАВИГАЦИИ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ

У доповіді пропонується ряд алгоритмів візуальної навігації мобільних роботів, заснованих на принципі аналізу оптичного потоку від декількох відеокамер. Розроблено програмне забезпечення, що реалізує алгоритм побудови траєкторії руху мобільного робота на основі аналізу оптичного потоку 2-х відеокамер.

*Ключові слова:* мобільний робот; візуальна навігація; оптичний потік.

В докладе предлагается ряд алгоритмов визуальной навигации мобильных роботов, основанных на принципе анализа оптического потока от нескольких видеокамер. Разработано программное обеспечение, реализующее алгоритм построения траектории движения мобильного робота на основе анализа оптического потока 2-х видеокамер.

*Ключевые слова:* мобильный робот; визуальная навигация; оптический поток.

In predlahaetsya make a number of algorithms visual navigation mobile robot, which uses the principle analysis optical flows from Several Camcorder. Provision is designed software, implements the algorithm for constructing the trajectory of the mobile robot on the basis of the analysis of the optical flows of 2 cameras.

*Keywords:* mobile robot; visual navigation; optical flow .

Для решения прикладных задач технического мониторинга объектов в различных сферах деятельности человека возникает необходимость использования мобильных роботов, в качестве основных инструментов сбора информации. Это вызвано возможностью круглосуточной готовности, удешевлением роботов, возможностью решения задач без участия человека в критических ситуациях. Специфика операций, условия эксплуатации и функциональное назначение мобильного робота определяют его конструктивные особенности, степень сложности системы управления, массогабаритные характеристики и состав специального оборудования.

Главная проблема всех существующих мобильных транспортных роботов – обеспечение автономного безаварийного движения по пересеченной местности. Для успешной ориентации в пространстве роботы должны быть выполнять построение маршрута, контролировать параметры движения, правильно интерпретировать информацию об окружающей среде, полученную от датчиков.

Системы технического зрения во многих случаях решают задачи по дополнению или даже замене человека в областях деятельности, связанных со сбором и анализом зрительной информации. Уровень их использования в прикладных областях является одним из наиболее ярких и наглядных интегральных показателей уровня развития высоких технологий в самых различных отраслях промышленности. При этом наряду со значительным повышением уровня развития техники, весьма существенную роль играют методы обработки видеоинформации. Они обеспечивают анализ, распознавание и интерпретацию зрительных образов для принятия решения и управления поведением автономных технических систем.

Современный уровень развития средств управления позволяет использовать визуальную информацию в интеллектуальных системах мобильных роботов. Под визуальным управлением будем понимать управление техническими объектами осуществляемое управляющими воздействиями, которые формируются с использованием визуальной информации. Ключевым элементом решения задачи визуального управления является первоочередное решение задач навигации мобильного робота. Под решением задач навигации будет понимать определение местоположения мобильного робота, его углового положения относительно собственного центра масс, а так же выбор маршрута движения в среде с препятствиями для достижения цели движения.

Составными элементами системы технического зрения являются оптическая система, преобразователь свет-сигнал, электронный тракт ввода элементов изображения в память компьютера или специального вычислителя, математическое обеспечение сбора и обработки необходимых зрительных данных.

В настоящее время для анализа изображений, наиболее универсальным подходом является использование метода оптических потоков, так для выделения движущихся объектов на изображениях применяется именно он. Этот метод обеспечивает эффективный и гибкий аппарат для анализа видимого движения объектов на цифровых видеопотоках.

В докладе предлагается ряд алгоритмов визуальной навигации мобильных роботов, основанных на принципе анализа оптического потока [1] от нескольких видеокамер. Суть метода оптического потока заключается в следующем, изображение видимого движения препятствий или поверхностей смещается перед объектом в результате перемещения (во время движения объекта) камеры относительно окружающих препятствий. При этом упрощается расчет возможность столкновения: чем быстрее меняется положение предмета относительно поля зрения камеры, тем ниже вероятность пересечения препятствиями курса объекта, так как такие препятствия находятся сбоку.

Программное обеспечение, реализующее алгоритм построения траектории движения подвижного объекта, разработано в среде Python и реализует вычисление оптического потока с использованием 2-х видеокамер. Разработан алгоритм синтеза траектории движения подвижного объекта с использованием оптического потока двух видеокамер. Исходными данными для расчета с помощью программного обеспечения являются видеопотоки, поступающие с камер и угол поворота управляемых колес мобильного робота. Разработанное программное обеспечение позволяет реализовать процесс движения мобильного робота в среде, насыщенной препятствиями, в режиме реального времени.

Экспериментальное исследование алгоритмов позволило реализовать движение мобильного робота в среде с препятствиями и визуализированы векторы смещения оптических потоков [2]. Были получены данные с видеокамеры, проведен сравнительный анализ последовательности кадров видеопотока, на основании чего были построены векторы смещения и построена картина скорости перемещения, на которой скорость определяется яркостью.

### Литература

1. Шапиро Л. Компьютерное зрение / Л. Шапиро, Дж. Стокман. — М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2006. — 752 с.
2. Kulik A. Binocular technical vision for wheeled robot controlling / A. Kulik, K.Dergachov, O.Radomskyi // Transport Problems. — 2015. — № 1(10). — Pp. 55 — 62.

UDC 672.5:622.2

Anh Duc Dang, Ph.D.student,  
 Joachim Horn, Univ.-Prof. Dr-Ing.  
 University of the Federal Armed Forces Hamburg,  
 Holstenhofweg 85, D-22043 Hamburg, Germany,  
 adang@hsu-hh.de, Joachim.Horn@hsu-hh.de

## STABILITY OF V-FORMATION WHILE TRACKING A MOVING TARGET

Ця стаття пропонує новий спосіб управління автономними роботами. Нелінійний спосіб управління, заснований на штучному потенційному підході, буде використаний в даній роботі. Успех запропонованого методу перевірений при моделюванні.

*Ключові слова:* управління Формування; стабільність рій.

Эта статья предлагает новый способ управления автономными роботами. Нелинейный способ управления, основанный на искусственном потенциальном подходе, будет использован в данной работе. Успех предлагаемого метода проверен при моделировании.

*Ключевые слова:* управление Формирование; стабильность рой.

This paper proposes a novel method for controlling the formation of the autonomous robots following to the desired V-formation. While tracking a moving target, this formation is maintained connectivity and without the collisions between members in the formation. The nonlinear control method based on the artificial potential field approach will be used in this paper. The success of the proposed method is verified in simulations.

*Keywords:* Formation control; stability of a swarm.

**I. Introduction.** In recent years, multi-agent systems have widely been researched in many areas, such as physic, chemic, biology, cybernetic, and automatic control over the world. Formation control is one of the necessary and important problems in the research field on the multi-agent systems. The formation control and its potential applications, such as search and rescue missions, forest fire detection and surveillance, etc., have attracted a lot of attention from researchers.

This paper considers a novel approach for the formation control of autonomous robots following desired V-shape using the artificial vector fields. The V-shape formation is used as the desired formation of the virtual nodes and robots must close to this desired formation (see Fig.1). As analysed in literatures [4] the V-shape formation of birds (for example the formation flight of the Canada geese during migration) has a lot of advantages, such as energy savings during flight. The research results in these literatures indicated that formation members realized up to 51% in energy savings over solo flight. Moreover, by flying in V-shape formation the members in the formation can easily communicate with each other, etc. In this approach, the desired formation with the constant distances between virtual nodes is firstly generated based on the relative position between the leader of the formation and the target. The leader is random chosen from a member agent that has the closest distance to target [1], [2]. This leader plays important role to create and lead its formation towards the target in a stable direction.

**II. Control Algorithms.** Firstly, we consider a swarm of  $N$  robots that has the mission to track a moving target. Let  $p_i, v_i$  and  $u_i$  be the position, velocity vector and control input of the robot  $i$ , respectively. The dynamic model of each robot is described as follows:

$$\begin{aligned} \dot{p}_i &= v_i \\ \dot{v}_i &= u_i \quad i=1, \dots, N. \end{aligned} \quad (1)$$

**A. Formation control** In this section, we present the method in order to build the desired V-formation based on the relative position between the target and the leader combined with the coordinate system rotation and translation. The desired V-formation is designed as Fig.1.



The algorithm to generate the desired V-formation is proposed as follows:

$$q_j = \begin{cases} (I+j)p_l - jq_\mu, & \text{if } j \leq N/2 \\ (I-\xi)p_l + \xi q_\eta, & \text{Otherwise,} \end{cases} \quad (2)$$

where  $p_l, q_\mu, q_\eta, q_j$  are the leader's position, the base node's positions to generate desired formation and the position of the virtual nodes on the desired formation, respectively. The positive factor  $\xi$  is described as  $\xi = j - \text{floor}(N/2)$  with  $j=1, 2, 3 \dots N$ . The formation controller is given as follows:

$$u_i = f_i^j(p_i) \quad (3)$$

Where the control input  $f_i^j(p_i)$  is determined as algorithm 1 below.

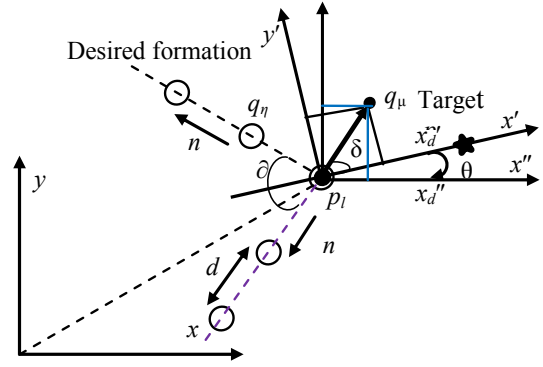


Fig.1 The description of the method to build the V-shape desired formation.

**Algorithm 1:** Selecting the force effects on robot  $i$

**Consider:** a robot  $p_i$  and virtual nodes  $q_j$  ( $i, j=1, \dots, N, i \neq j$ ). Determine the shortest distance from  $p_i$  to all the virtual nodes  $q_j$  and the scalar factor  $c_i^j$  is given as follows:

$$d_i^{jm1} = \min \{ d_i^j = \|p_i - q_j\| \}, c_i^j = \begin{cases} 1 & \text{if } q_j \text{ is active} \\ 0 & \text{if } q_j \text{ is free.} \end{cases}$$

**if**  $d_i^{jm1} \leq r_a$  &  $c_i^{jm1-1} = 1$  **then**

$$f_i^j(p_i) = -k_{i1}^j(p_i - q_{jm1}) - k_{iv}^j(v_i - v_{jm1})$$

**else if**  $d_i^{jm1} \leq r_a$  &  $c_i^{jm1-1} = 0$  **then**

$$f_i^j(p_i) = -k_{i2}^j(p_i - q_{jm1-1}) - k_{iv}^j(v_i - v_{jm1-1})$$

**else if**  $d_i^{jm1} > r_a$  **then**

**if**  $c_i^{jm1} = 0$  **then**

$$f_i^j(p_i) = -k_{i3}^j \frac{(p_i - q_{jm1})}{\|p_i - q_{jm1}\|} - k_{iv}^j(v_i - v_{jm1})$$

**else:** Determine the shortest distance from  $p_i$  to the free virtual nodes  $q_j$  as:

$$d_i^{jm2} = \min \{ d_i^j = \|p_i - q_j\|, c_i^j = 0, j = 1, \dots, N \} \quad f_i^j(p_i) = -k_{i3}^j \frac{(p_i - q_{jm2})}{\|p_i - q_{jm2}\|} - k_{iv}^j(v_i - v_{jm2})$$

**end**

**end**

In order to analyze the stability of the formation, we analyze the stability of the robots at the active nodes in the desired V-formation. We rewrite the dynamic model of the robot  $i$  as:

$$\begin{aligned} \dot{p}_i &= v_i \\ \dot{v}_i &= -k_{ip}^j(p_i - q_j) - k_{iv}^j(v_i - v_j) + \dot{v}_j, \end{aligned} \quad (4)$$

The Lyapunov function [2], [3] can be selected as:

$$V = \frac{1}{2} k_{ip}^j (p_i - q_j)^2 + \frac{1}{2} (v_i - v_j)^2. \quad (5)$$

Taking the time derivative of equation (5) along the trajectory of the system (4), we get:

$$\dot{V}(t) = -k_{iv}^j (v_i - v_j)^T (v_i - v_j) \leq 0 \quad (6)$$

B. *Target tracking control algorithm* The target tracking controller is designed as:

$$f_i^t(p_i) = F_i^t(p_i)n_i^t - k_{iv}^t(v_i - v_t). \quad (7)$$

Where,  $F_i^t(p_i)n_i^t$  is an attractive potential field from target and  $-k_{iv}^t(v_i - v_t)$  is used as a damping term.

**III. Simulation Results.** In this section, we present the results of the simulations for the V-formation's stability. Target's trajectory is  $p_t = (0,9t + 640, 160\sin(0,01t) + 250)^T$ . The results of the simulations show that the robot  $i$  is always closed to the active node  $j$ . Moreover, while tracking a moving target, the V-formation of these robots is maintained following the desired formation.

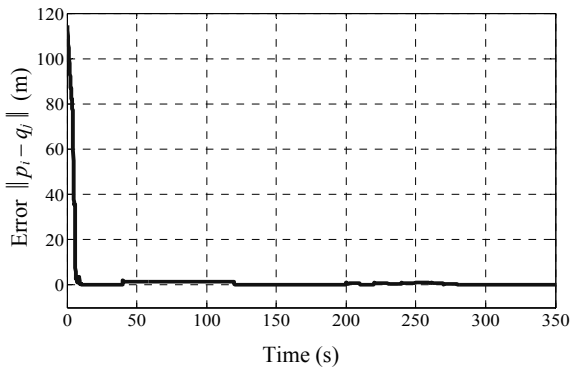


Fig.2 Position error  $\|p_i - q_j\|$  in case  $\partial = \partial_d + 0,8\sin(0,02t)$

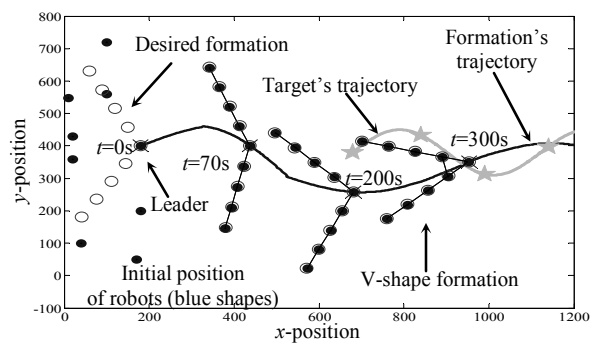


Fig.3. V-formation tracks a moving target

**IV. Conclusion.** This paper has proposed a novel approach to formation control of autonomous robots following the desired V-formation while tracking a moving target. Each agent sensed an optimal position in the desired V-formation and closed to this optimal position. While tracking a moving target, the formation of the robots is maintained following the desired V-formation without the collisions between members. The development and application of this proposed approach in practice will be our future research.

## References

1. Anh Duc Dang and Joachim Horn, "Intelligent swarm-finding in formation control of multi-robots to track a moving target", Intl. Journal of Computer, Information Science and Engineering, Vol.8, No. 4, pp.12-18,2014.
2. Kishorekumar H Kowdiki, Ranjit Kumar Barai and Samar Bhattacharya, "Leader-follower formation control using artificial potential functions: A kinematic approach", IEEE Intl. Conf. on Advances in Engineering, Science and Management, pp. 500-505, March 2012.
3. John R. Spletzer and Rafael Fierro, "Optimal positioning strategies for shape changes in robot teams" IEEE Intl. Conf. on Robotics and Automation, pp. 742-747, April, 2005.
4. Pete Seiler, aniruddha Pant, and Karl Hedrick, "Analysis of bird formations". Proceedings of the 41st IEEE Conference on Decision and Control, pages 118-123, December 2002.

## Секція 5

# АВТОМАТИЧНЕ КЕРУВАННЯ В ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМАХ

УДК 004:37

І.О. Анциферов, аспірант, Одес. нац. морський  
ун-т, antsiferov.igor@gmail.com

## ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ СУДНОВИМИ ТЕХНІЧНИМИ ЗАСОБАМИ

Технічна експлуатація суден є сукупністю обслуговування і ремонту. Тут властиві принципово нові вимоги до забезпечення ефективності технологічних процесів обслуговування суднових технічних засобів в умовах зростаючих обсягах інформації.

*Ключові слова:* технічний стан судна; інтелектуальне управління; суднове устаткування.

Техническая эксплуатация судов является совокупностью обслуживания и ремонта. Тут свойственны принципиально новые требования к обеспечению эффективности технологических процессов обслуживания судовых технических средств в условиях растущих объемов информации.

*Ключевые слова:* техническое состояние судна; интеллектуальное управление; судовое оборудование.

Technical exploitation of vessels is a set of maintenance and repair. It is characterized fundamentally new requirements to ensure the effectiveness of processes marine service technical means in terms of growing information volumes.

*Keywords:* condition of the vessel; intelligent management; ship equipment.

Технічна експлуатація суден включає сукупність технологічного обслуговування при використанні та обслуговування і ремонту. Необхідність зниження трудомісткості і фінансових витрат на технічну експлуатацію привела до переходу до системи обслуговування суден за фактичним станом. При цьому зросла роль технічного діагностування і прогнозування технічного стану в процесі використання судна за призначенням. Одним з важливих чинників забезпечення ефективності зазначеної системи є визначення оптимальної періодичності технічної експлуатації [1]. Управління технічним станом суднових технічних засобів зводиться до оцінки ймовірності безвідмовного функціонування, а також залишкового ресурсу та надійності об'єкта. На сьогоднішній день існують дві суперечливі організаційні структури, одна з яких повинна забезпечувати стабільність і стійкість технічного забезпечення судів, інша, що входить в першу і діюча в ній, повинна стимулювати мінливість, як необхідна умова всякого розвитку. Проблема полягає в тому, щоб знайти раціональне рішення в співвідношенні цих двох організаційних структур, яке задовольнило б вирішенню цього діалектичного протиріччя між стабільністю з одного боку і мінливістю з іншого. Труднощі вирішення цієї проблеми полягають у тому, що знайти аналітичне рішення не представляється можливим через багатовимірності простору відносин, які пов'язують елементи системи технічного обслуговування та забезпечення. Застосування та використання імовірнісного (стохастичного) апарату також вельми проблематично, в силу наявності істотного організуючого начала, яке вноситься великою кількістю людей беруть участь в системі технічного забезпечення судів на всіх ієрархічних рівнях управління і діючими регістрами, інструкціями та настановами [2]. В таких умовах традиційні, тобто природничі методи, засновані на експериментальному вимірювальному підході до прийняття рішень, не відповідають рівню передбачення процесів, що відбуваються в розглянутих областях, що вимагає розробки якісно нових підходів до вирішення базових (типових) проблемних завдань управління, модернізації та розвитку технологічних послуг з обслуговування суднових технічних засобів.

Для побудови моделей управління технічним станом суднових технічних засобів в процесі функціонування гарантійної служби, як складної організаційно економічної та організаційно технічної системи доцільне застосування різних видів і способів моделювання. Найбільш часто використовуються методи оптимізаційних завдань, імітаційні моделі, методи і способи інформаційних технологій[3]. Для вирішення поставлених завдань у своїх розрахунках я дотримувався в основному імітаційного моделювання процесів технічного забезпечення судів. Програмні реалізації імітаційних моделей призначалися в основному не з метою їх експлуатації, а для перевірки і демонстрації отриманих математичних результатів. Наявні засоби створення програм моделювання проблемно-орієнтованих комплексів, такі як система агрегатного моделювання AMOS і мова моделювання GPSS не можуть надаватися кінцевому користувачеві в якості засобу вирішення прикладних завдань. У ході результатів дослідження були виявлені завдання:

- розробка моделі процесу експлуатації технічних систем зі складною структурою, різними стратегіями і формами організації обслуговування;
- формулювання завдання і розробка методики програм технічного обслуговування.
- Необхідність їх вирішення вимагає формалізації моделі експлуатації з урахуванням безлічі факторів. При цьому важливо розглянути математичну модель процесу експлуатації. Для характеристики технічного стану пристрою (елемента) визначимо його ресурс як деяку скалярну величину, зменшення якої означає погіршення технічного станів елемента. У моделі використовується дві форми витрачання ресурсу:

- швидкість витрачання  $\varphi(a(t))$  залежить тільки від режиму в момент (модель адитивного накопичення ушкоджень);

- швидкість витрати  $g[f(t; \{a(), S < t\})a(t)]$  залежить від значення ресурсу  $f(t; \{a(), S < t\})$  і навантаження  $a(t)$  в момент часу  $t$  (модель Сидякіна).

Характеризуючи технічний стан елемента напрацюванням при навантаженні  $a_0$  функціонал, що задає його знаходження в режимі  $a$ , має вигляд  $f(t, a) = F^l(F(t, a), a_0)$ , де  $F(t, a)$  — функція розподілу моменту відмови в режимі. Для профілактичних і аварійних комплексних видів обслуговування побудовані вираження оцінки витрат. Вони складаються з витрат на обов'язкові операції і витрат, обумовлених виявленими при різних видах контролю несправностями:  $Q(Wk) + \sum_{i \in I_k^{kp}} MZ_i^k + \sum_{i \in I_k^{kn}} MS_i^k$ , де  $Q(Wk)$  — витрати на обов'язкові операції  $K$ -го виду обслуговування;  $I_k^{kp}$ ,  $I_k^{kn}$  - елементи, контрольовані по працездатності і параметру, відповідно в  $K$ -м вигляді обслуговування;  $MZ_i^k, MS_i^k$  — середні витрати на обслуговування  $i$ -го елемента зі стратегії з контролем працездатності і контролем параметрів, відповідно, в  $K$ -м вигляді обслуговування.

При максимально-ефективному використанні інформаційних систем можлива уніфікація програмних і апаратних модулів для створення центру обробки даних щодо прийняття рішень з управління технічним станом систем інформаційної та інтелектуальної підтримки суднових спеціалістів. Аналіз виконаних досліджень і дій з впровадження нових інформаційних технологій у зазначених напрямках, переконливо свідчить, що для підвищення ефективності впровадження в практику діяльності суднобудівних і судноремонтних фірм цих робіт необхідно сформулювати єдиний методологічний підхід до вирішення питань підвищення конкурентоспроможності фірм шляхом впровадження і розвитку менеджменту якості відновлювальних послуг.

## Література

1. Проект розпорядження Кабінету Міністрів України «Про схвалення Транспортної стратегії України на період до 2020 року» / Міністерство транспорту та зв'язку України. Офіційний веб-сайт. 10 грудня 2009 року. // Режим доступу: [www.kmu.gov.ua](http://www.kmu.gov.ua).

2. Мурашов Р.К. Прогнозування стану складних систем в сучасних системах управління та інтелектуальних інформаційних системах / Р.К. Мурашов, Ю.А. Дзюбенко // Управління розвитком складних систем. — 2011. — № 7. — С. 97 — 101.
3. Бутов А.С. Транспортные системы. Моделирование и управление / А.С.Бутов. — СПб.: Судостроение, 2001. — 552 с.

УДК 519.8(075.8)

**Ю.П. Зайченко**, д-р техн. наук, проф.,  
**Е.Ю. Зайченко**, д-р техн. наук, доцент,  
УНК «Ин-т приклад- систменого анализа НТУУ  
«КПИ»» zaychenko Yuri@ukr.net

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ МАКРОЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ

Розглянуто проблему прогнозування макроекономічних показників. Проведено дослідження різних методів прогнозування: експоненційного згладжування, авторегресії з ковзним середнім (АРКС), а також методів індуктивного моделювання: класичного та нечіткого МГУА. Представлено результати експериментальних досліджень вищевказаних методів в задачі прогнозування макроекономічних показників України та проведено порівняльний аналіз їх ефективності.

*Ключові слова:* прогнозування макроекономічних показників, експоненційне згладжування, АРКС, нечіткий МГУА.

Рассматривается проблема прогнозирования макроэкономических показателей. Проведены исследования различных методов прогнозирования: экспоненциального сглаживания (ЭС), авторегрессии со скользящим средним (АРСС), а также методов индуктивного моделирования: классического и нечеткого МГУА. Приводятся результаты экспериментальных исследований указанных методов применительно к задаче прогнозирования макроэкономических показателей Украины и дан сравнительный анализ их эффективности.

*Ключевые слова:* прогнозирование макроэкономических показателей, экспоненциальное сглаживание, АРСС, нечеткий МГУА.

The problem of macroeconomic indices forecasting is considered. The investigations of different forecasting methods are considered: namely, exponential smoothing (ES), autoregression method ARIMA and method of inductive modeling-so-called group method of data handling (GMDH) and fuzzy GMDH. The experimental results of application of aforesaid methods to the problem of Ukrainian macroeconomic indices forecasting are presented, and compared enabling to estimate their efficiency.

*Key words:* macroeconomic indices forecasting ;exponential smoothing ; ARIMA; fuzzy GMDH.

**I. ВВЕДЕНИЕ** Задача прогнозирования основных макроэкономических показателей является чрезвычайно актуальной.. Финансовые процессы на рынках являются динамическими, и существенно нестационарными, что не позволяет использовать для прогнозирования классические методы статистического анализа и вызывает острую необходимость применения новых методов, основанных на идеях и технологиях искусственного интеллекта, в частности, методов самоорганизации и нейронных сетей, четких и нечетких. Целью настоящей работы является исследование эффективности метода индуктивного моделирования- нечеткого метода группового учета аргументов (НМГУА), его сравнение с классическим МГУА и методом экспоненциального сглаживания (ЭС) и авторегрессии скользящего среднего (АРСС) в задачах прогнозирования.

**II. Описание метода НМГУА** Нечеткий МГУА использует принципы и основные идеи классического МГУА, предложенного акад. А.Г. Ивахненко], в частности *принципы самоорганизации, внешнего дополнения, свободы выбора*[1]. Но при этом строит нечеткие прогнозирующие модели. Рассмотрим линейную интервальную модель регрессии:

$$Y=A_0Z_0+A_1Z_1+\dots+A_nZ_n, \quad (1)$$

где  $A_i$  — нечеткие числа с функцией принадлежности (ФП) треугольного ( или Гауссовского) вида, которые можно задать следующими параметрами: центром  $a_i$  и шириной  $c_i$ ,  $c_i > 0$ ,

$Z_i$  — входные данные.

Тогда  $Y$  — нечеткое число, параметры которого определяются следующим образом [1]:

$$\text{центр интервала} \quad a_y = \sum a_i * z_i = a^T * z, \quad (2)$$

$$\text{ширина интервала} \quad c_y = \sum c_i * |z_i| = c^T * |z|. \quad (3)$$

Предположим, что в НМГУА используются квадратичные частичные описания. Тогда

$$z_0=1, z_1=x_i, z_2=x_j, z_3=x_i^2, z_4=x_j^2, z_5=x_i*x_j.$$

Предположим, что мы наблюдаем обучающую выборку  $\{z_0, z_1, z_2, \dots, z_M\}$ ,  $\{y_0, y_1, y_2, \dots, y_M\}$ .

Сформулируем основные требования к оценочной линейной интервальной модели для частичного описания квадратичного вида.

Найти такие значения параметров ( $a_i, c_i$ ) нечетких коэффициентов, при которых:

— наблюдаемые значения  $y_k$  попадали бы в оценочный интервал для  $Y_k$ ;

— «суммарная ширина» оценочного интервала была бы минимальна.

Допустим, что выбраны квадратичные частичные описания. Тогда соответствующая задача линейного программирования (ЛП) будет выглядеть так [1]:

$$\begin{aligned} \min(C_0 * M + C_1 * \sum_{k=1}^M |x_{kj}|) + C_2 * \sum_{k=1}^M |x_{kj}| + C_3 * \sum_{k=1}^M |x_{kj} * x_{ij}| + \\ + C_4 * \sum_{k=1}^M |x_{ki}^2| + C_5 * \sum_{k=1}^M |x_{kj}^2| \end{aligned} \quad (4)$$

при условиях:

$$\begin{aligned} a_0 + a_1 * x_{ki} + a_2 * x_{kj} + a_3 * x_{kj} * x_{ij} + a_4 * x_{ki}^2 + a_5 * x_{kj}^2 - \\ - (C_1 + C_1 * \sum_{k=1}^M |x_{kj}|) + C_2 * \sum_{k=1}^M |x_{kj}| + C_3 * \sum_{k=1}^M |x_{kj} * x_{ij}| + C_4 * \sum_{k=1}^M |x_{ki}^2| + C_5 * \sum_{k=1}^M |x_{kj}^2| \leq y_k, \\ a_0 + a_1 * x_{ki} + a_2 * x_{kj} + a_3 * x_{kj} * x_{ij} + a_4 * x_{ki}^2 + a_5 * x_{kj}^2 + \\ + (C_1 + C_1 * \sum_{k=1}^M |x_{kj}|) + C_2 * \sum_{k=1}^M |x_{kj}| + C_3 * \sum_{k=1}^M |x_{kj} * x_{ij}| + C_4 * \sum_{k=1}^M |x_{ki}^2| + C_5 * \sum_{k=1}^M |x_{kj}^2| \geq y_k, \\ k = \overline{1, M}, \\ C_p \geq 0, p = \overline{0, 5}, \end{aligned} \quad (5)$$

где  $k$  — номер точки измерения.

Далее были исследованы интервальные модели регрессии с гауссовскими и колоколообразными функциями принадлежности (ФП) и в результате применения вышеописанного подхода были получены модели задач ЛП аналогичной структуры, что и для треугольных ФП.

**III. Постановка задачи прогнозирования** На основе месячных данных о макроэкономических показателях Украины, а именно, процента изменения индекса потребительских цен (% ИПЦ), номинального внутреннего валового продукта (НВВП), а также данных о других макроэкономических показателях требуется построить прогнозирующие модели ЭС, АРСС [2], а также модели с использованием полиномиального четкого и нечеткого МГУА на основе линейных и квадратичных описаний. Необходимо провести экспериментальные исследования вышеперечисленных моделей и дать сравнительный анализ их точности.

Для исследования метода МГУА процент выборки для обучения изменялся так :50%, 70%, 90 %. Свобода выбора выбиралась равной  $F=5, 6$ . В нечетком МГУА использовались треугольная, гауссовская и колоколообразная функция принадлежности.

В доповіді приводяться результати експериментальних досліджень і дається їх порівняльний аналіз. В результаті експериментів були отримані наступні **висновки**.

1. По статистичним характеристикам в більшості випадків кращою виявилася модель авторегресії скользящего середнього.

2. По прогнозним характеристикам для всіх співвідношень навчальної і перевіркової вибірки мінімальні значення по показателям СКО і САПО при прогнозуванні ИПЩ і НВВП досягаються для моделі нечіткого МГУА на основі квадратичних частинних описань. Модель чіткого поліноміального МГУА з лінійними частинними описаннями (ЧО) займає друге місце.

### Література

1. Зайченко Ю.П. Нечеткие модели и методы в интеллектуальных системах / Ю.П. Зайченко. — К.: Изд. Дом «Слово», 2008. — 352 с.
2. Лукашин Ю.П. Адаптивные методы краткосрочного прогнозирования временных рядов: учебное пособие / Ю.П. Лукашин. — М.: Финансы и статистика, 2002. — 411 с.

УДК 681.5

**М. І. Горбійчук**, д-р техн. наук, проф.,  
**М.А.Шуфнарівч**, канд. техн. наук.,  
Івано-Франківський нац. техн. ун-т нафти і газу,  
shyfnarovych@gmail.com

## СИСТЕМА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ПРИ КЕРУВАННІ ОБ'ЄКТАМИ ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ

На сьогодні актуальним питанням залишається прогнозування повеней та паводків на території України. Для вирішення цього питання запропонована структура системи моніторингу та прогнозування рівня води у ріці. В основу комп'ютерної системи покладений метод побудови математичної моделі на принципах генетичних алгоритмів. Впровадження автоматизованої системи дозволить зменшити збитки від повеней та підвищити ефективність управління паводковими ситуаціями.

*Ключові слова:* прогнозування повеней; автоматизована система; генетичні алгоритми; датчик рівня води; метеостанція.

На сьогодні актуальним питанням залишається прогнозування наводнень і паводків на території України. Для рішення цього питання запропонована структура системи моніторингу та прогнозування рівня води в річці. В основу комп'ютерної системи покладений метод побудови математичної моделі на принципах генетичних алгоритмів. Впровадження автоматизованої системи дозволить зменшити збитки від наводнень і підвищить ефективність управління паводковими ситуаціями.

*Ключевые слова:* прогнозування наводнень; автоматизована система; генетичні алгоритми; датчик рівня води; метеостанція.

Flood and overflow forecasting is relevant in Ukraine today. To solve this issue the structure of the monitoring and forecasting of water levels in the river is proposed. The computer system basis based on the method of constructing mathematical models on the basis of genetic algorithms. Implementation of an automated system will reduce flood damage and improve efficiency of flood situation management.

*Keywords:* flood forecasting; automated systems; genetic algorithms; water level sensor; weather station.

Побудова математичних моделей процесів, що відбуваються у навколишньому середовищі під впливом різноманітних факторів, та їх подальшого прогнозування є не до кінця дослідженою, що пов'язане з винятковою складністю природних систем, їх індивідуальною унікальністю.

тю та динамічністю природних процесів. До таких складних природних процесів можна віднести забруднення ґрунтів та зміну рівня води в ріках. Емпіричне моделювання привернуло до себе значну увагу після появи робіт акад. О. Г. Іваненка, у яких започаткований ефективний апарат побудови моделей оптимальної складності — індуктивний метод самоорганізації моделей. Недоліком цієї групи методів є їх обмежене застосування у випадку великої розмірності об'єктів моделювання, якими і є об'єкти природокористування.

Метою роботи є синтез системи інтелектуальної підтримки прийняття рішень для ефективного керування об'єктами природокористування та прогнозування зміни їх станів на основі методів побудови емпіричних моделей з використанням ідей штучного інтелекту.

При моделюванні стану ґрунтів за вмістом важких металів застосовано узагальнену регресійну нейромережу, яка належить до класу радіальних нейромереж [1]. Для класифікації стану ґрунтів розроблено систему нечіткого висновку, яка на основі інформації про концентрацію важких металів у ґрунті, дає змогу судити про один із станів ґрунту [2].

Синтезовано структуру (рис.1) і розроблено програмне забезпечення системи інтелектуальної підтримки прийняття рішень за прогнозованими значеннями рівня води в ріках, отриманих на основі розробленої математичної моделі зміни рівня ріки у залежності від погодних умов на засадах генетичних алгоритмів [3].

В системі для збору метеоданих використано набір радіодавачів метеостанції, а для вимірювання рівня води використано радарний давач рівня, що розміщуються безпосередньо у наперед вибраних пунктах спостереження. Враховуючи те, що хвиля паводку в більшості випадків рухається значно повільніше, ніж атмосферний фронт, давачі метеостанції розташовано у пунктах спостереження вище за течією ріки.

Система інтелектуальної підтримки прийняття рішень реалізує наступні функції: збір метеоданих та значень рівня води ріки і передачу їх з пунктів спостереження на автоматизоване робоче місце оператора, де формується база даних, виконується обробка та аналіз поточного стану, прогнозування рівня ріки води за допомогою спеціального програмного забезпечення, що розроблене відповідно до запропонованого методу синтезу математичної моделі зміни рівня ріки у залежності від погодних умов з використанням генетичних алгоритмів і на основі цих результатів прийняття ефективних управлінських рішень з метою запобігання катастрофічних наслідків повеней. За результатами прогнозованого рівня ріки система оцінює майбутній паводковий стан ріки, що дає змогу формувати рекомендації щодо ефективних заходів, які допоможуть запобігти виникненню катастрофічної ситуації.

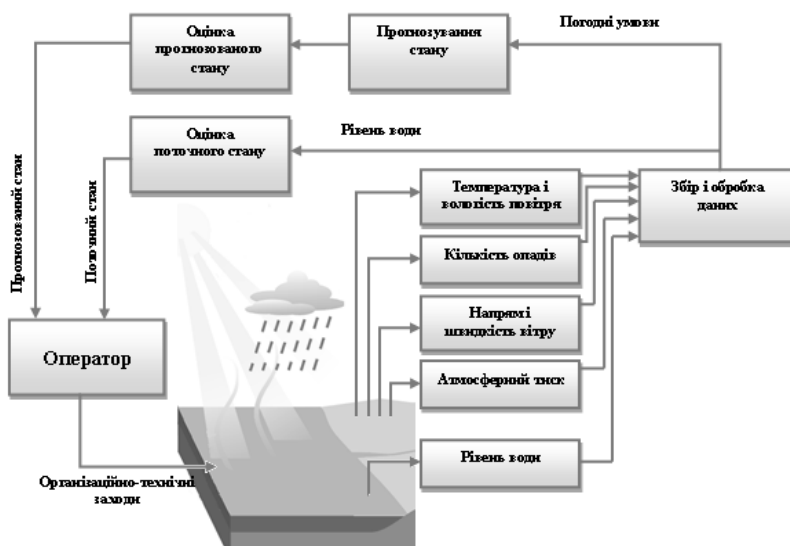


Рис. 1. Структурна схема системи інтелектуальної підтримки прийняття рішень за результатами прогнозування рівня води в ріках Прикарпаття



Отже, розроблені математичні моделі дають можливість здійснювати прогнозування складних екологічних процесів, а залучення інтелектуальних технологій — автоматизувати процес прийняття рішень для запобігання виникненню екологічних катастроф.

### Література

1. Горбійчук М.И. Метод картографического моделирования загрязнения почв на основе теории нейросетей / М.И. Горбійчук, М.А. Шуфнарвич / The third Planet from Sun: Modern Theories and Research Practice in the Field of Earth and Space sciences: Materials digest of the L International Research and Practice Conference and I stage of the Championship in Earth and Space sciences, London, May 21 – 26, 2013. London, 2013 — С. 131 — 135.
2. Горбійчук М.И. Метод оцінки стану ґрунтів з використанням fuzzy-технологій / М.И. Горбійчук, О.В. Пендерещкий, М.А.Шуфнарвич // Восточно-европейский журнал передовых технологий. — 2008. — № 3/5(33). — С. 29 — 32.
3. Горбійчук М.И. Computer system of monitoring and forecasting of water level rivers / М.И. Горбійчук, М.А. Shufnarovych / Journal of Hydrocarbon Power Engineering. — 2014. — Vol. 1, Issue 2. — P. 124 — 130.

УДК 621.31

Є.Є. Чайковська, канд. техн. наук, доц.,  
Б.І. Молодковець, магістр,  
Одес. нац. політехн. ун-т,  
eechaikovskaya@gmail.com

## ПІДТРИМКА ПРОЦЕСУ ЗДОБУТТЯ БІОГАЗУ У СКЛАДІ ЕКСПЕРТНОЇ КОГЕНЕРАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ

Запропоновано підтримку розряду та заряду біогазової установки у складі когенераційної системи на основі теплового насоса, що використовує зброжене сусло у якості низькопотенційного джерела енергії та визначено точний термін відвантаження зброженого матеріалу та завантаження свіжого сусла для здобуття постійного виходу біогазу.

*Ключові слова:* когенераційна система; біогазова установка; тепловий насос; прийняття рішень.

Предложено поддержку разряда и заряда биогазовой установки в составе когенерационной системы на основе теплового насоса, использующего сброженное сусло в качестве низькопотенциального источника энергии и определены точные сроки отгрузки сброженного материала и загрузки свежего сусла для получения постоянного выхода биогаза.

*Ключевые слова:* когенерационная система; биогазовая установка; тепловой насос; принятия решений.

A support charge and discharge biogas plant as part of a cogeneration system based on a heat pump that uses the fermented wort as low-grade energy sources and determined the exact time of shipment of digested material and loading of fresh wort to produce a constant output of biogas.

*Keywords:* cogeneration; biogas plant; heat pump; decision-making.

**Вступ.** Когенераційні технології, що використовують біогаз, не пов'язані з виробництвом біогазу [1]. У зв'язку із не збігом цілодобового функціонування біогазової установки та відключенням когенераційних систем в години найменшого споживання електричної енергії виробництво біогазу потребує додаткового обладнання, в тому числі додаткового об'єму газгольдерів для зберігання біогазу та додаткових ємностей для зброженої сировини. Більш того, на підтримку процесу зброжування витрачають до 20...30 % виробленої енергії, а зброжене сусло, що має достатній енергетичний потенціал, не використовують у якості низькопотенційного джерела енергії. Вимірювання ж температури зброжування ускладнює підтримку процесу здобуття біогазу із-за значної теплової акумулюючої ємності сусла, а залежність температури свіжого матеріалу, що завантажують, від температури оточуючого середовища унеможливорює

визначення точного терміну відвантаження збродженого матеріалу та завантаження свіжого, що впливає на постійний вихід біогазу.

**Мета роботи.** Розробити структурну схему підтримки процесу здобуття біогазу у складі експертної когенераційної системи на основі інформаційної оцінки зміни температури зброджування при вимірюванні температури теплоносія, що гріє, на виході з теплообмінника, вбудованого в метантенк, яка змінюється раніше за часом, ніж температура зброджування. Визначити температуру теплоносія, що гріє, на виході з теплообмінника, при якій неможлива подальша підтримка процесу зброджування на основі теплового насоса, що використовує зброджене сушло у якості низькопотенційного джерела енергії. Виконати відвантаження збродженого матеріалу та завантажити свіжий матеріал, встановивши температуру теплоносія, що гріє, на вході в теплообмінник на основі теплового насоса щодо підтримки процесу зброджування.

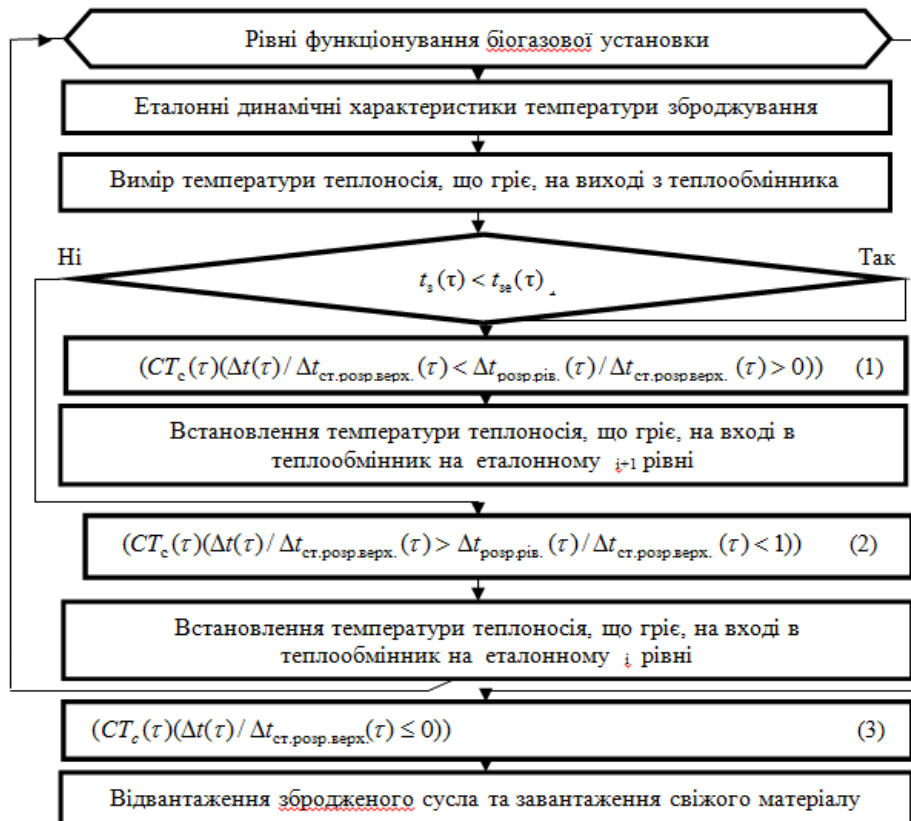


Рис. 1. Структурна схема підтримки процесу здобуття біогазу на рівні прийняття рішень:  $CT$  — контроль події;  $t$  — температура зброджування,  $K$ ;  $t_s$  — температура теплоносія, що гріє,  $K$ ;  $t_{se}$  — еталонне значення температури теплоносія, що гріє,  $K$ ;  $\tau$  — час,  $s$ . Індекси:  $c$  — контроль працездатності;  $i$  — число рівнів функціонування;  $верх.$  — перший рівень функціонування;  $розр. ст.$  — розрахункове, сталі значення параметра

**Основна частина роботи.** На основі методологічного та математичного обґрунтування архітектури експертних систем [2] запропонована архітектура експертної когенераційної системи, основою якої є інтегрована динамічна підсистема – когенераційна установка, біогазова установка, тепловий насос, що використовує зброджене сушло у якості низькопотенційного джерела енергії та блоки розряду, заряду, оцінки функціональної ефективності [3]. Виконано комплексне моделювання динаміки біогазової установки та теплообмінника, вбудованого в метантенк, для оцінки рівнів зміни температури теплоносія, що гріє, на вході в теплообмінник та на виході з теплообмінника. Встановлено рівні функціонування біогазової установки для під-

римки температури зброджування в межах 34...36 °С щодо зміни температури теплоносія, що гріє, на вході в теплообмінник та на виході з теплообмінника: перший рівень: 55...44,15 °С; другий рівень: 52,1...43,06 °С; третій рівень: 49,9...42,3 °С; четвертий рівень: 47,5...41,35 °С; п'ятий рівень: 45...40,3 °С, які відповідають зміні температури суслу на вході в біогазову установку: 5, 10, 14, 18, 22 °С [3]. На основі здобутої підсумкової інформації (1), (2) з використанням метода графа причинно-наслідкових зв'язків [2] можливо підтримувати розряд чи заряд біогазової установки, відповідно, з використанням теплового насоса, впливаючи на встановлення температури теплоносія, що гріє, на вході в теплообмінник [3]. Здобута підсумкова інформація (3) при досягненні температури теплоносія, що гріє, на виході з теплообмінника гранично низького рівня — 37 °С свідчить про завершення процесу виходу біогазу та потребує прийняття рішення на відвантаження збродженого суслу та завантаження свіжого матеріалу при встановленні температури теплоносія, що гріє, на вході в теплообмінник до гранично верхнього рівня — 55 °С [3].

**Висновки.** Так, використовуючи запроповану структурну схему підтримки процесу здобуття біогазу та встановивши точний термін відвантаження збродженого суслу та завантаження свіжого матеріалу у складі когенераційної системи при виробництві, наприклад, 352,5 м<sup>3</sup>/добу біогазу можливо здобути економію біогазу 25,4 тис.м<sup>3</sup>/рік, що, при підвищенні товарності біогазової установки на 13,94 %, надає можливість в умовах когенераційної системи знизити собівартість виробництва електроенергії та теплоти в межах 20...30 % [3].

#### Література

1. Rade M. Ciric, Zoran Kuzmanovic. Techno-Economic Analysis of Biogas Powered Cogeneration / Ciric, M Rade, Kuzmanovic Zoran // Journal of Automation and Control Engineering. — 2014. — Vol. 2. — issue 1. — p. 89 — 93.
2. Чайковская Е.Е. Оптимизация энергетических систем на уровне принятия решений / Е.Е. Чайковская // Промышленная теплотехника. — 2013. — Т. 35, № 7. — С. 169 — 173.
3. Чайковська Є.Є. Розробка методу підтримки функціонування біогазової установки у складі когенераційної системи / Є.Є. Чайковська, Б.І. Молодковець // Технологический аудит и резервы производства. — 2015. — № 1/1 (21). — С. 41 — 46.

УДК 681.518.22

Г.Н. Семенцов, д-р техн. наук, проф.,  
Л.І. Фешанич, аспірант,  
Івано-Франк. нац. тех. ун-т нафти і газу,  
lidia.feshanych@gmail.com

## ВИКОРИСТАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ЗЛИТТЯ ДАНИХ НА ОСНОВІ JDL-МОДЕЛІ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ АНТИПОМПАЖНОГО ЗАХИСТУ ГАЗОПЕРЕКАЧУВАЛЬНИХ АГРЕГАТІВ

Розглядається сутність та доцільність розвитку інформаційного забезпечення системи автоматичного антипомпажного захисту та регулювання газоперекачувальних агрегатів дотискувальної компресорної станції підземного сховища газу з метою покращення швидкодії існуючих систем антипомпажного регулювання, шляхом застосування методу злиття даних на основі JDL-моделі.

*Ключові слова:* злиття даних; JDL-модель; швидкодія; помпаж.

Рассматривается сущность и целесообразность развития информационного обеспечения системы автоматического антипомпажного защиты и регулирования газоперекачивающих агрегатов дожимной компрессорной станции подземного хранилища газа с целью улучшения быстродействия существующих систем антипомпажного регулирования, путем применения метода слияния данных на основе JDL-модели.

*Ключевые слова:* слияния данных; JDL-модель; быстродействие; помпаж.

The article deals with the nature and advisability of further informative support of automatic antisurge protection system and regulation of gas pumping plant boosters of natural gas storage compressor station based on improved high-performance of existing antisurge control systems by means of data fusion method based on JDL model.

*Keywords:* data fusion; JDL model; performance; surge.

Значну частину відмов обладнання дотискувальних компресорних станцій підземних сховищ газу складають аварійні зупинки, спричинені безпосередньо явищем помпажу. З огляду на це актуалізуються проблеми підвищення ефективності систем автоматичного захисту компресорів від помпажу.

Покращення швидкодії та надійності існуючих систем автоматичного керування газоперекачувальними агрегатами можна досягнути шляхом удосконалення їх інформаційного забезпечення за рахунок застосування сучасних методів аналізу та опрацювання інформації, що здатні підвищити інформативність, надійність та якість доступних даних. Технології, які здатні отримувати корисну інформацію із даних, а також знань, відомі як методи злиття даних (Data Fusion). Для системи автоматичного керування газоперекачувальними агрегатами дотискувальної компресорної станції “Більче-Волиця” запропоновано технологію Data Fusion на основі JDL-моделі, яка характеризується синтезом інформації на низькому і високому рівні та включає в себе наступні компоненти [1]:

— джерела даних, які відповідають за надання вхідних даних. Можуть бути використані різні типи джерел даних, таких як давачі, апріорна інформація, бази даних і знання людини;

— взаємодія людини з комп'ютером — інтерфейс, який дозволяє вносити в систему дані, а також виробляє інформацію для операторів, що включає в себе запити, команди, інформацію про отримані результати та сигналізацію;

— система управління базами даних зберігає отриману інформацію і злиті результати. Ця система є важливим компонентом через велику кількість різноманітної інформації, яка зберігається.

Метод злиття даних, який базується на JDL-моделі характеризується п'ятьма рівнями обробки даних [2]:

- рівень 0 — попередня обробка. Оцінка та прогнозування стану сигналу / об'єкта на основі отриманих даних;
- рівень 1 — уточнення. Загальні процедури такого рівня включають в себе групування, об'єднання, кореляцію, кластеризацію, оцінку стану, видалення помилкових спрацьовувань, синтез. Результатом цього етапу є класифікація та ідентифікація;
- рівень 2 — оцінка ситуації. Він встановлює зв'язки між об'єктами. Виходом цього рівня є набір висновків;
- рівень 3 — оцінка середовища. Цей рівень включає в себе оцінку ризику та прогнозування логічного результату;
- рівень 4 — процес очищення. Метою є досягнення ефективного управління, планування і контролю.

Нами використано інтерактивну процедуру синтезу системи антипомпажного захисту, яка забезпечує потрібну швидкодію, точність і зручність її реалізації в умовах експлуатації системи автоматичного керування газоперекачувальними агрегатами дотискувальної компресорної станції підземного сховища газу. Запропоновано загальну структуру системи (рис. 1), яка реалізує розроблений DF-метод і програмне забезпечення системи антипомпажного захисту у варіанті конкретного прикладу.

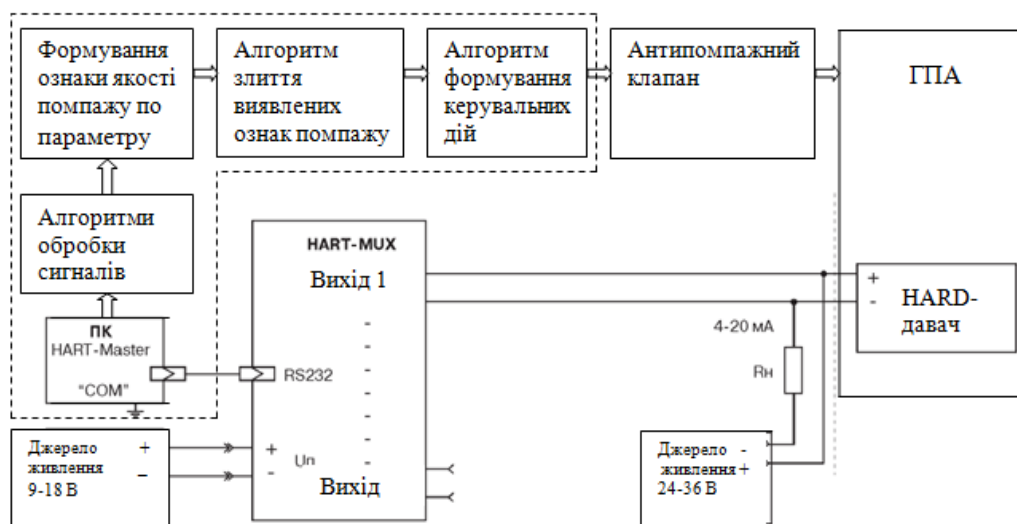


Рис. 1. Структурна схема системи антипомпажного захисту ГПА

Data Fusion-методи, які широко використовуються різних галузях промисловості для створення систем керування з великою кількістю інформації від датчиків є перспективним для використання в системах антипомпажного регулювання і захисту. Застосування сучасних технологій для удосконалення інформаційного забезпечення системи автоматичного керування газоперекачувальними агрегатами покращить ефективність і швидкодію автоматичного захисту від помпажу, а також, надійність та стабільність роботи компресорної станції в цілому.

### Література

1. Castanedo F.A. Review of Data Fusion Techniques / F.A. Castanedo // The Scientific World Journal. — Vol. 2. — 2013. — 19p.
2. Steinberg A.N. Revisions to the JDL data fusion model / A.N. Steinberg, C.L. Bowman, F.E. White // SPIE proceedings series. — 1999. — P. 430 — 441.

УДК 681.518.22

О.В. Олецкий, канд. техн. наук, доц.,  
А.О. Буняк, студент,  
Нац. ун-т «Києво-Могилянська Академія»  
oletsky@ukr.net

## ПРО ЗАСТОСУВАННЯ DATA MINING ДО ПРОБЛЕМИ АВТОМАТИЧНОГО ФОРМУВАННЯ РЕКОМЕНДАЦІЙ НА НАВЧАЛЬНОМУ ПОРТАЛІ

Описуються засоби, розроблені для розв'язання задачі пошуку найбільш рекомендованих навчальних матеріалів в системах e-learning на основі окремих методик Data Mining, а саме: кластеризації на основі алгоритму fuzzy c-means та алгоритму пошуку асоціацій Apriori.

*Ключові слова:* рекомендаційна система; e-learning; Data Mining; кластерний аналіз; алгоритм Apriori.

Описываются средства, разработанные для решения задачи поиска наиболее рекомендуемых учебных материалов в системах e-learning на основе отдельных методик Data Mining, а именно: кластеризации на основе алгоритма fuzzy c-means и алгоритма поиска ассоциаций Apriori.

*Ключевые слова:* рекомендательная система; e-learning; Data Mining; кластерный анализ; алгоритм Apriori.

Describe tools designed to solve the problem to find the most recommended learning materials in e-learning systems based on individual techniques Data Mining, namely clustering algorithm based on fuzzy c-means algorithm and search association Apriori.

*Keywords:* recommendation system; e-learning; Data Mining; cluster analysis; algorithm Apriori.

**Постановка проблеми та основні задачі.** Останнім часом набули значного розвитку веб-ресурси навчального спрямування — онлайн-енциклопедії, тематичні портали, а також власне системи e-learning, побудовані на основі тієї чи іншої LMS (найбільш поширеною є Moodle) [1]. Найчастіше такі системи є набором навчальних статей, певним чином згрупованих за темами, і актуальною є проблемою автоматичного вибору посилань на найбільш корисні споріднені ресурси, тобто індивідуалізованих рекомендацій з приводу того, що учень або студент має робити далі. При цьому звичайних критеріїв текстової схожості недостатньо – вибір рекомендацій має робитися з огляду на максимізацію їх ефективності з точки зору накопичення знань.

Проблема індивідуалізації процесу e-learning з точки зору загальної теорії автоматичного керування може бути в загальних рисах охарактеризована як проблема максимізації деякого функціоналу, що описує знання учня або студента, на основі оптимального вибору керуючих навчальних впливів, тобто матеріалів, які мають бути прочитані та засвоєні. При цьому ключовою проблемою є побудова моделей, які б адекватно описували керуючі впливи та індивідуальні характеристики учня; для її вирішення природно застосовувати методи навчання на основі Data Mining [2], зокрема Web Usage Mining. Таким чином, виникають задачі побудови відповідних методик, а також експериментальних програмних засобів, які реалізують ті чи інші алгоритми.

**Основна суть роботи.** Деякі підходи до застосування методів Data Mining до побудови рекомендаційних систем в рамках e-learning були в загальних рисах описані в [3]. Один з них може бути охарактеризований наступним чином: на етапі навчання проаналізувати типову поведінку відвідувачів та розділити їх на групи за тим чи іншим критерієм. Для кожної групи мають бути вироблені правила формування рекомендацій.

В робочому режимі розв'язується класична задача розпізнавання, тобто приймається рішення про віднесення нового відвідувача до певної групи, і на основі цього в кожному вузлі, пов'язаному з окремим навчальним матеріалом, йому надаються відповідні рекомендації.

Для розбиття на групи, тобто кластеризації, був використаний алгоритм fuzzy e-means [2]. Кількість кластерів визначалася динамічно в залежності від кількості відвідувачів. Простір

ознак формувався на основі кількості матеріалів з кожної теми, прочитаних відвідувачів. Така кластеризація дозволяє виокремити групу користувачів з тими ж інтересами, що і зареєстрований користувач.

Крім того, ця методика дозволяє зареєстрованому користувачеві отримати перелік користувачів зі схожими інтересами. Це може виявитися корисним при обговоренні певного матеріалу. Користувач може отримати контакти людей зі схожими інтересами, що дає змогу зразу почати дискусію. Таким чином, навчальна система може набути окремих рис віртуальної спільноти, або соціальної мережі.

Для вироблення рекомендацій щодо вибору навчального матеріалу використовувався алгоритм пошуку асоціацій Аргіогі [2] з певними модифікаціями. За допомогою цього алгоритму визначаються структуровані певним чином шаблони, які описують послідовні дії відвідувача. Беруться до уваги не лише назви навчальних матеріалів, але й послідовності, в якій інші користувачі переглядали матеріали. При відсутності відповідного шаблону користувачеві просто рекомендуються матеріали, які були прочитані іншими користувачами зі схожими інтересами, і які не бачив даний користувач. При цьому програма розраховує коефіцієнти відповідності.

Такий підхід до визначення рекомендацій дозволяє керувати часом, прийнятним для знаходження рекомендацій. Основним параметром є кількість кластерів. При збільшенні кількості кластерів збільшується час роботи алгоритму кластеризації, але водночас зростає і точність визначення груп користувачів та якість рекомендацій. Аналогічні міркування можуть бути використані і з іншою метою – наприклад, для автоматичного підбору контекстної реклами з найбільш імовірним відгуком. Описані програмні засоби були реалізовані на основі мови PHP з використанням JavaScript та AJAX. Для роботи з базами даних було використано MySQL. Розроблені засоби інтелектуального аналізу даних для пошуку найбільш ефективних рекомендацій щодо вибору споріднених статей були імплементовані на тематичному ресурсі <http://www.javaconsulting.com.ua>, присвяченому програмуванню на Java.

**Висновки.** В роботі описані певні базові підходи до побудови рекомендаційної системи вибору навчальних матеріалів в рамках системи e-learning, а також програмні засоби, що забезпечують реалізацію деяких базових алгоритмів. Розвиток може бути пов'язаний з такими напрямками:

— аналіз навігації, тобто поведінки користувачів, можна здійснювати не лише в просторі навчальних матеріалів, але й в просторі пов'язаної з ними онтології в рамках моделі “онтологія-документ”. Деякі міркування з приводу формалізації зв'язків між вузлами онтології понять та документами (змістовно – сторінками з окремими навчальними матеріалами);

— описану модель пошуку рекомендованих матеріалів за онтологією можна замінити на модель пошуку на основі мір корисностей, розрахованих за методикою навчання з підкріпленням на основі марковських моделей прийняття рішень [3].

Робота в цих напрямках має стати предметом подальших досліджень.

## Література

1. Сергієнко І.В. Програмні засоби створення і супроводу розподіленого навчального середовища. / І.В. Сергієнко, М.М. Глибовець, С.С. Гороховський, А.М. Глибовець. — К.: НаУКМА, Аграр Медіа Груп, 2012. — 710 с.
2. Барсегян А.А. Технологии анализа данных: Data Mining, Visual Mining, Text Mining, OLAP. / А.А. Барсегян, М.С. Куприянов, В.В. Степаненко, И.И. Холод. — СПб: БХВ-Петербург, 2007. — 384 с.
3. Олецкий О.В. Про оптимізацію структури веб-порталу на основі марковських процесів прийняття рішень / О.В. Олецкий // Вісн. Київськ. нац. ун-ту ім. Тараса Шевченка. Серія фізико-математичні науки. — 2013. — Спецвип. — С. 134 — 137.

УДК 681.3:621.822

А.А. Пушкин, ст. преподаватель, Одес. нац. акад.  
пищевых технологий pushkyn@mail.ru

## ПРИМЕНЕНИЕ РАСТУЩИХ САМООРГАНИЗУЮЩИХСЯ КАРТ КОХОНЕНА ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ ДИАГНОСТИЧЕСКОЙ МОДЕЛЕЙ НОРИИ

В работе рассматривается возможность применения растущих самоорганизующихся карт Кохонена, для построения диагностических моделей, на примере построения диагностической модели норрии.

*Ключевые слова:* вибродиагностика; диагностическая модель; растущие самоорганизующиеся карты.

У роботі розглядається можливість застосування зростаючих самоорганізованих карт Кохонена, для побудови діагностичних моделей, на прикладі побудови діагностичної моделі норії.

*Ключові слова:* вібродіагностика; діагностична модель; зростаючі самоорганізуються карти.

This paper considers the possibility of growing self-organizing Kohonen maps, to build diagnostic models, by the construction of diagnostic model of the elevator.

*Keywords:* vibrodiagnostics; growing self-organizing maps; diagnostic models.

Одним из широко применяемых методов технической диагностики является оценка спектральных характеристик виброакустического поля машины [1]. Предполагается, что в процессе работы машина последовательно проходит несколько состояний  $C_1...C_n$  соответствующих фазе кинематического цикла. Каждое такое состояние характеризуется своим спектром сигнала вибрации в контрольных точках. Последовательность таких состояний (траектория), характеризует техническое состояние машины.

Для норрии кинематический цикл связан с проходом стыка ленты по приводному и натяжному барабанам. При изменении качества стыка или натяжения ленты, деформации норрийных труб или ковшей, приводящих к ударам, и т.д., спектр, характеризующий отдельные состояния, изменяется либо кратковременно возникают новые состояния, характеризующиеся другим спектром вибрации в контрольных точках. Таким образом, отклонение траектории, характерной для нормальной работы норрии, может указывать на появление неисправности.

Одной из задач при создании систем автоматизированной диагностики технического состояния, является кластеризация, которая заключается в разбиении множества состояний  $S$  на классы  $K$ , когда основой разбиения служит вектор диагностических параметров  $X = \{X_1, \dots, X_k\}$ . Состояния в пределах одного класса считаются эквивалентными с точки зрения критерия разбиения. Сами классы и их количество заранее неизвестны и должны формироваться в процессе обучения работы системы диагностики.

Поскольку, часть состояний будет соответствовать нормальной работе, а другая - работе с возмущениями, вызванными изменениями состояний некоторых узлов оборудования или случайными факторами, кластеризацию можно выполнять в два этапа:

- выделение последовательности состояний соответствующих нормальной работе норрии;
- выделение состояний соответствующих работе норрии с дефектами.

При решении задачи кластеризации предлагается использовать два варианта самоорганизующихся карт Кохонена. На первом этапе — одномерная сеть Кохонена, на втором растущая самоорганизующаяся карта Кохонена (Growing self organization map, GSOM).

Для исследования возможности применения данного подхода к построению диагностической модели, нами проводилась запись реализаций сигналов виброускорения (длительность реализаций соответствовала времени одного оборота ленты норрии) в различных точках на корпусе башмака и головки норрии и вычислялись спектрограммы реализаций [2].

На первом этапе производился синтез одномерной сети Кохонена [2]. В качестве обучающей выборки использовалась спектрограмма сигнала виброускорения, соответствующая «нор-



мальной» работе нории. В результате была синтезирована сеть со следующими параметрами: количество нейронов входного слоя  $N_{вх} = 512$ , количество нейронов выходного слоя  $N_{вых} = 4$ .

На втором этапе, дальнейшее обучение сети производилось на основе спектрограмм реализаций, записанных в той же контрольной точке, при различных ситуациях, которые классифицировались как дефект отдельных узлов, используя алгоритм обучения GSOM [3]. В результате выполнения фазы роста, были синтезированы карты Кохонена большей размерности. Появление новых нейронов слоя Кохонена, вызвано изменениями спектра виброускорения, обучающей выборки, связанными с изменением состояния отдельных узлов нории.

Анализ спектрограмм реализаций сигналов виброускорения с помощью сетей Кохонена, позволил выявить спектры состояний соответствующие нормальной работе нории, а также спектры состояний связанных с зацеплением ковшей нории о норийные трубы и ударных импульсов вызванных износом подшипников. Такие виды неисправностей выявляются с помощью сетей Кохонена в виде дополнительных классов. При появлении в сигнале виброускорения периодических компонент, например связанных с дефектами редуктора, в значительной мере изменяется спектральный состав обучающей выборки, что затрудняет интерпретацию новых состояний на основе ранее выявленных классов, но позволяет производить дифференциальную диагностику нории.

### Литература

1. Плевэ А.Г. Аппаратно-программный комплекс сбора и обработки диагностической информации / А.Г. Плевэ, А.А. Пушкин // Наук. пр. ОНАХТ. — Одеса, 2007. — Вип. 30 — Т.2. — С. 311 — 316.
2. Пушкин А.А. Нейросетевой анализ спектральных характеристик виброакустических сигналов в задаче диагностики технического состояния нории / А.А. Пушкин, А.Г. Плевэ. Наук. пр. ОНАХТ. — Одеса: 2008. — Вип. 34 — Т.1. — С. 279 — 282.
3. Alahakoon, D., Halgamuge, S. K. and Sirinivasan, B. (2000) Dynamic Self Organizing Maps With Controlled Growth for Knowledge Discovery, IEEE Transactions on Neural Networks, Special Issue on Knowledge Discovery and Data Mining, 11, pp 601-614.

УДК 004:2

Г.В. Олійник, аспірант, Нац. ун-т харчових технологій, [anna.oliinyk@ukr.net](mailto:anna.oliinyk@ukr.net)

## ПРЕДСТАВЛЕННЯ ВХІДНИХ ДАНИХ ПРИ ПЛАНУВАННІ ПОСЛІДОВНОСТІ ВИКОНАННЯ ЕТАПІВ ДОГОВОРІВ

Запропонований підхід організації та представлення вхідних даних при вирішенні задачі планування виконання договорів для підприємств, діяльність яких пов'язана з наданням послуг.

*Ключові слова:* надання послуг; етап договору; план виконання; граф.

Предложен подход организации и предоставления входных данных при решении задачи планирования выполнения договоров для предприятий, деятельность которых направлена на предоставление услуг.

*Ключевые слова:* представление услуг; этап договора; план выполнения; граф.

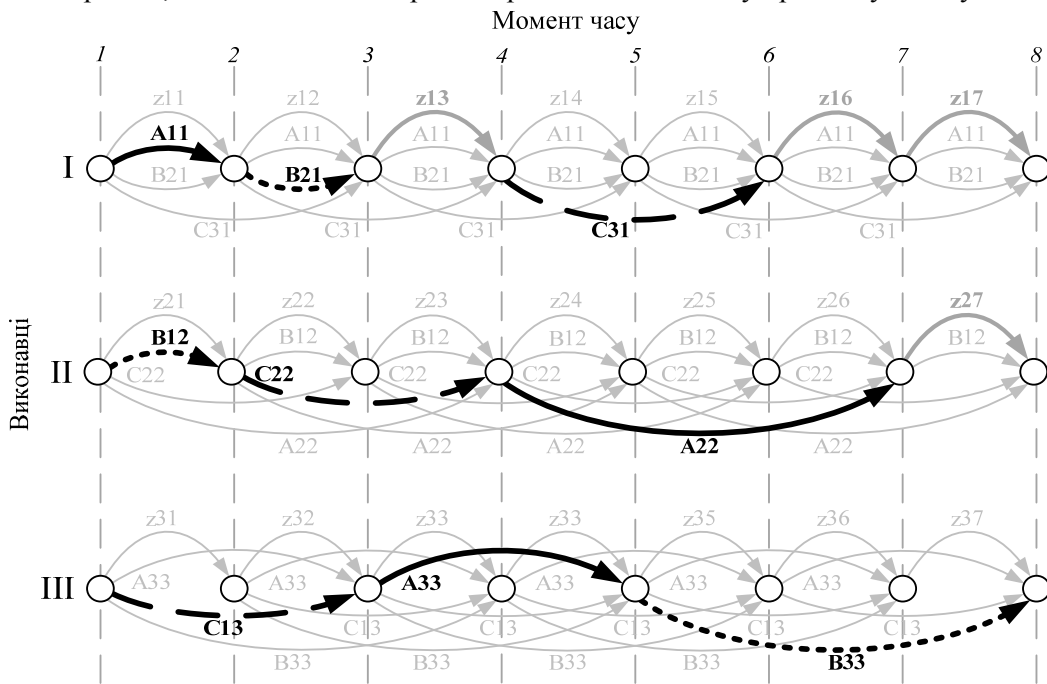
An approach to organizing and presenting input data when solving the problem of planning contract execution for enterprises engaged in rendering of services is proposed.

*Key words:* rendering of services; contract stage; execution plan; graph.

Задача планування виконання договорів для підприємства, діяльність якого пов'язана з наданням послуг за укладеними договорами, орієнтована на процес виконання робіт, що містять певну послідовність операцій. Окремий договір укладається на надання одного виду послуги, а

виконання умов договору зазвичай здійснюється у декілька етапів, послідовність яких чітко визначена та може включати як послідовне, так і одночасне виконання. Таким чином, у договорі, укладеному із замовником, визначаються особливості надання певного виду послуги у відповідності до поставлених вимог. Кожний етап здійснюється компетентним виконавцем, причому таким може бути один або група співробітників, з використанням відповідних ресурсів.

Необхідно відзначити, що задача планування виконання договорів відноситься до NP-складних багатокритеріальних комбінаторних задач, для яких із збільшенням кількості вхідних даних значно зростає час, необхідний для знаходження розв'язку [1]. З метою зменшення часових витрат та зниження обчислювальної складності запропоновано метод вирішення задачі, в основу якого покладена ідея алгоритму мурашиної колонії [2, 3]. Для ефективного застосування такого алгоритму необхідною умовою є побудова представлення вхідних даних з урахуванням особливостей предметної області, в якості якого запропоновано використати орієнтований зважений граф, вузли якого відображають проміжний стан переходу від виконання одного етапу до іншого, а ребра, що з'єднують ці вузли, відповідають безпосередньо процесу виконання етапів. Причому виконання деякого  $j$ -ого етапу  $i$ -ого договору може початися з будь-якого вузла, якщо в даний момент роботи  $l$ -им виконавцем не проводяться. Перший та останній вузол графа відповідають початку та закінченню планового періоду або деякої його частини, наприклад робочого дня. Вага кожного ребра являє собою загальну тривалість виконання відповідного етапу  $tv_{ijl}$ . Для передбачення випадку виникнення затримки виконання певного етапу введено спеціальне позначення:  $z_{lt}$  — затримка у виконанні робіт  $l$ -им виконавцем на деякій ітерації  $t$ , яка може виникнути у зв'язку з вимогою дотримання послідовності виконання етапів послуги; а  $tz_{lt}$  — час такої затримки, який на кожній ітерації дорівнює одиничному проміжку між вузлами.



Оскільки потрібно врахувати існуючу множинність та паралельність виконання етапів різними виконавцями в межах єдиного робочого часу, для зручності та з метою отримання в результаті окремого плану робіт для кожного виконавця, задачу планування виконання договорів запропоновано представити у вигляді набору графів, у якому кожний граф відображає виконання робіт в межах визначеного часового терміну для кожного окремого виконавця. Іншими словами, кожен граф такого набору включає лише ті етапи, які повинен здійснити конкретний

виконавець за період, визначений крайніми вузлами. Важливим моментом є те, що вузли всіх графів набору, які визначають один момент часу, представляють собою єдине ціле, а отже в кожному вузлі кожного графа наявна інформація про виконання всіх етапів всіма виконавцями. Введена величина  $z_{it}$  використана в якості додаткових ребер між кожною парою сусідніх вузлів.

Фактично, задачу можна зобразити у тривимірному представленні, де кожна площина відповідає робочому часу одного виконавця, а вузли є опорними, ключовими точками для всіх площин. Побудоване тривимірне представлення набору графів для трьох виконавців з варіантом виконання робіт, враховуючи вимоги послідовності виконання етапів послуг, показано на рис. 1.

Виконавець I починає роботу з виконання етапу 1 договору A (A1), далі переходить до виконання B2 — така дія можлива, оскільки на першому часовому проміжку етап B1 був здійснений виконавцем II. Але після цього виконавець I змушений очікувати можливості виконання C3, оскільки C1 і C2 ще не завершені іншими виконавцями до цього моменту.

Використання представленого набору графів зводить задачу планування виконання договорів до задачі вибору оптимального маршруту, що дає можливість ефективного застосування алгоритму мурашиної колонії, а також дозволяє адекватно відобразити послідовність виконання робіт підрозділами підприємства з урахуванням усіх наявних особливостей та сформувати окреме завдання для кожного виконавця, узгоджене з іншими.

### Література

1. Безгинов А.Н. Обзор существующих методов составления расписания / А.Н. Безгинов, С.Ю. Трегубов // Информационные технологии и программирование: межвузовский сборник статей. — М.: МГИУ, 2005. — № 2(14) — С. 5 — 18.
2. Загидуллин Р.Р. Вопросы синтеза математических моделей оперативно-календарного планирования / Р.Р. Загидуллин // Технология машиностроения. — 2006. — № 1. — С. 76 — 78.
3. Зайченко Ю. Исследование муравьиных алгоритмов оптимизации в задаче коммивояжера / Ю. Зайченко, Н. Мурга // International Journal «Information Models and Analyses» Vol. 2 — 2013. — № 4. — С. 370 — 384.

УДК 004.75, 578.08; 681.7.08: 535.3;  
681.7.08:535.23; 004.387: 621.3.087.92

**В.О. Романов**, д-р техн. наук, проф., Ін-т кібернет.  
ім. В.М. Глушкова НАНУ,  
kovyrova.oleksandra@gmail.com

## МУЛЬТИСЕНСОРНА БЕЗДРОТОВА МЕРЕЖА ДЛЯ ЕКСПРЕСНОГО ВИЗНАЧЕННЯ СТРЕСОВОГО НАВАНТАЖЕННЯ НА СТАН АГРАРНИХ КУЛЬТУР

Наведено результати розробки мультисенсорної бездротової мережі для експрес-діагностики стресового навантаження на стан рослин, яка здатна охоплювати великі території сільськогосподарських угідь. Вимірювання в експресному режимі параметрів рослин та навколишнього середовища за допомогою великої кількості бездротових сенсорів дозволяє здійснювати догляд за сільськогосподарськими культурами на великих територіях та оперативно виробляти управлінські рішення щодо їх захисту.

*Ключові слова:* бездротова сенсорна мережа; індукція флуоресценції хлорофілу.

Приведены результаты разработки мультисенсорной беспроводной сети для экспресс-диагностики стрессовой нагрузки на состояние растений, которая способна охватывать большие территории сельскохозяйственных угодий. Измерение в экспрессном режиме параметров растений и окружающей среды с помощью большого количества беспроводных сенсоров позволяет выполнять уход за сельскохозяйственными культурами на больших территориях и оперативно вырабатывать управленческие решения относительно их защиты.

*Ключевые слова:* беспроводная сенсорная сеть; индукция флуоресценции хлорофилла.

Results of developing multisensory wireless network for express-diagnostics of stress load on the plant state, which can covers a large territory of agrarian lands, are considered. Express measuring of parameters of plants and environment by means of a large number of wireless sensors allows supervising over agrarian crops on large territories and timely managerial decision-making to protect plants.

*Keywords:* wireless sensor network; chlorophyll fluorescence induction.

Отримання оперативної та об'єктивної інформації про стан сільськогосподарських культур на великих територіях аграрних господарств у багатьох випадках є важливим фактором, який зумовлює подальшу стратегію по догляду за сільськогосподарськими угіддями та прийняттю відповідних управлінських рішень. Звичайно, ідеальним було б отримання інформації про покращення або погіршення стану рослин не постфактум, а завчасно. Це дозволить вчасно прийняти рішення про необхідність захисту рослин і тим самим зменшити негативний вплив стресових чинників природного або техногенного походження.

Використання автономних приладів для експрес-діагностики стану окремих рослин [1] на великих територіях сільськогосподарських угідь має певні обмеження, а саме: необхідність наявності великої кількості портативних приладів, здатних працювати в польових умовах, необхідність залучення кваліфікованого персоналу для роботи з приладами, аналізу отриманих даних та вироблення відповідних висновків, неможливість проведення одночасного вимірювання стану рослин на великих територіях при однакових параметрах навколишнього середовища, довготривалість передачі вимірюваних даних в центри прийняття рішень.

Аналіз літератури показав, що сучасні досягнення в мікроелектроніці, біосенсоріці та інформаційно-телекомунікаційних технологіях дозволяють створювати безпроводні сенсорні мережі (БСМ) для експрес-діагностики стану рослин на великих територіях з використанням ефекту індукції флуоресценції хлорофілу, який лежить в основі роботи автономних приладів сімейства «Флоратест» [2]. Застосування в БСМ мініатюрних сенсорів для вимірювання додаткових показників стану повітря, води та ґрунту дозволяє діагностувати не тільки загальний стан рослин, але і такі параметри, як вміст пестицидів у ґрунті, воді та рослинах, рівень корозії ґрунту, забруднення повітря, загальний стан навколишнього середовища тощо.

Доповідь містить результати розробки БСМ і розподілених первинних датчиків для систем підтримки прийняття рішень при експресному визначенні стресового навантаження на стан аг-

рарних культур, отримані в Інституті кібернетики при виконанні міжнародного проекту НАН України і РФФД та національного проекту «Мультисенсорна технологія експрес-діагностики стану рослин» в рамках Програми НАН України «Сенсорні прилади для медико-екологічних та промислово-технологічних потреб» колективом авторів у складі академіка НАН України О.В. Палагіна, д.т.н., В.О. Романова, к.т.н., І.Б. Галелюки, В.М. Груші, О.В. Ковирьової, к.с.-г.н., Є.В. Сарахан, Г.В. Тищенко.

Створювана мультисенсорна бездротова мережа — це, фактично, БСМ, а саме: мережа великої кількості сенсорів, які об'єднані між собою радіоканалом. Площа покриття подібної мережі може складати від декількох квадратних метрів до декількох квадратних кілометрів за рахунок здатності ретранслювати дані від одного елемента до іншого.

Вузли створюваної мережі, як правило, розташовані випадковим чином на всій території спостережень. Кожний з них може здійснювати збір даних і передавати їх в центральний вузол. В запропонованій мережі можна виділити два типи пристроїв. Перший тип — це повнофункціональний вузол або координатор. Такий вузол реалізує загальну модель зв'язку, яка дозволяє «спілкуватися» з іншими вузлами мережі. Другий тип пристроїв — вузли з облегшеними функціями та малими вимогами до мережі. Переважно такі вузли здійснюють вимірювання, передачу виміряних даних до координатора і, що не менш важливо, ретранслюють дані від вузлів, які знаходяться поза зоною досяжності координатора мережі.

При проектуванні вузлів мережі слід було приділити увагу двом аспектам: обробці даних всередині мережі та організації зв'язку між окремими вузлами. Обробка даних в середині мережі включає в себе розробку інтерфейсів сенсорів, процесів отримання даних, стиснення та агрегування даних, прийняття рішень та формування звітів. Організація зв'язку між вузлами мережі передбачає налаштування модулів бездротового зв'язку, синхронізацію мережі, планування MAC-протоколів, керування топологією, стратегію внутрішньомережевих комунікацій та загальну організацію розповсюдження даних. Частину вказаних функцій було вирішено покласти на фізичний рівень протоколу IEEE 802.15.4.

Для створення пілотних вузлів БСМ було обрано бездротові мікроконтролери JN5168 виробництва компанії NXP. Мікроконтролер містить 32-бітний процесор з тактовою частотою 1-32 МГц, радіопередавач, сумісний з протоколом IEEE802.15.4, 4-канальний АЦП і сукупність аналогових та цифрових входів. Цей мікроконтролер відповідає вимогам нашої прикладної задачі щодо отримання, зберігання та передачі даних через бездротовий канал. Для організації маршрутизації всередині мережі було використано протокол JenNet-IP. Слід відмітити, що використані бездротові модулі передачі даних сумісні з протоколом ZigBee, що вносить елементи стандартизації та уніфікації в розробку бездротової мережі.

При розробці мультисенсорної бездротової мережі для експрес-діагностики стресового навантаження на стан рослин зроблено висновок, що створення БСМ для сільського господарства є складною і комплексною задачею, яка вимагає знаходження компромісу між відмовостійкістю, енергоспоживанням та апаратними обмеженнями вузлів БСМ.

## Література

1. Palagin O.V, Data acquisition systems of plants' state in precision agriculture / O.V. Palagin, V.O. Romanov, I.B. Galelyuka, V.Yu. Velichko, V.M. Hrusha // Proceeding of the 6th IEEE International conference on "Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications", IDAACS'2011. — Prague, Czech Republic. — 2011, September 15–17. — P. 16 — 19.
2. Romanov VI. Portable Biosensor: from Idea to Market / V. Romanov, D. Artemenko, Yu. Brayko and others // International Journal "Information Theories & Applications. Vol. 19, Number 2. — Sofia, Bulgaria. — 2012. — P. 126 — 131.

УДК 621.317

**О.В. Рыбальский**, д-р техн. наук., проф., Нац. акад. внутренних дел, rybalsky\_ol@mail.ru  
**В.И. Соловьев**, канд. техн. наук., доц., Восточно-украинский нац. ун-т им. В. Даля  
**А.Н. Шаблия**, канд. техн. наук., ст. науч. сотр., Одес. науч.-исслед. ин-т судебных экспертиз,  
**В.В. Журавель**, Гос. науч.-исслед. экспертно-криминалистический центр МВД Украины

## СИСТЕМА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПОИСКА ГОЛОСОВ

Розглянуто побудову автоматизованої системи пошуку особи за фізичними параметрами сигналів усного мовлення у базі даних фігурантів.

*Ключові слова:* база даних; голос; ідентифікація; фігурант; цифрова фонограма.

Рассмотрено построение автоматизированной системы поиска личности по физическим параметрам сигналов устной речи в базе данных фигурантов.

*Ключевые слова:* база данных; голос; идентификация; фигурант; цифровая фонограмма.

The construction of CAS of search of personality is considered on the physical parameters of signals of the spoken language in the database of suspected.

*Keywords:* database; voice authentication; suspected; digital phonogram.

Матеріали звукозаписи становлять значительную часть доказательств, используемых при расследовании и рассмотрении в суде дел, связанных с коррупцией, взяточничеством, вымогательством, рэкетом, похищениями людей и тому подобное.

Но существуют особенные цифровые фонограммы, содержащие сообщения, поступающие в дежурные части ОВД Украины. Они образуют отдельный вид экспертных материалов цифровой звукозаписи. Это объясняется тем, что при их экспертизе всегда используют цифровую копию фонограммы и не проводят экспертизу оригинальности и подлинности фонограмм. Принимая во внимание, что в настоящее время значительную часть таких фонограмм составляют ложные сообщения относительно ожидаемых терактов, перед экспертными подразделениями МВД Украины предстала проблема помощи оперативным и следственным подразделениям в выявлении экспертным путем подозреваемых в таких правонарушениях.

Основными задачами такой экспертизы являются:

— идентификация по параметрам сигналов речи личности, подозреваемой в предоставлении ложного сообщения, в случае ее задержания или наличия образцов ее голоса, полученных оперативным путем;

— выявление в базе данных голосов фигурантов с близкими параметрами сигналов устной речи для установления потенциальных подозреваемых в предоставлении ложной информации.

Успешное решение этих задач может быть обеспечено соответствующими экспертными подразделениями Государственного научно-исследовательского экспертно-криминалистического центра (ГНИЭКЦ) МВД Украины. Для облегчения их выполнения требовалась разработка автоматизированной системы идентификации личности по физическим параметрам сигналов ее устной речи.

В настоящее время разработана первая версия программы AVATAR, составляющая программную часть такой автоматизированной системы. Она была подвергнута испытаниям и предоставлена на апробацию в ГНИЭКЦ и Одесский НИИ судебных экспертиз.

В системе предусматривается автоматическое разделение голосов дежурного работника ОВД и заявителя. Такая функция во многих случаях исключает необходимость предыдущей подготовки экспертом записей, поступающих или уже зафиксированных в базе данных. Однако

ее применение не обеспечивает гарантированного разделения голосов в фонограммах, записанных на одноканальной аппаратуре. Поэтому введение этой опции в программу не исключает необходимости методически предусмотреть возможность проведения предыдущей подготовки записей, зафиксированных в базе данных. Такой подготовкой является разделение голосов экспертом. Также следует отметить, что результаты сравнения физических параметров голосов всегда носят вероятностный характер, который определяется величиной вероятностей ошибок I и II рода. В системе использован метод ранжирования по величине ошибки I рода. Проведенные эксперименты с использованием первой версии программы AVATAR показали, что при поиске разных образцов голоса одного человека, записанного на разных фонограммах, величина вероятности ошибки I рода не превышает значения 0,05. Результаты поиска предоставляются в виде ранговой таблицы. В процессе ввода фонограмм в базу данных производится расчет параметров сигналов зафиксированных на них голосов.

Первоначально расчет параметров голосов и ранжирование проводилось только по частоте основного тона (ЧОТ). Результат этого процесса показан на примере, приведенном на рис. 1, где приведен спектр ЧОТ голоса на образцовой фонограмме и спектр ЧОТ голоса, размещенного на первой позиции ранговой таблицы, полученной в результате поиска.

Но при расчете ранговой таблицы весьма часто случалось так, что хотя на ее первой позиции размещалась фонограмма с записью голоса диктора, голос которого записан на образцовой фонограмме, но во многих последующих позициях находились фонограммы с голосами других дикторов. Но при этом во всех экспериментах на первую позицию всегда приходился голос диктора, который записан и на образцовой фонограмме. Однако мы сочли, что это существенный недостаток программы.

Поэтому была создана программа, сравнивающая не только ЧОТ, но и дополнительные признаки, имеющие индивидуальный характер. В результате обработки предлагаемого метода были отобраны три индивидуальных признака, содержащихся в голосовых сигналах, пригодные для построения окончательного варианта системы. К ним относятся:

- вычисление близости кривых функций плотности вероятности для интегральной оценки по ЧОТ и расположению в спектре семи формант, выделяемых из речи, зафиксированной на фонограмме;
- вычисление близости кривых функций плотности вероятности для каждого из этих признаков отдельно;
- вычисление близости максимумов спектров формант, выделяемых из речи, зафиксированной на фонограмме.

Следует сказать, что для вычисления спектров сигналов речи использовано дискретное вейвлет преобразование, а в качестве вейвлета был избран вейвлет Морле. При этом отметим, что при вычислениях спектров сигналов речи был применен метод каркасов, что позволило значительно повысить точность полученных результатов и обеспечить разрешающую способность, близкую к непрерывному преобразованию [1].

**Вывод.** Создана система, обеспечивающая автоматический поиск по базе данных личностей с голосами, наиболее близкими к голосу фигуранта, записанного на образцовой фонограмме. Поиск проводится по трем независимым признакам.

## Литература

1. Малла С. Вэйвлеты в обработке сигналов: Пер. с англ. / С. Мала. — М.: Мир, 2005. — 671 с.

УДК 004.415:681.518

С.Ф. Теленик, д-р техн. наук, проф., Київ, нац.  
техн. ун-т України «КПІ», savchuk\_11@ukr.net

## ПРО ЗАСТОСУВАННЯ НЕЙРОМЕРЕЖЕВИХ ТЕХНОЛОГІЙ ПРИ ДІАГНОСТУВАННІ ЕЛЕКТРО-РАДІОКОМПОНЕНТІВ

Досліджувалася можливість використання нейромережєвих технологій для удосконалення діагностування електро-радіокомпонентів за інтегральними ефектами для підвищення надійності складних технологічних комплексів.

*Ключові слова:* нейромережєві технології; діагностування, інтегральні ефекти, електро-радіокомпоненти.

Исследовалась возможность использования нейросетевых технологий для совершенствования диагностирования электро-радиокомпонентов по интегральным эффектам для улучшения надежности сложных технологических комплексов.

*Ключевые слова:* нейросетевые технологии; диагностирование; интегральные эффекты, электро-радиокомпоненты.

The objective of the work is possibility of using neural network technologies for improving of electric radio components' diagnosing by integral effects for increasing reliability for complex technological systems.

*Keywords:* neural network technologies; diagnosing; integral effects; electric radio components.

Всебічна комп'ютеризація виробництва, підвищення вимог до надійності і діагностики складних комп'ютеризованих комплексів (СКК) потребують перетворити їх діагностичне забезпечення з експериментально-інформаційної технології до області новітніх нейромережєвих технологій інтелектуального аналізу.

В умовах невизначеності технічного чи фізичного стану електро-радіокомпонентів (ЕРК) як складових технічних комплексів неможливо забезпечити їх необхідну якість та надійність без інтелектуального аналізу діагностичної інформації [1].

Постановкою проблеми є перевірка можливості застосування нейромережєвих технологій для удосконалення електрофізичних методів діагностування електро-радіокомпонентів (ЕРК) по інтегральним ефектам для підвищення надійності складних комп'ютеризованих комплексів.

Вирішувані завдання:

— застосування електрофізичних методів діагностування за інтегральними фізичними ефектами інерційності та нелінійності електро-радіокомпонентів для отримання первинної діагностичної інформації;

— стиснення та інтелектуальний аналіз апостеріорної інформації із застосуванням нейромереж

— для розбравки досліджуваних електро-радіокомпонентів за їх фізичним станом у

— середовищі програмного пакету MATLAB та його бібліотеки Neural Network Toolbox.

Інформаційна можливість електрофізичних методів діагностування за інтегральними фізичними ефектами пояснюється методом чорної скриньки, як закритої системи.

Для фізичних об'єктів функція сприйнятливості  $g(\omega)$ , складна функція середовища, являється комплексною функцією

$$g(\bullet) = \text{const } Re[g(\bullet)] + \text{var } Re[g(\bullet)] + j \{ \text{const } Im[g(\bullet)] + \text{var } Im[g(\bullet)] \},$$

де  $Re$  — дійсна частина функції;

$Im$  — уявна частина;

$\text{const}$  — постійна частина;

$\text{var}$  — змінювана частина, яка саме цікавить в діагностиці.

Для діагностування резистивних структур за ефектом інерційності використовуються параметри та ознаки теплових перехідних характеристик (ПТХ), що є реакцією резистора як складного об'єкта під впливом електричного стрибка максимально неруйнівного значення.



Інформаційна можливість електрофізичних методів діагностування за інтегральним ефектом нелінійності та загальний підхід до апаратного забезпечення методів технічного діагностування достатньо повно надається в [1].

Стиснення первинної діагностичної інформації про стан ЕРК виконано за допомогою дискретного розкладання Карунена-Лоева (ДРКЛ), що є розкладанням ансамбля початкових векторів за власними векторами коваріаційної матриці. Для резисторів ортонормований простір, в залежності від похибки, складається з двох базисних координат, тобто є площиною.

Для мікросхем цей простір складається з трьох координат, та кількість матриць зростає до п'яти. Загальна кількість векторів 160 (по 32 зразки для кожної матриці). Елементи отриманих ортонормованих матриць  $A_c, B_c, C_c, D_c, E_c$  зображені в просторі й в проекціях [1].

Дослідження принципів обробки багатомірної інформації дало змогу обрати та обґрунтувати доцільність використання розкладу Карунена-Лоева у якості математичного апарату для опрацювання діагностичної інформації електро-радіокомпонентів.

Для практичної реалізації опрацювання діагностичної інформації по інтегральним фізичним ефектам запропоновано застосування сучасних нейромережових технологій (багатошаровий перцептрон, карти Кохонена, радіально-базисні мережі).

Таблиця 1

Порівняльні результати класифікації для резисторів

Тип нейромережі	Досягнута точність класифікації, %	Час навчання, с
RBF-мережа	99,96	2
Карта Кохонена	84	2
Багатошаровий перцептрон (trainbr)	98,75	39

Таблиця 2

Порівняння кращих результатів для всіх досліджених типів нейромереж для мікросхем

Тип нейромережі	Точність класифікації, %	Час навчання, с	Точність класифікації, %		Час навчання, с	
			Два класи	Три класи	Два класи	Три класи
RBF-мережа (pnn)	99,96	2	99,96	99,96	2	2
RBF-мережа (newrbe)	82,81	2	70,83	70,83	2	2
Багатошаровий перцептрон (trainbr)	99,23	24	99,05	99,05	33	33

Як бачимо з таблиць 1 та 2, ймовірнісні радіально-базисні нейромережі (Probabilistic Neural Network-PNN) мають вищу точність класифікації, ніж нейромережі з радіально-базисними елементами та заданою нульовою помилкою.

Для подальшого розвитку даного напрямку в майбутньому може бути запропонований синтез нового типу нейромереж, який дасть змогу досліджувати вибірки більших розмірів з мінімальними витратами часу та оптимальною точністю.

## Література

1. Савчук О.В. Інтелектуальний аналіз діагностичної інформації складних технічних комплексів / О.В. Савчук, К.С. Кривенко // Інтелектуальний аналіз інформації ІАІ-2014. — К.: Просвіта. — 2014. — С.172 — 177.

УДК 519.235

І.П. Гамаюн, д-р техн. наук, проф.,  
О.М. Безменова, аспірант,  
Нац. техн. ун-т «ХПІ», kuzenko@kpi.kharkov.ua

## РОЗРОБКА ПОКАЗНИКІВ СТУПЕНЯ ЗВ'ЯЗКУ МІЖ НОМІНАЛЬНИМИ ПАРАМЕТРАМИ

Розглядається проблема оцінювання ступеня зв'язку між параметрами, вимірюваними в шкалі найменувань. Запропоновано показники ступеня зв'язку, засновані на максимізації ймовірності передбачення значення одного параметра за значенням іншого і орієнтовані на лінійну залежність від ймовірностей окремих значень, а також показники з еліптичною залежністю. Зроблено висновки щодо використання запропонованих показників ступеня зв'язку при розв'язанні задач угруповання параметрів і класифікації об'єктів.

*Ключові слова:* ступень зв'язку; параметр шкала найменувань; коефіцієнт зв'язку; лінійна залежність; рівняння еліпса.

Рассматривается проблема оценки степени связи между параметрами, измерения в шкале наименований. Предложены показатели степени связи, основанные на максимизации вероятности предсказания значения одного параметра по значению другого и ориентированы на линейную зависимость от вероятностей отдельных значений, а также показатели с эллиптической зависимостью. Сделаны выводы относительно использования предложенных показателей степени связи при решении задач группировки параметров и классификации объектов.

*Ключевые слова:* степень связи; параметр; шкала наименований; коэффициент связи; линейная зависимость; уравнение эллипса.

The problem of assessing the degree of connection between the parameters measured in the scale items. The parameters of the degree of coupling based on maximizing the probability of predicting the value of one parameter to another value and focus on linear dependence on the probabilities of the individual values, as well as indicators to the elliptic dependence. The conclusions regarding the use of the proposed indicators degree of communication in solving grouping parameters and classification of objects.

*Keywords:* degree of communication parameter; the scale items; the coupling coefficient; a linear relationship; the equation of the ellipse.

**Постановка проблеми.** При оцінюванні ступеня зв'язку між кількісними параметрами найчастіше орієнтуються на коефіцієнт кореляції. У той же час у багатьох випадках об'єкти описуються системою ознак, серед яких є як кількісні, так і якісні, у тому числі ознаки, вимірювані в шкалі найменувань. У цьому зв'язку виникає задача формування показників зв'язку для номінальних ознак з властивостями, близькими до властивостей коефіцієнта кореляції [1, 2]. При цьому, якщо відволіктися від наявності впорядкування для значень кількісних ознак, можна побудувати показник ступеня зв'язку, який може бути застосований для оцінювання зв'язків у системі ознак довільного характеру.

**Вирішуване завдання.** Розробити показники ступеня зв'язку між параметрами, які вимірюються у шкалі найменувань.

**Суть дослідження.** Розглядається система з  $N$  оцінюваних у шкалі найменувань параметрів  $S = \{X_j \mid j = \overline{1, N}\}$ , що описують деякий об'єкт. Розглядаючи будь-яку пару таких параметрів  $X_1$  і  $X_2$  з кількостями можливих значень  $n_1$  і  $n_2$  відповідно, зв'язок між  $X_1$  і  $X_2$  будемо оцінювати можливістю передбачення значення параметра  $X_2$  по значенню параметра  $X_1$  (або навпаки). Якщо відомо спільний розподіл  $p_{ij}$ ,  $i = \overline{1, n_1}$ ,  $j = \overline{1, n_2}$  випадкових величин  $X_1$  і  $X_2$ , то як показник ступеня залежності  $X_2$  від  $X_1$  можна розглядати показник, що визначається наступним виразом:

$$\zeta_1(X_1 \rightarrow X_2) = \sum_{i=1}^{n_1} \max_{j=1, n_2} p_{ij} . \quad (1)$$

Оскільки величина  $\zeta_1(X_1 \rightarrow X_2)$  приймає свої значення в діапазоні  $\left[\frac{1}{n_2}, 1\right]$ , віднімемо від неї її мінімальне значення, що дорівнює  $\frac{1}{n_2}$ , і розділимо отриманий вираз на максимальне значення, яке він може прийняти.

У результаті дістаємо показник ступеня зв'язку

$$\zeta_2(X_1 \rightarrow X_2) = \frac{\sum_{i=1}^{n_1} \max_{j=1, n_2} p_{ij} - \frac{1}{n_2}}{1 - \frac{1}{n_2}}, \quad (2)$$

що приймає значення в діапазоні  $[0, 1]$  з досягненням значення 0 при відсутності впливу  $X_1$  на  $X_2$  і 1 у випадку, коли значення параметра  $X_1$  не впливає на параметр  $X_2$ .

Розглядаючи як аргумент показників ступеня зв'язку  $\zeta_1(X_1 \rightarrow X_2)$  і  $\zeta_2(X_1 \rightarrow X_2)$ , величину  $\max_{j=1, n_2} p_{ij}$ , можна відзначити лінійність цих функцій. Побудуємо показник ступеня зв'язку, що змінюється більш швидко поблизу 0 і 1 у порівнянні зі швидкістю його зміни в середині діапазонів. При цьому для опису вигляду залежності використаємо як базову функцію рівняння еліпса. Можна довести, що вирази

$$\zeta_3(X_1 \rightarrow X_2) = 1 - \frac{n_2}{n_1(n_2 - 1)} \sum_{i=1}^{n_1} \sqrt{\left(1 - \frac{1}{n_2}\right)^2 - \left(\frac{\max_{j=1, n_2} p_{ij} - p_{i.}}{p_{i.}} - \frac{1}{n_2}\right)^2}, \quad (3)$$

$$\zeta_4(X_1 \rightarrow X_2) = \frac{n_2}{n_1(n_2 - 1)} \sum_{i=1}^{n_1} \sqrt{\left(1 - \frac{1}{n_2}\right)^2 - \left(1 - \frac{\max_{j=1, n_2} p_{ij}}{p_{i.}}\right)^2} \quad (4)$$

визначають коефіцієнти зв'язку з повільною зміною поблизу однієї межі діапазону і швидкою зміною поблизу іншої.

Як компромісний по відношенню до коефіцієнтів зв'язку  $\zeta_3(X_1 \rightarrow X_2)$  і  $\zeta_4(X_1 \rightarrow X_2)$  може бути розглянутий коефіцієнт зв'язку, побудований як їх середнє арифметичне:

$$\zeta_5(X_1 \rightarrow X_2) = \frac{\zeta_3(X_1 \rightarrow X_2) + \zeta_4(X_1 \rightarrow X_2)}{2} \quad (5)$$

Використовуючи принцип максимальної правдоподібності, можна побудувати вибіркові оцінки запропонованих показників ступеня зв'язку.

**Висновки.** Розроблені показники ступеня зв'язку між параметрами можуть бути використані при розв'язанні задач угруповання параметрів і класифікації об'єктів. Оскільки шляхом дискретизації можна перетворити кількісні параметри в порядкові з наступним переходом до шкали найменувань, показники застосовні і у загального випадку.

### Література

1. Елисеєва И.И. Общая теория статистики: Учебник / И.И. Елисеєва, М.М. Юзбашев. — М.: Финансы и статистика, 2004. — 656 с.
2. Кобзарь, А.И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников / А.И. Кобзарь. — М.: Физ.-матлит, 2006. — 816 с.

УДК 004.93

**Ю.Г. Кривонос**, д-р фіз.-мат. наук, проф., Ін-т кібернетики ім. В.М. Глушкова НАН України,  
**Ю.В. Крак**, д-р фіз.-мат. наук, проф., Київ. нац. ун-т ім. Тараса Шевченка, [yuri.krak@gmail.com](mailto:yuri.krak@gmail.com),  
**О.В. Бармак**, д-р техн. наук, доц.,  
**Р.О. Багрій**, ст. викладач,  
Хмельницький нац. ун-т

## ОБРОБКА ТА РОЗПІЗНАВАННЯ ІНФОРМАЦІЇ ДЛЯ СТВОРЕННЯ НОВИХ ЗАСОБІВ КОМУНІКАЦІЇ ЛЮДЕЙ З ОБМЕЖЕННЯМИ

Пропонуються нові альтернативні підходи до побудови систем комунікації для людей з обмеженими можливостями.  
*Ключові слова:* жести; моделювання; синтез; програмне забезпечення.

Предлагаются новые альтернативные подходы к построению систем коммуникации для людей с ограниченными возможностями.

*Ключевые слова:* жесты; моделирование; синтез; программное обеспечение.

The new alternative approaches to building communication systems for people with disabilities are proposed.  
*Keywords:* gestures, modeling, synthesis, software.

Сучасний розвиток засобів обчислювальної техніки та інформаційних технологій з однієї сторони та існування у суспільстві груп людей з обмеженими можливостями для спілкування (з вадами слуху, з щелепо-лицьовими травмами, після інсультів тощо) спонукає до досліджень альтернативних засобів комунікації для таких людей. Одним із засобів такої комунікації є рухи тіла: жести руками, конфігурації кисті, рухи очима та головою тощо. Пропонується інформаційна технологія, яка допомогла б реалізації цих альтернативних підходів до спілкування.

Розпізнавання жестів полягає у ідентифікації жестів людини з використанням певних технологій. На сьогоднішній день, у цій області, були проведені дослідження з найбільш перспективними технологіями: технології рукавичок, давачів п'ястку, 2D та 3D камери та платформи Kinect [1]. Платформа Microsoft Kinect призначена для розпізнавання руху: система може розпізнавати жести з великими амплітудами, але не спроможна розпізнавати мілкі жести [2]. Для поставленої мети варто дослідити контролер Leap Motion [3], який дає можливості для нового способу взаємодії руки людини з обчислювальними пристроями. Контролер Leap Motion є давачем, за допомогою якого перетворюються рухи рук у комп'ютерні команди. Дані, отримані від API є детермінованими, клієнтське застосування не потребує інтерпретації отриманих даних. API розпізнає одну руку з п'ятьма пальцями. Це контрастує з іншими доступними 3D пристроями сенсорного введення, таких як Microsoft Kinect — де рівень сенсорних даних потрібно очищати та інтерпретувати.

Іншим засобом, який можна використовувати для альтернативної комунікації є рухи голови. Ці рухи можна досить стало розпізнавати за допомогою веб-камери [4]. Рухи очей також можна використовувати для комунікації, але для їх фіксації потрібно відповідний давач [5].

За допомогою перерахованих засобів управління можна реалізувати комунікацію у вигляді введення (з подальшим озвученням за допомогою синтезатора тексту у звук): 1) рукописного тексту; 2) тексту набраного на клавіатурі чи віртуальній клавіатурі; 3) показу слів за допомогою тактильної абетки жестової мови глухих; 4) показу (вибору) слів із словників за допомогою відповідних жестів (конфігураційних чи рухових).

Для досягнення поставленої мети запропонована інформаційна технологія (рис. 1).

На рис. 2 зображено пристрій Leap Motion, за допомогою якого можна керувати курсором рухами руки. Застосування містить наступні області (рис.3): 1) поле для відображення введено-

го різними способами тексту; 2) кнопка для озвучення введеної інформації; 3) область для відображення списку слів чи виразів, що часто використовуються; 4) область, що може містити віртуальну клавіатуру або місце для введення рукописного тексту.

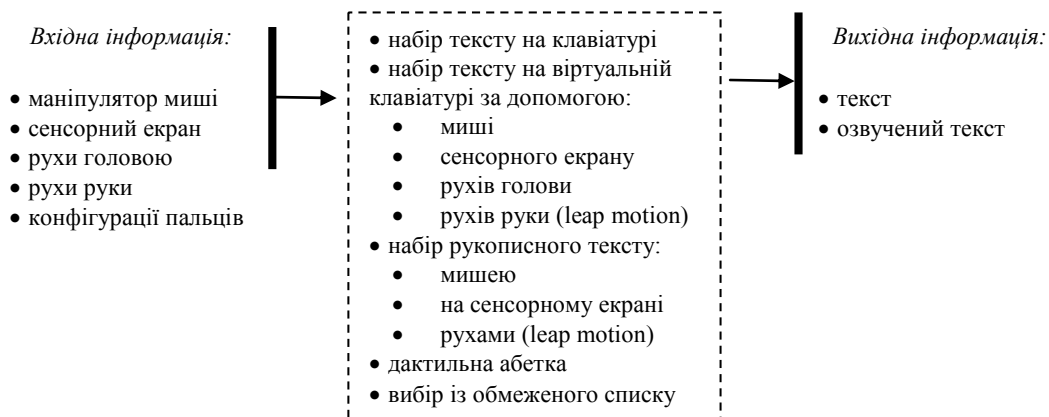


Рис. 1. Інформаційна технологія альтернативної комунікації



Рис. 2. Контролер Leap Motion

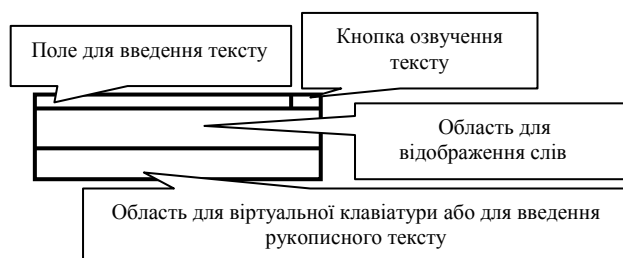


Рис. 3. Дизайн застосування для комунікації

На рис. 4 (а) зображено процес введення тексту за допомогою віртуальної клавіатури. Управління курсором, при цьому, можливе: маніпулятором миші, сенсорним екраном або рукою (через пристрій Leap Motion). Рис. 4 (б) ілюструє процес введення рукописного тексту — за допомогою миші, сенсорного екрану чи рукою. Рис. 4, (в) містить результати по вводу тексту за допомогою дактильної абетки (дактильні символи ідентифікуються за допомогою інформації з Leap Motion). Управління курсором за допомогою нахилів голови відображено на рис. 4 (г).

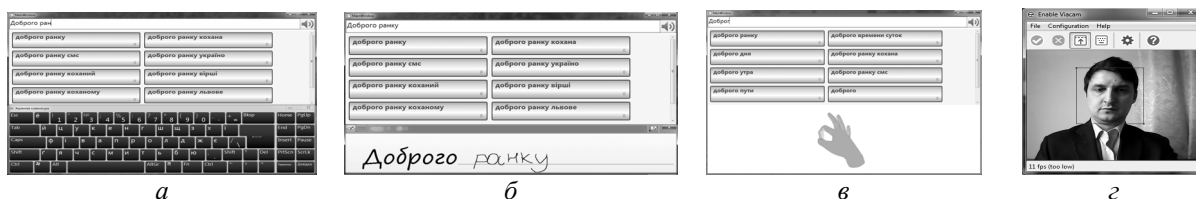


Рис. 4. Процес введення інформації та управління

Подальші дослідження направлені на вдосконалення запропонованої інформаційної технології та на аналіз параметрів моделей подання руки.

## Література

1. Wang R.Y. Real-Time Hand-Tracking with a Color Glove / R.Y. Wang, J. Popovic // ACM Transaction on Graphics (SIGGRAPH 2009). — 28(3), August 2009. — P. 63.

2. Yang H.-D. Sign Language Recognition with the Kinect Sensor Based on Conditional Random Fields / H.-D. Yang // Sensors. 2015. — № 15. — pp.135 — 147.
3. <https://www.leapmotion.com/> Leap Motion. Mac & PC Motion Controller for Games, Design, & More.
4. <http://eviacam.sourceforge.net/> Enable Viacam. Free webcam based mouse emulator.
5. <https://theyetribe.com/> Eye tracking, or gaze tracking, is a technology that consists in calculating the eye gaze point of a user as he or she looks around.

УДК 631.432:626.86

А.М. Стеценко, ст. викладач, Нац. ун-т вод. госп-ва та природокористування, s\_anastasia@ukr.net

## АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ВОЛОГІСТЮ ҐРУНТУ НА МЕЛІОРАТИВНИХ СИСТЕМАХ З ПІДҐРУНТОВИМ ЗВОЛОЖЕННЯМ НА БАЗІ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ

У роботі розроблено метод керування вологозабезпеченістю сільськогосподарських культур на осушувально-зволожувальних системах з підґрунтовим зволоженням та математична модель об'єкту керування на базі нейронних мереж.

*Ключові слова:* автоматизована система керування; нейронна мережа; нео-фаззі мережа; нео-фаззі нейрон; осушувально-зволожувальна система; модульна ділянка ґрунту.

В работе разработаны метод управления влагообеспеченностью сельскохозяйственных культур на осушительно-увлажнительных системах с подпочвенным увлажнением и математическая модель объекта управления на базе нейронных сетей.

*Ключевые слова:* автоматизированная система управления; нейронная сеть; нео-фаззи сеть; нео-фаззи нейрон; осушительно-увлажнительная система; модульный участок ґрунта.

In the paper the method for agricultural cultures' water well-being control in the drained-humidifying system with underground watering and mathematical model of control object on the base of neural networks are developed

*Keywords:* automated control system, neural network, neo-fuzzy network, neo-fuzzy neuron, drained-humidifying system, modular field of soil.

**Вступ.** Для отримання високих врожаїв сільськогосподарських культур необхідно їх забезпечити у достатній кількості водою, сонячною енергією та поживними речовинами на всіх фазах розвитку. Важливим параметром для росту рослин є водно-повітряний режим ґрунту, який на осушувально-зволожувальних системах (ОЗС) двосторонньої дії з підґрунтовим зволоженням регулюється шляхом зміни рівня ґрунтових вод (РГВ). У даній роботі поставлено задачу розробки математичної моделі ненасиченої зони модульної ділянки ґрунту, методу керування вологозабезпеченістю сільськогосподарських культур з врахуванням дії випадкових збурюючих факторів, технічного та програмного забезпечення.

**Математичне моделювання вологопереносу в ненасиченій зоні ґрунту та метод керування вологозабезпеченістю.** Структура автоматизованої системи керування (АСК) вологозабезпеченістю сільськогосподарських культур на ОЗС з підґрунтовим зволоженням є каскадною, де внутрішнім контуром є контур керування рівнем води у керуючому колодязі, а отже, і РГВ, а зовнішнім — контур керування вологістю ґрунту. Об'єктом керування (ОК) зовнішнього контуру є ненасичена зона ґрунту, в якій знаходиться коренева система рослин. На об'єкт здійснюють вплив стохастично змінні збурення: опади, температура, вітер, сонячна радіація. З метою оперативного врахування впливу збурень математичну модель ОК, а також метод визначення РГВ, який необхідно утримувати на модульній ділянці ОЗС протягом розрахункового

періоду для забезпечення заданого значення всмоктуючого тиску ґрунту, пропонується представити у вигляді нейронних мереж (НМ) виду:

$$W_{k+1}^h = NN(P_{k+1}, D_{k+1}, L_{k+1}, W_{k-1}^h, W_k^h), \quad (1)$$

$$L_{k+1}^h = NN(P_{k+1}, D_{k+1}, L_{k-1}, L_k, W_{k+1}^h), \quad (2)$$

де  $P$  — кількість опадів, мм;

$D$  — дефіцит вологості повітря, мбар;

$L$  — РГВ від світлової поверхні, м;

$W^h$  — всмоктуючий тиск у визначеному шарі ґрунту  $h$ , який зв'язаний з вологістю ґрунту за допомогою основної гідрофізичної характеристики, м вод. ст.;

$NN()$  — перетворення нейронної мережі;

$k$  — поточний крок.

Вибірки даних для навчання та тестування роботи НМ сформовані із дослідних даних двох суміжних років для ґрунтів суглинистого та супіщаного механічного складу Рівненської дослідної сільськогосподарської станції. Побудовані багат шарові НМ прямого поширення різної архітектури та гібридні *neo-fuzzy* мережі, які показали найкращі результати.

Таблиця 1

Результати роботи *neo-fuzzy* мереж для прогнозування всмоктуючого тиску ґрунту та визначення необхідного РГВ для Рівненської дослідної сільськогосподарської станції

Шар ґрунту, см	Кількість точок	СКВ, м вод. ст.		СКВ, м	
		навчання	тестування	навчання	тестування
$h=0...10$	173	0,8268	1,036	0,04751	0,05522
$h=10...20$		0,625	0,6956	0,05113	0,05895
$h=30...40$		0,3093	0,2819	0,05464	0,06625

Метод керування вологозабезпеченістю випробувано також на Обухівській ОЗС. Для навчання нейронних мереж сформовано базу даних за 2009 та 2010 роки у період з 1 квітня по 31 жовтня. Тестувальна вибірка даних сформована за період з 1 квітня по 31 жовтня 2011 року. Результати роботи розроблених *neo-fuzzy* мереж наведено у табл. 2.

Таблиця 2

Результати роботи *neo-fuzzy* мереж для прогнозування всмоктуючого тиску ґрунту та визначення необхідного РГВ для Обухівської ОЗС

Шар ґрунту, см	Кількість точок		СКВ, м вод. ст.		СКВ, м	
	навчання	тестування	навчання	тестування	навчання	тестування
$h=0...10$	428	214	0,05682	0,03125	0,02429	0,005832
$h=10...20$			0,03207	0,01649	0,01487	0,004278
$h=30...40$			0,01108	0,008316	0,01033	0,005748

Перевірка адекватності нейромоделей проведена за допомогою F-критерію Фішера.

**Технічна та програмна реалізація АСК.** Технічно АСК вологозабезпеченістю реалізовано на таких структурних одиницях: гідравлічний регулятор, оснащений мікропроцесорним блоком керування на основі двох мікроконтролерів фірми Microchip — PIC18F4620 і PIC16F690; вимірювальна станція, оснащена мікропроцесорним блоком на основі двох мікроконтролерів PIC16F690; автоматизоване робоче місце диспетчера ОЗС на базі ПК; переносний пульт керування оператора; блок дискретних силових виходів; блок контролю напруги на основі мікроконтролера PIC16F690; давачі технологічних параметрів. Програмне забезпечення для всіх вузлів системи керування розроблено мовою C++.

Висновок. Розроблена АСК вологозабезпеченістю дозволяє забезпечити оперативне керування всмоктуючим тиском ґрунту з врахуванням дії стохастичних збуджуючих факторів а, от-

же, отримання стабільних врожаїв сільськогосподарських культур. Розроблений метод керування вологозабезпеченістю є універсальним для будь-яких ОЗС з підґрунтовим зволоженням. Для застосування його на іншій ОЗС необхідно лише здійснити перенавчання нейромереж для налаштування їх на інший тип ґрунтів та погодних умов.

#### Література

1. Пастушенко В.Й. Принципи побудови інтелектуальної системи керування вологістю ґрунту при підґрунтовому зволоженні / В.Й. Пастушенко, А.М. Стеценко // Вісн. НУВГП. Збірник наукових праць. — Рівне, 2009, 187 — 194 с.

УДК 621.311.22:658.012.001.24

А.В. Ухина,  
В.С. Ситников, д-р. техн. наук, проф.,  
Одес. нац. политехн. ун-т, sitnvs@mail.ru

## УПРАВЛЕНИЕ ПЕРЕСТРОЙКОЙ ПОЛОСОВОЙ ЧАСТОТНО-ЗАВИСИМОЙ КОМПОНЕНТЫ ВТОРОГО ПОРЯДКА ДЛЯ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОЙ КОМПЬЮТЕРНОЙ СИСТЕМЫ

Проведено аналіз перебудови амплітудно-частотної характеристики частотно-залежної компоненти другого порядку спеціалізованої комп'ютерної системи, що застосовується на автономній мобільній платформі. Крім того, розглянуто питання стійкості компоненти при перебудові характеристики в процесі функціонування в залежності від навколишнього оточення.

*Ключові слова:* стійкість; цифровий смуговий фільтр; частотно-залежний компонент.

Проведен анализ перестройки амплитудно-частотной характеристики частотно-зависимой компоненты второго порядка специализированной компьютерной системы, применяемой на автономной мобильной платформе. Кроме того, рассмотрен вопрос устойчивости компоненты при перестройке характеристики в процессе функционирования в зависимости от окружающей обстановки.

*Ключевые слова:* устойчивость; цифровой полосой фильтр; частотно-зависимый компонент.

The analysis of the second order frequency-dependent components amplitude-frequency characteristics restructuring of a specialized computer system used for a autonomous mobile platform. In addition, stability is a characteristic component in the restructuring during operation.

*Keywords:* restructuring of the AFC; frequency-dependent components; specialized computer system; an autonomous mobile platform, stability characteristics in the restructuring .

Разработка и эксплуатации автономных мобильных платформ связана с задачей неопределенности условий функционирования, что приводит к необходимости перестройке характеристик. К таким автономным мобильным платформам можно отнести варианты беспилотных летательных аппаратов, наземных платформ, а также надводных и подводных аппаратов. В большинстве случаев это сложные специализированные компьютерные системы (СКС), которые имеют специфические цели и задачи, связанные с управлением движения, сбором, предварительной обработкой и передачей информации от датчиков, координации действий с центром.

Неопределенность условий функционирования таких автономных мобильных платформ приводит к задаче перестройки работы трактов обработки информации и доопределения каких-



либо параметров. Например, в квадрокоптерах имеются системы определения безопасной высоты, а у наземных платформ — устройства определения расстояния до препятствия и т.п.

Построение таких трактов в основ базируется на перестраиваемых полосовых частотно-зависимых компонентах, которые легко компоновать и перестраивать на однотипных последовательно соединенных компонентах второго порядка. Поэтому рассмотрим управление перестройкой параметров частотно-зависимого компонента (ЧЗК) СКС второго порядка обобщенного вида

$$H(z) = \frac{a_0 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2}}{1 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2}} \quad (1)$$

где  $a_0, a_1, a_2$  — действительные коэффициенты числителя;

$b_1, b_2$  — действительные коэффициенты знаменателя.

Например, для фильтрации отраженного сигнала на фоне помех в основном используются полосовые ЧЗК. Особенность такого компонента состоит в необходимости перестройки его центральной частоты  $\omega_0$ , а возможно и полосы пропускания  $\Delta$  в соответствии с частотой излучения передатчика.

Анализ полосовых ЧЗК такого обобщенного вида показал, что коэффициенты числителя имеют следующие соотношения

$$a_0 > 0, a_1 = 0, a_2 < 0, a_0 = -a_2.$$

Исследования показали, что при перестройке коэффициенты знаменателя  $b_1$  и числителя  $a_0$  зависят от коэффициента знаменателя  $b_2$ . Получены соотношения, которые позволяют выполнить управление характеристиками ЧЗК

$$\begin{cases} b_2 = \frac{1 - \sin(2\Delta\bar{w})}{\cos(2\Delta\bar{w})}; \\ b_1 = -\frac{\cos(\bar{w}_0)}{\cos(\Delta\bar{w})}(1 + b_2); \\ a_0 = \frac{1 - b_2}{2}. \end{cases}$$

Очень важным моментом при управлении характеристиками является вопрос обеспечения устойчивости элементарно компоненты. Устойчивость ЧЗК второго порядка описывается треугольником устойчивости в координатах коэффициентов знаменателя передаточной функции  $b_1$  и  $b_2$ . Для полосовых компонент треугольник устойчивости приведен на рис. 1. Кружочками показаны соответствующие нормированные центральные частоты, которые увеличиваются с низу в верх, изменяясь от 0 до 1.

Анализ устойчивости полосовых компонент второго порядка показал, что:

1. При уменьшении полосы пропускания  $\Delta$  коэффициент знаменателя  $b_2$  смещается в сторону увеличения до 1. При увеличении полосы пропускания  $\Delta$  коэффициент  $b_2$  стремится к 0. Поэтому при изменении полосы пропускания  $\Delta$  возможен выход на границу устойчивости или выход за область устойчивости компоненты.

2. При изменении разрядности представления коэффициентов знаменателя передаточной функции компоненты при исследовании устойчивости показали, что коэффициент знаменателя

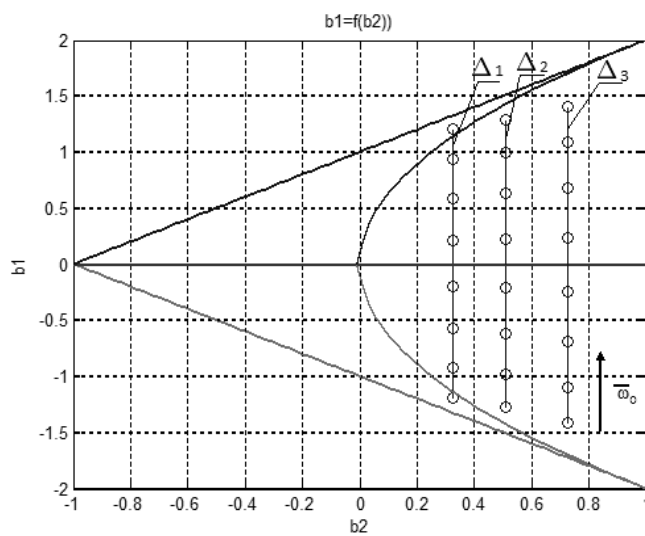


Рис. 1. Треугольник устойчивости для цифровых полосовых и режекторных компонент второго порядка, где полоса пропускания  $\Delta_1 > \Delta_2 > \Delta_3$

$b_1$  имеет больший разброс, чем коэффициент знаменателя  $b_2$ . Чем меньше величина коэффициента  $b_1$ , тем больше разброс, который может достигать 12 % относительной погрешности.

Таким образом, исследования управления характеристиками ЧЗК полосового типа позволило получить простые соотношения, которые можно реализовать на микропроцессорной технике, а анализ устойчивости критические области выхода за пределы устойчивости.

УДК 672.5:622.2

Д.В. Паньков, аспірант, Нац. ун.т харчових технологій, dimapankov@mail.ua

## КОМП'ЮТЕРНА КВАЛІМЕТРІЯ ПРИ УПРАВЛІННІ ТЕХНОЛОГІЧНИМ КОМПЛЕКСОМ ХЛІБОПЕКАРСЬКОГО ВИРОБНИЦТВА

Розглянуто принципи і методи оцінки якості хлібопекарського виробництва, представлена структурна схема комп'ютерної кваліметрії.

*Ключові слова:* якість продукції, комп'ютерна кваліметрія.

Рассмотрены принципы и методы оценки качества хлебопекарного производства, представлена структурная схема компьютерной кваліметрии.

*Ключевые слова:* качество продукции, компьютерная кваліметрия.

Principles and methods of assessing the quality of bakery production, shows the block diagram of computer quality control.

*Keywords:* product quality, computer qualimetry.

Метою розробки є підвищення ефективності управління технологічними процесами хлібопекарського виробництва на основі кваліметричних моделей. Якість хлібопекарської продукції або послуг - це певний перелік показників властивостей хлібопекарської продукції або послуги, завдяки яким вони здатні задовольняти необхідні потреби споживача при їх використанні. Оцінка якості хлібопекарської продукції в рамках розробленої системи управління технологічним комплексом хлібозаводу здійснюється на основі принципів та методів кваліметрії із застосуванням інтелектуальних механізмів динамічною експертною системою.

Розвиток інформаційних технологій сформував новий напрямок в кваліметрії-комп'ютерну кваліметрію.

Основними задачами, які розв'язувались при створенні експертної системи оцінки якості хлібопекарської продукції на основі принципів комп'ютерної кваліметрії є:

- створення методів визначення чисельних значень показників якості, обробка даних і визначення вимог, що забезпечують точність обчислень;
- обґрунтування обраного переліку показників якості продукції при розробці способів підвищення якості та запланованої стандартизації;
- створення методів визначення оптимальних значень показників якості продукції;
- визначення єдиних методів оцінки рівня якості продукції для можливості зіставлення результатів;

Для визначення якості продукції використано два незалежних один від одного поняття:

— Якість хлібу — властивості хлібу, що визначають її здатність задовольняти потреби, пов'язані з призначенням.

— Інтегральна якість хлібопекарської продукції — визначається сукупністю всіх властивостей (економічних, естетичних і функціональних) продукції.

Однією з актуальних проблем хлібопекарного виробництва є розробка оперативних, достатньо точних і недорогих методів оцінки якості сировини, напівфабрикатів і готової продукції, які дозволяють організувати ефективні системи управління технологічними і бізнес-процесами.

Розроблена певна сукупність методів контролю якості при виготовленні хлібу, які можна розбити на дві великі групи: органолептичні та інструментальні. Інструментальні методи, в свою чергу, можна розділити на лабораторні та експрес-методи.

Для того, щоб ефективно оперувати великими обсягами даних, отриманих у результаті застосування великої кількості перерахованих вище методів, необхідні спеціалізовані апаратно-програмні обчислювальні комплекси такі як експертні системи. При аналізі сумішей, якими є переважна більшість хлібопекарських продуктів, виникає необхідність враховувати багато параметрів, оперативна оцінка яких визиває певні труднощі. Тому одним із важливих завдань є розробка моделей і чисельних методів для порівняння та оцінки речовин по багатовимірним даними. Розроблені кваліметричні моделі, що зв'язують показники готовності сировини (борошно, дріжджі), опари, заквасок, тіста і готової продукції із режимними параметрами.

Невід'ємною частиною системи комп'ютерної кваліметрії є єдина база даних, в яку записується інформація, отримана за допомогою інструментального контролю та органолептичних досліджень. Індекс бази складають найменування речовин або продуктів, кожному з яких зіставлений паспорт результатів дослідження продукту різними методами. Це дозволяє порівнювати різні середовища по тим чи іншим характеристикам, виконувати візуалізацію параметрів середовища за допомогою діаграм, використовувати накопичені дані для порівняння досліджуваної середовища з еталонною.

Методика комп'ютерної кваліметрії дозволяє оперативно оцінити ступінь подібності досліджуваної речовини з еталоном. Структурна схема створеної системи комп'ютерної кваліметрії хлібопекарської продукції показана на рис. 1.

Дана система інтегрована у інформаційну вертикаль управління хлібопекарного заводу разом із MES-системою і АСУТП.

**Висновки.** Створена динамічна експертна система на основі концепції комп'ютерної кваліметрії при управлінні технологічним комплексом хлібопекарного виробництва, що заснована на використанні вже відомих інструментальних засобів, розробці спеціальних методів, датчиків і приладів для оперативного контролю різноманітних фізико-хімічних, оптичних, біологічних характеристик харчового середовища і на об'єднанні одержуваних інструментальних характеристик з органолептичними ознаками та іншими споживчими характеристиками, оцінюваними досвідченими експертами. Дана система інтегрована в АСУТП хлібопекарного заводу і забезпечує поліпшення якісних характеристик хлібобулочних виробів та зниження витрат ресурсів. Проводяться дослідження по розробці алгоритмів багатокритеріального управління організаційно-технологічними процесами хлібопекарського виробництва в умовах ситуаційної невизначеності та розв'язання ресурсних конфліктів.

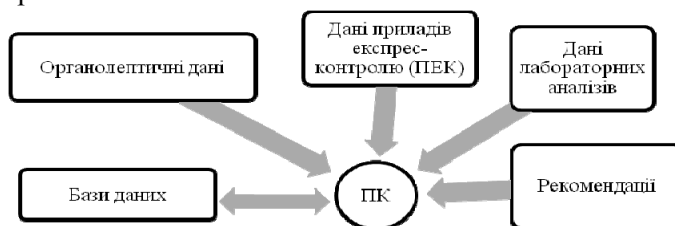


Рис. 1. Структурна схема системи комп'ютерної кваліметрії хлібопекарського виробництва

## Література

1. Фомин В.Н. Квалиметрия. Управление качеством. Сертификация / В.Н. Фомин. — М.: Ось-89, 2002. — 384 с.
2. Кантере В.М. Органолептический анализ пищевых продуктов: Монография / В.М. Кантере, В.А. Матисон, М.А. Фоменко и др. — М.: Издат. компл. МГУПП, 2001. — 151 с.
3. Краснов А.Е. Концепция «Технология компьютерной квалиметрии для управления качеством пищевых сред» / А.Е. Краснов, Ю.А. Тырсин. М.: МГТА, 2002 г.

УДК 621.9.01:004.8967

И.П. Хавина, канд. техн. наук, доц., Нац. техн. ун-т  
«ХПИ», softi@bk.ru

## МАС ОПТИМАЛЬНОГО ВЫБОРА ЗАГОТОВОК

У роботі на прикладі розв'язання задачі вибору оптимальної заготовки для технологічного процесу виготовлення виробу методом різання розроблена формалізація цілей агентів при різних умовах їх взаємодії. Створено прототип мультиагентної системи (МАС), яка за допомогою взаємодії агентів коаліції у вигляді аукціону обирає оптимальну заготовку, протестована інтеграція предметно-орієнтованих знань — онтологій та системи агентів.

*Ключові слова:* оптимальний технологічний процес; різання матеріалів; мультиагентна система; онтологія; аукціон.

В работе на примере решения задачи выбора оптимальной заготовки для технологического процесса изготовления изделия методом резания разработана формализация целей агентов при различных условиях их взаимодействия. Создан прототип мультиагентной системы (МАС) оптимального выбора заготовок с помощью аукционов при взаимодействии агентов коалиции, протестирована интеграция предметно-ориентированных знаний — онтологий и системы агентов.

*Ключевые слова:* оптимальный технологический процесс; резание материалов; мультиагентная система; онтология; аукцион.

The work on the solution of the problem of choosing the optimal blank process for manufacturing the product by cutting designed formalization of the goals of agents under different conditions of their interaction. The prototype of multi-agent systems (MAS) optimal selection of blanks via auctions in the interaction of the agents of the coalition, tested integration of domain-specific knowledge — ontology and system agents.

*Keywords:* optimal manufacturing process; cutting materials; multi-agent system; ontology; auction.

Производственные системы, основанные на технологических процессах (ТП) лезвийной обработки, характеризуются как сложные, слабоформализуемые системы из-за большого количества материальных и информационных связей, применения эмпирического опыта эксперта-технолога, наличия различных стандартов, технических и технологических ограничений, разнообразия применяемого инструмента, оборудования и приспособлений и изменяющихся во времени параметров процесса [1]. Современным подходом для создания систем управления такого производства являются мультиагентные системы (МАС), где каждый участник ТП реализуется в виде интеллектуального агента, обладающего соответствующими целями, полномочиями, исходными данными и знаниями, реализованными в виде онтологий [2, 3]. Технолог поэтапно выполняет выбор структуры ТП изготовления изделий с помощью лезвийной обработки: выбор заготовки, анализ структуры и характеристик изделия, определяет набор поверхностей детали и набор операций для их получения, выбор оборудования, инструмента, приспособлений для выполнения операций и смазочно-охлаждающей технологической среды [1]. Реализацию МАС рассмотрим на примере первого этап ТП — выбора заготовки для изделия шестерня коронная, который выполняется пошагово: сначала выбирается материал и способ изготовления заготовки. Затем определяются предварительные габаритные размеры заготовки с учетом припусков на операции. Далее на основании способа получения заготовки, коэффициента использования материала, стоимости заготовки и веса заготовки определяется экономическая эффективность каждого вида заготовок и затем определяется заготовка с максимальной экономической эффективностью. Подобный процесс реализуют агенты разработанной МАС для оптимального выбора заготовок заказа. Исходные данные, необходимые для работы агентов МАС представлены с помощью онтологии, которая содержит данные о размерах и конструкциях типовых деталей предприятия, данные о базовых ТП изготовления деталей и их особенностях, марках стали, сортамент заготовок и набор 3-d элементарных геометрических фигур, который позволяет учитывать геометрию детали и заготовки, и используется для получения списка обрабатываемых поверхностей [2].

Мультиагентная система оптимального выбора заготовки имеет следующую структуру  $MAS = \langle \{A_1, \dots, A_i\}, \{K_1, \dots, K_j\}, \{KB_1, \dots, KB_k\} \rangle$ , где  $\{A_1, \dots, A_i\}$  — множество агентов в МАС;  $\{K_1, \dots, K_j\}$  — множество возможных коалиций в МАС;  $\{KB_1, \dots, KB_k\}$  — базы знаний МАС.

Заказ на детали сформирован в виде множества в порядке приоритета изготовления  $\{Z_1, \dots, Z_j\}$ , где  $Z_j$  — количество заказанных деталей  $j$ -го вида. Коалицией считается временное объединение некоторого числа агентов для достижения общей цели, при этом их ресурсы становятся общими. Коалиция обеспечивает агентов возможностью договориться и составить совместный план действий по использованию общих ресурсов и средств для согласованного выполнения всех заказов.

Коалиция агентов в МАС имеет структуру  $K = \langle Name\{A_1, \dots, A_m\}, G, \{St_1, \dots, St_l\}, KB \rangle$ , где  $Name$  — имя коалиции;  $\{A_1, \dots, A_m\}$  — множество агентов, входящих в коалицию;  $G$  — цель коалиции;  $\{St_1, \dots, St_l\}$  — множество допустимых стратегий поведения коалиции;  $KB$  — база знаний коалиции. Целевая функция коалиции, сформированная для изготовления  $j$ -й детали, имеет вид  $G = \sum_{i \in I_j} d_{ij} f_{ij} \Rightarrow \min$ ,  $0 \leq d_{ij} \leq Z_j$ , где  $d_{ij}$  — количество заготовок, предлагаемых  $i$ -м агентом;  $f_{ij}$  — показатель экономической эффективности  $j$ -й заготовки;  $I_j$  — множество агентов, входящих в коалицию и предлагающих изготовление  $j$ -й заготовки.

Выполнение плана заказов  $PZ = \{PZ_1, \dots, PZ_m, \dots, PZ_r\}$  формируется коалициями  $\{K_1, \dots, K_m, \dots, K_q\}$  и их целями  $\{G_1, \dots, G_m, \dots, G_q\}$  и состоит из определенной приоритетом последовательности действий  $\{DK_1, \dots, DK_m, \dots, DK_p\}$ . Плану соответствует структура  $PZ_m = \langle \{DK_1, \dots, DK_m, \dots, DK_p\}, G_m, \{AD_1, \dots, AD_n\}, KB_m, \{ZK_1, \dots, ZK_m\} \rangle$ , где  $\{DK_1, \dots, DK_m, \dots, DK_p\}$  — действия плана;  $G_m$  — цель плана;  $\{AD_1, \dots, AD_n\}$  — множество агентов, осуществляющих план;  $\{ZK_1, \dots, ZK_m\}$  — отобранные заготовки.

Задача пошагового последовательного выбора заготовок заказа решается в виде взаимодействия подмножества агентов путем переговоров и включает агентов заказов  $A_{зак}$ , агентов выбора заготовок  $A_{в\ заг}$  и агентов заготовок  $A_{заг}$ , из которых формируются коалиции. Каждая коалиция создается для выбора одного вида детали из заказа. Переговоры в коалиции проходят в форме аукциона, за несколько раундов, до тех пор пока не будет получено заданное количество  $j$ -го типа заготовок. Также агенты заготовок отслеживают товарные запасы заготовок. Для создания онтологий применялся редактор Protégé. МАС выбора заготовок реализована с помощью приложения Jade. На примере решения задачи выбора оптимальной заготовки для технологического процесса изготовления изделий методом лезвийной обработки разработана формализация целей агентов при разных условиях их взаимодействия. Создан прототип МАС выбора заготовок с помощью аукционов при взаимодействии агентов коалиции, протестирована интеграция предметно-ориентированных знаний – онтологий и системы агентов.

## Литература

1. Дмитриенко В.Д. Моделирование технологических процессов лезвийной обработки методами искусственного интеллекта / В.Д. Дмитриенко, И.П. Хавина, В.Л. Хавин, Н.В. Вереzub. — Харьков: НТМТ, 2009. — 224 с.
2. Giovannini A. Ontology-based system for supporting manufacturing sustainability. / A. Giovannini, A. Aubry, H. Panetto // Annual Reviews in Control, International Federation of Automatic Control. — 2012. — Vol. 36 (2). — pp. 309 — 317.
3. Shoham Y. Multiagent system: algorithmic, game-theoretic and logical foundations / Y. Shoham, K. Leyton-Brown. — Cambridge University Press. — 2010. — 532 p.

УДК 004.934.8

М.В. Кузнецов, канд. техн. наук.,  
В.Л. Селетков, д-р техн. наук, проф.,  
kmv\_mail@ukr.net

## ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПО ПОРЯДКОВЫМ СТАТИСТИКАМ СПЕКТРОВ АНАЛИТИЧЕСКИХ РЕЧЕВЫХ СИГНАЛОВ

Представлений новий метод текстонезависимої статистичної ідентифікації людини за індивідуально особливостям порядкових статистик амплітудних спектрів мовних сигналів і по-лучаним експериментальним шляхом показники його ефективності. Для нормування мовні сиг-нали перетворюються в комплексні аналітичні сигнали з постійним значенням потужності.

*Ключові слова:* мовний сигнал, порядкові статистики амплітудних спектрів, біометрія, рас-пізнавання диктора, верифікація диктора, ідентифікація.

Представлен новий метод текстонезависимой статистической идентификации человека по индивидуальным особенностям порядковых статистик амплитудных спектров речевых сигналов и полученные экспериментальным путём показатели его эффективности. Для нормировки речевые сигналы преобразовываются в комплексные аналитические сигналы с постоянным значением мощности.

*Ключевые слова:* речевой сигнал, порядковые статистики амплитудных спектров, биометрия, рас-познавание диктора, верификация диктора, идентификация.

This paper presents a novel statistical technique of the text-independent speaker identification by individual features of the order statistics of the speech signal's amplitude spectra. In addition the values of the speaker identification against false alarm values are proposed, which have been derived experimentally. To fix the signal power, tested speech signals are transformed into complex analytical speech signals with the constant level of power.

*Keywords:* speech signal, order statistics of the amplitude spectra, biometry, speaker identification, speaker recognition.

*Вступлення.* Темпы развития информационных технологий и их интеграция во все сферы деятельности человека формируют значительный потребительский спрос на устройства распознавания речи, в том числе, автоматические системы идентификации человека по голосу. Однако характеристики таких систем еще требуют усовершенствования [1, 2]. По мнению ряда исследователей, для уменьшения вариативности и разброса спектральных оценок речевых признаков и дальнейшего повышения эффективности автоматической идентификации человека по голосу, перспективным является применение методов нормализации и нормировки оценок речевых признаков и извлечение робастных идентификационных признаков. Одним из таких методов является новый метод идентификации на основе порядковых статистик амплитудных спектров Фурье аналитических речевых сигналов с постоянным значением мощности сигналов, представленный в данной работе [1, 2, 3].

*Основная часть.* Формирование порядковых статистик значений текущих амплитудных спектров на каждой частоте спектра по всем сегментам анализа речевого сигнала позволяет получить статистический спектральный образ исследуемого речевого сигнала (рис. 1).

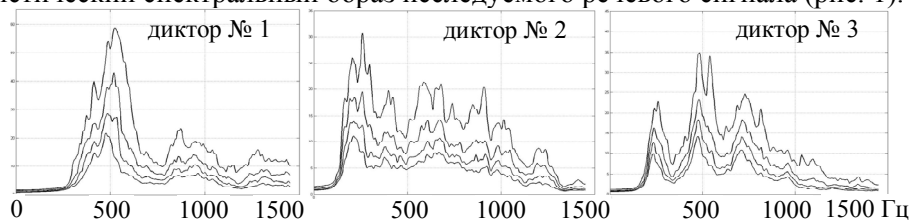


Рис. 1. Порядковые статистики амплитудных спектров речевых сигналов

Порядковые статистики амплитудных спектров речевых сигналов обладают свойствами, позволяющими успешно решать задачу статистической идентификации человека по индивидуальным особенностям спектров речевых сигналов. Закон распределения порядковых статистик

амплитудных спектров является асимптотически нормальным, по совокупности значений порядковых статистик можно восстановить функцию распределения в диапазоне 0,05-0,95, корреляционная матрица порядковых статистик постоянна и не зависит от вида начального распределения [3].

В представленном методе, для устранения влияния значительных вариаций амплитуд спектральных оценок речевых сигналов (амплитудных спектров, кепстров, гомоморфных функций) выполняется нормировка мощности сигналов. По последовательности отсчетов полной фазы исходного речевого сигнала формируется новый комплексный аналитический сигнал постоянной амплитуды, фазовая структура которого подобна фазовой структуре исходного сигнала. При этом средняя мощность (энергия) нового комплексного аналитического сигнала становится одинаковой по всем сегментам анализа.

Экспериментально получены показатели эффективности идентификации рассмотренного метода как зависимость правильной идентификации от ложной тревоги. В диапазоне значений ложной тревоги от 5 до 30 % значение правильной идентификации составляет от 93 до 98,5 % (для речевых сигналов с/ш около 30 дБ) и от 70 до 95 % (для речевых сигналов с/ш около 24 дБ). Представленные показатели получены для текстонезависимой идентификации дикторов по паталям (от 50 до 90 %) в полосе частот 50...800 Гц, на массиве естественных речевых сигналов без пауз,  $F_d$  8 кГц, АЦП 16 бит. При этом не применялась очистка сигналов от шумов и помех, не применялись алгоритмы повышения качества сигнала, нормализации сигнала на канал и разделения дикторов по полу, языку и возрасту [3].

#### *Выводы.*

1. Использование порядковых статистик позволяет перейти от анализа избыточной стохастической совокупности многолепестковых амплитудных спектров речевых сигналов к анализу асимптотически нормальных значений порядковых статистик амплитудных спектров.
2. Полученные экспериментальным путём показатели эффективности метода сопоставимы с существующими сегодня системами автоматической идентификации.
3. Методологию статистической идентификации нестационарных процессов по порядковым статистикам амплитудных спектров можно использовать при решении задач обработки других акустических сигналов (гидроакустических, сейсмических).

#### **Литература**

1. Распознавание личности по голосу: аналитический обзор [Электронный ресурс] / В.Н. Сорокин, В.В. Вьюгин, А.А. Тананыкин // Электронный научный журнал ИППИ РАН — 2012. — № 1, т. 12. — С. 1 — 30. — Режим доступа: <http://www.jip.ru/2012/1-30-2012.pdf>.
2. Матвеев Ю.Н. Технологии биометрической идентификации личности по голосу и другим модальностям / Ю.Н. Матвеев // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. сер. «Приборостроение». — 2012. — № 3(3). — С. 46 — 61.
3. Селетков В.Л. Вариант спектральной идентификации речевых сигналов / В.Л. Селетков // Изв. вузов. Радиоэлектроника. — 2006. — 49, № 3-4 [ч.2]. — С. 56 — 61.

УДК 681.5:004

Ю.М. Ковриго, канд. техн. наук, проф.,  
О.В. Степанець, канд. техн. наук, ст. викладач,  
О.С. Бунке, канд. техн. наук, ст. викладач,  
Нац. техн. ун-т України «КПІ»,  
stepanets.av@gmail.com

## УНІВЕРСАЛЬНА ПЛАТФОРМА РОЗРОБКИ НАВЧАЛЬНИХ СТЕНДІВ В ГАЛУЗІ АВТОМАТИЗАЦІЇ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ

Представлено програмно-апаратну платформу для розробки навчальних стендів з автоматизації технологічних процесів, яка відрізняється архітектурною гнучкістю й придатна для вирішення задач імітації реального об'єкта керування в дидактичних цілях

*Ключові слова:* навчальні стенди; навчання в автоматизації.

Представлена програмно-апаратная платформа для разработки учебных стендов по автоматизации технологических процессов, отличающаяся архитектурной гибкостью и приспособленная для решения задач имитации реального объекта управления в дидактических целях

*Ключевые слова:* учебные стенды; обучение в автоматизации.

Represented hardware and software platform for the development of educational stands for process automation, characterized by architectural flexibility and adapted to simulate real control object for didactic purposes

*Keywords:* educational stands; teaching in automation.

Практика, одночасно з теоретичними знаннями, є основою якісної підготовки інженерних кадрів. Кожний загальновідомий спеціалістам факт, кожне особисте рішення, кожна особистого ідея, досліджена і перевірена власноруч, відкладеться у пам'яті та стане фундаментом професійного росту та примножить у майбутньому знання людства в цілому.

Очевидно, що для такої практики необхідно мати потрібні інструменти — зрозумілі, наочні, гнучкі, ефективні. В автоматизації такими інструментами виступають навчальні стенди.

За роки розвитку галузі навчальні стенди пройшли великий еволюційний шлях слідом за обладнанням та об'єктами, які призначені представляти. Від простих демонстраційних плакатів та машин до складних імітаційних контурів, які відтворюють динаміку цілих промислових цехів. Однак разом з корисністю таких стендів вони мають і значний недолік: статичність та інерційність. Створені одного разу, їх дуже важко модернізувати та пристосовувати до нових задач, що виникають внаслідок розвитку як матеріально-технічної бази, так і методик навчання та очікувань промисловості.

Подолати ці недоліки можна, заклавши здатність до розвитку та модернізації в саму архітектуру стенду. Створення платформи-конструктора, що веде себе як об'єкт керування, потрібний для демонстрації певних особливостей систем автоматичного керування, та може бути модифікований залежно від поточної задачі, щоб якнайкраще донести до студентів важливу інформацію, є важливою дидактичною та науковою задачею.

На сьогодні навчальні лабораторії кафедр автоматизації укомплектовані як реальними чи псевдореальними об'єктами (наприклад, промислова піч імітується невеликою лабораторною), або побудовані на засадах SIL чи HIL-моделювання [1].

Пропонована платформа навчальних стендів представляє собою програмно-апаратний комплекс, побудований на поширених в середовищі автоматизації промислових технологіях, знайомих як викладачам, так і прикладним спеціалістам. Їх використання наскрізь від університетських лабораторій і лекторіїв до заводських об'єктів сприятиме прозорій безперервній практичній підготовці спеціалістів та захистить розробку від можливої стагнації через зникнення якоїсь унікальної технології чи комплектуючих. На квазіреальних прикладах, реалізованих за



допомогою платформи, отримані теоретичні знання пройдуть перевірку практикою, виконану самими студентами. Покращиться рівень залучення студентів в навчальний та науковий процес.

Апаратною основою платформи є комплекс з одноплатного комп'ютера Raspberry Pi та приєднаних до нього пристроїв зв'язку з об'єктом. На даному етапі розвитку ними виступає набір плат Arduino, що перетворюють командні сигнали до/від Raspberry Pi в електричні уніфіковані (0-10В, «сухий контакт» тощо). Залежно від закладеної програми призначення електричних портів може змінюватися відповідно до завдання. Сама ж програма, що імітує об'єкт керування або потрібні компоненти АСУТП, працює в середовищі виконання реального часу CoDeSys з періодом квантування до 10мс. Над ядром надбудовано програмний людино-машинний інтерфейс, що сприяє задачам дослідження, контролю та керування об'єктом, у тому числі за допомогою апостеріорного аналізу отриманих під час експериментів даних, що зберігаються у внутрішній базі даних. Ця надбудова реалізована на стандартних та поширених web-технологіях. Викладач та студенти мають різні рівні доступу до програмного забезпечення: студенти працюють з моделями, які сконфігуровані викладачем, а він має право їх створювати чи встановлювати унікальні вхідні дані. Експерименти проходять в режимі реального часу, що дозволяє студентам при звичаїтися до умов, які зустрічаються на практиці, та розвивають ілюзії сприйняття часу, набуті під час роботи з математичними комп'ютерними моделями.

Таким чином, викладачі дисциплін автоматизації отримують гнучкий інструмент, що дозволяє підвищити наочність та забезпечити потреби практичної частини таких дисциплін та курсів:

- теорія автоматичного керування — демонстрація поведінки елементарних динамічних ланок, законів керування, вплив квантування на цифрові системи керування, динаміка структур систем автоматичного керування;

- ідентифікація та моделювання — дослідження закладеної в платформу динаміки об'єкта керування, синтез моделей об'єкта;

- технічні засоби автоматизації — взаємодія контролерів та регуляторів з квазіреальним об'єктом керування, який відтворює динаміку технологічного процесу із заданою викладачем точністю;

- програмування контролерних засобів — може виступати як імітатор об'єкта керування для програмованого студентом ПЛК або, завдяки інструментарію CoDeSys, сам бути цим ПЛК;

- розробка SCADA — платформа імітуватиме як об'єкт керування для зовнішнього контролера, з яким взаємодіє система диспетчерського керування, так і ПЛК нижнього рівня за допомогою вбудованих реалізацій промислових протоколів та технологій Modbus-TCP, Profinet, EtherCAT, OPC і т.д.

Цей перелік можна розширювати та адаптувати до вимог певної галузі чи наповнення навчальної дисципліни.

**Висновки:** запропоновано метод реалізації сучасних інтерактивних навчальних стендів, що демонструють роботу об'єкта автоматизації та здатні взаємодіяти з промисловим обладнанням галузі автоматизації. Розглянуто архітектуру платформи розробки навчальних стендів та продемонстровано доцільність застосування сучасних інформаційних технологій реального часу. Показані можливі переваги від застосування рішення в навчальних лабораторіях кафедр автоматизації України, здатне малим коштом якісно підвищити рівень оснащення.

## Література

1. Model Based Design and HIL Simulations / T. Kelemenova, M. Kelemen, L. Mikova, V. Maxim, E. Prada, T. Liptak, F. Menda // American Journal of Mechanical Engineering — 2013. — Vol. 1, №. 7. — P. 276 — 281.

УДК 004.82

**В.С. Кавицкая**, аспирант,  
**В.В. Любченко**, д-р. техн. наук, проф.,  
Одес. нац. политехн. ун-т

## ОСНОВНЫЕ ИНСТРУМЕНТЫ ДЛЯ АНАЛИЗА BIG DATA

Розглядаються проблеми аналізу великих даних. Пропонується аналіз основних інструментів для аналізу великих даних. Визначаються переваги і недоліки основних інструментів.

*Ключові слова:* аналіз великих даних; інструменти аналізу великих даних; великі дані.

Рассматриваются проблемы анализа больших данных. Предлагается анализ основных инструментов для анализа больших данных. Определяются основные достоинства и недостатки инструментов.

*Ключевые слова:* анализ больших данных; инструменты анализа больших данных; большие данные.

The problems of analyzing big data are considered. Analysis of the main tools for analysis of big data is offered. The main strengths and weaknesses of the tools are identified.

*Keywords:* analysis of big data; big data analysis tools; big data.

Все больше организаций испытывают те или иные сложности при развитии проектов, связанных с большими данными (Big Data), а именно [1]:

- недостаток инфраструктурных мощностей;
- организационные сложности по внедрению новых подходов и сбору данных;
- обеспечение безопасности и соответствия стандартам;
- нехватка ресурсов.

Самой критичной проблемой является недостаток инфраструктурных мощностей, так как каждый инструмент обладает существенным рядом как достоинств так и недостатков для анализа Big Data. Предлагается анализ основных инструментов.

Рассмотрим основные инструменты для анализа Big Data, такие как:

- **Hadoop MapReduce** — открытая реализация на Java для Apache Hadoop.
- Реализации для NoSQL баз данных на примере **MongoDB**.
- Apache Spark — платформа для обработки больших данных.
- Онтологический подход.

Hadoop MapReduce — программная модель (framework) выполнения распределенных вычислений для больших объемов данных в рамках парадигмы map/reduce, представляющая собой набор Java-классов и исполняемых утилит для создания и обработки заданий на параллельную обработку [2].

Основные концепции Hadoop MapReduce можно сформулировать как:

- обработка/вычисление больших объемов данных;
- масштабируемость;
- автоматическое распараллеливание заданий; для анализа Big Data;
- применение MapReduce по производительности менее эффективно, чем специализированные решения;
- эффективность применение MapReduce снижается при малом количестве машин в кластере;
- невозможно предсказать окончание стадии map;
- этап свертки не начинается до окончания стадии map.

MongoDB — это база данных документов с открытым исходным кодом, и ведущая база данных NoSQL. **Рассмотрим основные концепции MongoDB.**

- использование гибкой структуры данных;
- масштабируемость;
- размещение как на локальном оборудовании, так и в облаке;
- применение свойства ACID (atomicity, consistency, isolation, durability; атомарность, согласованность, изолированность, долговечность) на уровне документа.

**MongoDB** обладает следующими недостатками для анализа Big Data:

- неэффективная обработка больших объемов данных;
- низкая производительность при выполнении запросов map-reduce;
- низкая аналитическая мощность — необходима интеграция MongoDB и Hadoop.

Apache Spark использует модель для организации распределенных вычислений, основанную на понятии устойчивой к сбоям распределенной коллекции данных (RDD). Apache Spark обладает следующими преимуществами [3]:

- повышение отказоустойчивости и повышение скорости обработки информации в сравнении с MapReduce;
- эффективное выполнение итеративных алгоритмов за счет поддержки кэширования результатов в памяти.
- расширение технологий Hadoop его применения.

Необходимо отметить, что наличие огромного объема сырых данных еще не гарантирует высокие аналитические способности применяемых инструментов, так как при принятии решений необходимо еще строить гипотезы и теории, в соответствии с которыми могут развиваться события, т.е. сырые данные неразрывно должны рассматриваться с предметной областью. Вышеперечисленные инструменты не обладают данным свойством, с чем отлично справляется онтологический подход.

Онтология обладает следующими концепциями [4]:

- Систематичность — онтология представляет целостный взгляд на предметную область.
- Единообразность — материал, представленный в единой форме гораздо лучше воспринимается и воспроизводится.
- Научность — построение онтологии позволяет восстановить недостающие логические связи во всей их полноте.

Основными преимуществами применения онтологического подхода для анализа Big Data можно выделить:

- предоставление системного подхода в конкретной предметной области;
- четкое структурирование информации в конкретной предметной области;
- повышение эффективности информационного поиска за счет уменьшения времени обработки запроса;
- нахождение, определение и восстановление отсутствующих или скрытых логических связей.

Таким образом, были рассмотрены основные инструменты для анализа Big Data. Из проведенного анализа следует, что задачи, решаемые с помощью Hadoop MapReduce, должны отвечать одному основному требованию — они должны относиться к задачам, параллельным по данным. Реализации для NoSQL баз данных обладают низкой аналитической мощностью. Apache Spark является хорошим инструментом для анализа Big Data, однако он не учитывает все особенности предметной области. Применение онтологии для анализа позволяет решить проблему четкого структурирования и систематизации данных в конкретной предметной области, тем самым повышая эффективность выполнения запросов, своевременного предоставления информации при анализе Big Data.

## Литература

1. Pettey C. Gartner Says Solving 'Big Data' Challenge Involves More Than Just Managing Volumes of Data / C. Pettey, L. Goasduff // Gartner, 2011. — P. 11 — 21.
2. White, T. Hadoop: The Definitive Guide / T. White // O'Reilly Media, Inc, 2012. — P. 657.
3. Cluster Computing with Working Sets / M. Zaharia, M. Chowdhury, M. Franklin and other // HotCloud, 2010. — P. 1 — 7.
4. Gavrilova, T. Practical Design Of Business Enterprise Ontologies / T. Gavrilova, D. Laird // In Industrial Applications of Semantic Web. — Springer, 2005. — P. 61 — 81.

## ПЛЕНАРНІ ДОПОВІДІ

УДК 621.391

В.В. Волосов, д-р техн. наук,  
В.М. Кунцевич, д-р техн. наук,  
Инст. космич. исслед. НАНУ-ГКАУВОССТАНОВЛЕНИЕ ВЕКТОРА СОСТОЯНИЯ  
ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПРИ ЕГО НЕПОЛНЫХ  
ИЗМЕРЕНИЯХ С ОГРАНИЧЕННЫМИ ПОМЕХАМИ

Запропоновані робастні алгоритми гарантованого оцінювання вектора стану нелінійних динамічних систем, засновані на використанні методів багатогранників та еліпсоїдів.

*Ключові слова:* динамічна система; нелінійність; невизначеність; завади вимірювання; вектор стану; робастні методи еліпсоїдального оцінювання.

Предложены робастные алгоритмы гарантированного оценивания вектора состояния нелинейных динамических систем, основанные на использовании методов многогранников и эллипсоидов.

*Ключевые слова:* динамическая система; нелинейность; неопределенность; помехи измерения; вектор состояния; робастные методы эллипсоидального оценивания.

Robust algorithms of guaranteed estimation of the state vector of nonlinear dynamical systems based on the use of the methods of ellipsoids and polyhedrals, are proposed.

*Keywords:* dynamic system; non-linearity; uncertainty; measurements noises; the state vector; robust methods of ellipsoidal estimation.

Для оценки вектора состояния линейных динамических систем при измерениях с ограниченными помехами в настоящее время развиты методы получения эллипсоидальных оценок. Сложнее обстоит дело с определением оценок вектора состояния нелинейных систем.

Задано уравнение семейства дискретных управляемых систем

$$X_{n+1} = AX_n + BU_n, \quad n = 0, 1, 2, \dots, \quad (1)$$

где  $X_n \in \mathbf{R}^m$ ,  $X_n = (x_{1,n}, x_{2,n}, \dots, x_{m,n})^T$  — вектор фазового состояния;

$U_n \in \mathbf{R}^k$  — вектор управления;

$A$  —  $m \times m$ -матрица, для которой задана ее оценка

$$A \in \mathbf{A} = \mathbf{A}_1 \times \mathbf{A}_2 \times \dots \times \mathbf{A}_m. \quad (2)$$

где  $\mathbf{A}_i$  — заданное выпуклое множество;

$B$  — заданная  $m \times k$ -матрица.

Примем, что для вектора  $X_n$  задана его эллипсоидальная оценка

$$X_n \in \mathbf{E}_n = E[\hat{X}_n, H_n] = \{X_n \in \mathbf{R}^m : \theta(X, \hat{X}_n, H_n) \leq 1\}, \quad (3)$$

где  $\theta(\cdot) = (X - \hat{X}_n)^T H_n^{-1} (X - \hat{X}_n)$ ,

$\hat{X}_n$  — центр эллипсоида, матрица  $H_n^T = H_n > 0$ .

Задано уравнение измерения

$$y_n = h^T X_n + z_n, \quad n = 0, 1, 2, \dots, \quad (4)$$

где  $y_n$  — скалярный измеряемый выход системы,

$h$  — известный вектор,  $\|h\| \neq 0$ ,

$z_n$  — ограниченная погрешность измерения, априорно заданной интенсивности  $\Delta$

$$z_n \in \mathbf{z} = \{z : |z| \leq \Delta\}. \quad (5)$$

Ставится задача: по оценке вектора  $X_{n+1}$ , полученной в результате измерений  $y_{n+1}$

$$X_{n+1} \in \mathbf{S}_{n+1} = \{X \in \mathbf{R}^m : |h^T X - y_{n+1}| \leq \Delta\} \quad (6)$$

и прогнозной оценке  $X_{n+1} \in \overline{\mathbf{X}}_{n+1}$

$$\overline{\mathbf{X}}_{n+1} = \bigcup (AX_n + BU_n) \text{ при } X_n \in \mathbf{E}_n, A \in \mathbf{A} \quad (7)$$

определить гарантированную апостериорную оценку  $X_{n+1} \in \mathbf{X}_{n+1} = \overline{\mathbf{X}}_{n+1} \cap \mathbf{S}_{n+1}$ .

Точное определение множества  $\mathbf{X}_{n+1}$  связано с большим объемом вычислений. Поэтому, поставим задачу определения оценки  $\mathbf{X}_{n+1}$  сверху в классе эллипсоидальных множеств. Для этого введем в рассмотрение интервальные множества

$$\overline{\mathbf{x}}_{i,n+1} = \{x_i : \underline{x}_{i,n+1} \leq x_i \leq \overline{x}_{i,n+1}\}, \quad i = \overline{1, m}, \quad (8)$$

$$\underline{x}_{i,n+1} = \underline{v}_{i,n+1} + B_i^T U_n; \quad \overline{x}_{i,n+1} = \overline{v}_{i,n+1} + B_i^T U_n; \quad i = \overline{1, m}; \quad B_i^T \text{ — } i\text{-ая строка матрицы } B, \quad (9)$$

$$\underline{v}_{i,n+1} = \min \{A_i^T X_n\}, \quad \overline{v}_{i,n+1} = \max \{A_i^T X_n\}, \quad X_n \in \mathbf{E}_n, A_i \in \mathbf{A}_i, i = \overline{1, m}. \quad (10)$$

**Утверждение.** Множество  $\overline{\mathbf{X}}'_{n+1} = \overline{\mathbf{x}}_{1,n+1} \times \dots \times \overline{\mathbf{x}}_{m,n+1}$  — интервальная оценка сверху минимального объема множества прогнозных оценок  $\mathbf{X}_{n+1}$ .

При использовании вместо прогнозного множества  $\overline{\mathbf{X}}_{n+1}$  его оценки сверху  $\overline{\mathbf{X}}'_{n+1} = \{X_{n+1} : x_{i,n+1} \in \overline{\mathbf{x}}_{i,n+1}, i = \overline{1, m}\}$  операция пересечения  $\overline{\mathbf{X}}_{n+1} \cap \mathbf{S}_{n+1}$  заменяется операцией пересечения множеств  $\overline{\mathbf{X}}'_{n+1} \cap \mathbf{S}_{n+1}$ , в результате выполнения которой по априорной оценке  $X_n \in \mathbf{X}_n = \mathbf{E}_n$  получаем апостериорную оценку  $X_{n+1} \in \overline{\mathbf{X}}'_{n+1} \cap \mathbf{S}_{n+1}$ . Громоздкость выполнения операции пересечения  $\overline{\mathbf{X}}'_{n+1} \cap \mathbf{S}_{n+1}$  и последующая аппроксимация полученного «неудобного» множества делает целесообразным использование эллипсоидальных аппроксимаций сверху интервального множества  $\overline{\mathbf{X}}'_{n+1}$ . При этом определен эллипсоид минимального объема  $\tilde{\mathbf{E}}_{n+1} \supset \overline{\mathbf{X}}'_{n+1}$ , аппроксимирующий интервальное множество  $\overline{\mathbf{X}}'_{n+1}$ .

Алгоритмам построения эллипсоидов  $\mathbf{E}_{n+1} \supset \tilde{\mathbf{E}}_{n+1} \cap \mathbf{S}_{n+1}$ , оптимальных по критериям объема, следа матрицы и т.д., посвящено значительное количество работ. Для векторов состояния систем (1) при выполнении априорного предположения  $X_n \in \mathbf{E}_n$  гарантированно выполняются включения  $X_{n+1} \in \mathbf{E}_{n+1} = E[\hat{X}_{n+1}, H_{n+1}]$ . Не вдаваясь в подробности, заметим, что общая структура получаемых при этом алгоритмов оценивания имеет вид

$$\hat{X}_{n+1} = \psi(\tilde{X}_{n+1}, \tilde{H}_{n+1}, y_{n+1}, \Delta, p, q), \quad H_{n+1} = \Psi(\tilde{X}_{n+1}, \tilde{H}_n, y_{n+1}, \Delta, p, q), \quad (11)$$

где  $p$  и  $q$  — векторы параметров алгоритмов. Функции  $\psi(\cdot)$  и  $\Psi(\cdot)$  определяются конкретным алгоритмом оценивания.

Практика применения алгоритмов (11) выявила ряд их недостатков. Пересечение  $\tilde{\mathbf{E}}_{n+1} \cap \mathbf{S}_{n+1}$  в силу вычислительных погрешностей или сбоя в измерениях, в результате которого при некоторых  $n$  нарушается априорное предположение (5) может оказаться пустым множеством. Для устранения этих недостатков были предложены робастные методы эллипсоидально-

го оценивания вектора состояния. Общая схема получения робастных методов эллипсоидального оценивания вида (11) достаточно простая и описана в ряде работ.

Задано уравнение семейства управляемых нелинейных систем

$$X_{n+1} = F(X_n, L) + BU_n, \quad (12)$$

где  $F(X_n, L)$  — нелинейная вектор-функция  $X_n$ , линейно зависящая от вектора параметров  $L$ , такая, что при  $X_n = 0$   $F(0, L) = 0$ .

Для вектора  $X_n$  задана его оценка вида (3), а уравнение измерений имеет вид (4). Требуется решить задачу: по оценкам (5), (6) и прогнозной оценке  $X_{n+1} \in \bar{X}_{n+1} = \cup F(X_n, L) + BU_n$ , где  $X_n \in E_n$ ,  $L \in L$  определить гарантированную апостериорную оценку  $X_{n+1} \in X_{n+1} = \bar{X}_{n+1} \cap S_{n+1}$ .

Так же, как и выше, аппроксимируем множество  $\bar{X}_{n+1}$  интервальным множеством минимального объема, воспользовавшись методом, схема которого описана выше.

УДК 681.5.013

Е.Е. Александров, д-р техн. наук, проф.  
Т.Е. Александрова, канд. техн. наук, доц.,  
Нац. техн. ун-т «ХПИ»

## АВТОМАТИЗАЦИЯ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ ОБЪЕКТОВ БРО- НЕТАНКОВОЙ ТЕХНИКИ

Розглядається сучасний стан і перспективи розвитку систем автоматизації сучасних вітчизняних об'єктів бронетанкової техніки, зокрема, систем автоматичного керування двигуном внутрішнього згоряння, трансмісією, основним і допоміжним озброєнням, а також систем керування взаємодією.

*Ключові слова:* об'єкт бронетанкової техніки; система автоматичного керування; система наведення і стабілізації; танкова навігаційна система.

Рассматривается современное состояние и перспективы развития систем автоматизации современных отечественных объектов бронетанковой техники, в частности, систем автоматического управления двигателем внутреннего сгорания, трансмиссией, основным и вспомогательным вооружением, а также систем управления взаимодействием.

*Ключевые слова:* объект бронетанковой техники; система автоматического управления; система наведения и стабилизации; танковая навигационная система.

The modern state and prospects of development of automation systems of modern domestic armored technics objects, in particular, automatic control systems of internal combustion engine, transmission, main and auxiliary armament, and control systems interactions.

*Keywords:* armored technics object; automatic control system; the system of guidance and stabilization; tank navigation system.

Целью настоящей работы является аналитический обзор современного состояния и перспектив развития систем автоматизации современных отечественных объектов бронетанковой техники.

Создание танка Т-34 и его модернизаций вывели Украину в лидеры мирового танкостроения. Украинские танки послевоенного периода, а также периода независимости еще более укрепили лидерские позиции Украины в этой области. Вместе с тем, многочисленные демонстрации украинских танков на выставках и салонах вооружений и военной техники показывают не только их высокую эффективность, но и некоторые недостатки. Для повышения тактико-технических характеристик отечественных танков необходимо решить следующие задачи:

— разработать систему автоматического управления воздухоподачей танкового дизеля серии БТД, что позволит уменьшить дымность отработанных газов;

— разработать автоматизированную гидрообъемную трансмиссию танка, выполненную по бортовой схеме и осуществляющую функции как трансмиссии, так и бесступенчатого механизма поворота;

— разработать танковую навигационную аппаратуру, включающую в свой состав бортовую цифровую вычислительную машину и выполненную по комплексированной схеме, т.е. объединяющую функции автономной и спутниковой навигационных систем;

— разработать цифровую высокоточную систему наведения и стабилизации танковой пушки, обладающую свойством инвариантности к действию внешних возмущений и свойством робастности к случайному изменению характеристик как объекта стабилизации, так и собственно стабилизатора;

— исследовать возможность использования в стабилизаторе танковой пушки принципов построения систем с переменной структурой, обладающих целым рядом преимуществ в сравнении с серийными линейными стабилизаторами;

— исследовать возможность использования в стабилизаторе танковой пушки принципов бесплатформенных инерциальных систем, с целью отказа от дорогостоящей гиростабилизированной платформы, обладающей слабой помехозащищенностью;

— учитывая широкие возможности современной вычислительной техники и программных продуктов, разработать инженерную методику структурно-параметрического синтеза сложных технических объектов, каковыми являются системы и агрегаты современных объектов бронетанковой техники.

Для решения сформулированных задач в работе разработаны математические модели возмущенного движения отдельных агрегатов и систем объектов бронетанковой техники, наиболее полно учитывающие динамические особенности объектов управления. С использованием специальных исследовательских стендов произведена идентификация разработанных математических моделей, что позволяет повысить уровень их адекватности реальным объектам. Сформулированы требования к системам автоматического управления системами и агрегатами объектов бронетанковой техники с их последующей формализацией и представлением в виде требований минимумов системы интегральных квадратичных функционалов. Разработаны имитационные модели случайных внешних возмущений, действующих на танковые системы и агрегаты, а также методика параметрического синтеза систем автоматического управления агрегатами, находящимися под действием случайных внешних возмущений, с учетом целенаправленного выбора весовых коэффициентов аддитивного критерия оптимальности. В работе получены решения сформулированных задач, на основе которых созданы опытные образцы систем автоматического управления системами и агрегатами современных танков, что позволяет сделать следующие выводы:

— для уменьшения дымности отработанных газов в танковый дизель 6 ТД целесообразно ввести систему автоматического управления наддувом, разработанную специалистами Харьковского конструкторского бюро двигателестроения, Российским научно-исследовательским институтом автоматики и гидравлики и НТУ «ХПИ»;

— для повышения маневренности и управляемости танка целесообразно использовать автоматизированную двухпоточную гидрообъемномеханическую трансмиссию, разработанную специалистами Харьковского конструкторского бюро по машиностроению им. А.А. Морозова и НТУ «ХПИ» [1];

— для повышения уровня взаимодействия объектов бронетанковой техники целесообразно использование комплексированной танковой танковой навигационной аппаратуры, разработанной специалистами Львовского научно-исследовательского радиотехнического института (ЛНИРТИ) и НТУ «ХПИ»;

— для повышения точности стрельбы из танка, движущегося в сложных дорожных условиях, необходимо использование цифрового стабилизатора лазерного луча танкового прицельно-дальномера индикаторного типа с цифровыми низкочастотными фильтрами Баттеруорта и

Ланцоша, а также цифрового стабилизатора оси канала ствола танковой пушки относительно линии прицеливания, составляющих агрегаты цифровой танковой информационно-управляющей системы, разработанной специалистами ЛНИРТИ и НТУ «ХПИ» [1, 2]. Использование в серийном производстве бронетанковой техники созданных опытных образцов цифровых систем автоматического управления системами и агрегатами современных танков позволит Украине сохранить мировое лидерство в области танкостроения.

#### Литература

1. Борисюк М.Д. Стохастическая оценка плавности хода многоопорного транспортного средства / М.Д. Борисюк, Т.Е. Александрова, А.С. Мазманишвили // Доповіді НАН України. — 2013. — № 6. — С. 52 — 59.
2. Александров С.С.. Автоматизоване проектування танкових автоматичних систем: Навчальний посібник / С.С. Александров, Т.С.Александрова, В.М. Гриценко и др. — 2003. — 137 с.
3. Александров Е.Е. Математическое моделирование, системный анализ и синтез динамических систем: Учебное пособие / Е.Е. Александров, Т.Е. Александрова. — 2014. — 200 с.

УДК 517.977

А.А. Чикрий, д-р физ.-мат. наук, проф., Ин-т кибернетики НАН Украины, Киев

## ЭКСТРЕМАЛЬНЫЕ СЕЛЕКТОРЫ МНОГОЗНАЧНЫХ ОТОБРАЖЕНИЙ В ИГРОВЫХ ЗАДАЧАХ СБЛИЖЕНИЯ ТРАЕКТОРИЙ ДВИЖУЩИХСЯ ОБЪЕКТОВ

Розглядається конфліктно-керований процес з циліндровим термінальним безліччю. Для такої ігрової задачі розвинена техніка матричних дозвільних функцій, що істотно розширюють можливості методу. Розроблена методика покриває в єдиній схемі процеси, які описуються звичайними диференціальними, інтегральними, інтегро-диференціальними, диференційно-різницевиими рівняннями з дробовими похідними і імпульсними системами.

*Ключові слова:* ігрові завдання; селектори багатозначних відображень; екстремальне прицілювання.

Рассматривается конфликтно-управляемый процесс с цилиндрическим терминальным множеством. Для такой игровой задачи развита техника матричных разрешающих функций, что существенно расширяет возможности метода. Разработанная методика покрывает в единой схеме процессы, которые описываются обыкновенными дифференциальными, интегральными, интегро-дифференциальными, дифференциально-разностными уравнениями с дробовыми производными и импульсными системами.

*Ключевые слова:* игровые задачи; селекторы многозначных отображений; экстремальное прицеливание.

We consider a conflict-controlled process with a cylindrical terminal set. For such a game problem, the technique of matrix resolving functions that significantly extend the capabilities of the method. The technique developed in the same scheme covers the processes that are described by ordinary differential, integral, integral-differential, differential-difference equations with derivatives and the shot pulse systems.

*Keywords:* game problems; selections of multivalued mappings; extreme aiming.

Рассматривается конфликтно-управляемый процесс с цилиндрическим терминальным множеством. Предполагается, что в описании траектории процесса влияние начальных данных отделено от влияния управляющих воздействий. Для такой игровой задачи развита техника разрешающих функций с использованием свойств отображений и обратных функционалов Минковского, позволившая в итоге получить условия завершения игры за некоторое гарантированное время в классе квази- и стробоскопических стратегий. При этом, если ранее применялись скалярные разрешающие функции, то в данном случае используются матричные, позво-



ляющие не только притягивать множество к началу координат в конусе, на него натянутом, но и осуществлять поворот множества на любой угол, что существенно расширяет возможности метода. Даны рекомендации по выбору экстремальных селекторов многозначных отображений, связанных с игровой задачей.

Наряду с предыдущей методикой к исследованию упомянутых конфликтно-управляемых процессов применяется техника, использующая идеи правила экстремального прицеливания Н.Н. Красовского. Получены условия окончания игры не позже, чем за время первого поглощения, используя технику многозначных отображений и аппарат опорных функций.

Дано сравнение гарантированных времен развитых подходов, а также установлена их связь с первым прямым методом Л.С. Понтрягина.

Разработанная методика покрывает в единой схеме процессы, которые описываются обыкновенными дифференциальными, интегральными, интегро-дифференциальными, дифференциально-разностными уравнениями с дробовыми производными и импульсные системы

Результаты иллюстрируются на модельных примерах.

УДК 681.5

Л.С. Житецкий, канд. техн. наук, МНУЦ ИТиС  
НАН Украины и МОН Украины

## РОБАСТНОЕ УПРАВЛЕНИЕ НЕКОТОРЫМИ КЛАССАМИ НЕЛИНЕЙНЫХ ОБЪЕКТОВ В СИСТЕМАХ С ЛИНЕЙНЫМИ ОБРАТНЫМИ СВЯЗЯМИ

Розглядаються задачі побудови лінійних робастних неадаптивних й адаптивних регуляторів для керування деякими класами нелінійних статичних і динамічних об'єктів з непараметричними невизначеностями.

*Ключові слова:* нелінійний об'єкт; лінійний зворотний зв'язок; робастність; адаптивний регулятор.

Рассматриваются задачи построения линейных робастных неадаптивных и адаптивных регуляторов для управления некоторыми классами нелинейных статических и динамических объектов с непараметрическими неопределенностями.

*Ключевые слова:* нелинейный объект; линейная обратная связь; робастность; адаптивный регулятор.

The problems of designing the linear robust non-adaptive and adaptive controllers for controlling some classes of the nonlinear static and dynamic plants with nonparametric uncertainties are considered.

*Keywords:* nonlinear plant; linear feedback; robustness; adaptive controller.

Проблема синтеза робастных неадаптивных и адаптивных регуляторов для управления объектами с неопределенностями до сих пор продолжает привлекать пристальное внимание исследователей [1 — 4]. В последнее время в ней выделилось направление, связанное с разработкой методов робастного управления нелинейными неопределенными объектами по линейным моделям, восходящих в идейном плане к монографии [5]. Некоторые гарантированные результаты в этом направлении получены в работах [6, 7]. В докладе обобщаются и развиваются исследования, начатые в этих работах.

Рассматриваются два класса стационарных нелинейных объектов с измеряемым выходом  $y \in \mathbf{R}^m$ , управлением  $u \in \mathbf{R}^r$  и неизмеряемым аддитивным возмущением  $v \in \mathbf{R}^m$ , функционирующих в дискретном времени  $n = 0, 1, 2, \dots$  и допускающих описание уравнением

$$y_n = \Phi(y_{n-1}, \dots, y_{n-N}, u_{n-1}) + v_n, \quad (1)$$

где  $\Phi: \underbrace{\mathbf{R}^m \times \dots \times \mathbf{R}^m}_N \times \mathbf{R}^r \rightarrow \mathbf{R}^m$  — априори неизвестный нелинейный оператор ( $r \leq m$ ).

Эти классы включают класс нелинейных многомерных статических объектов, когда  $\Phi(y_{n-1}, \dots, y_{n-N}, u_{n-1}) \equiv \varphi(u_{n-1})$  (класс NMSP), и класс нелинейных одномерных динамических объектов, когда  $\Phi(y_{n-1}, \dots, y_{n-N}, u_{n-1}) \equiv f(y_{n-1}, \dots, y_{n-N}) + bu_{n-1}$  (класс NSDP), где  $\varphi: \mathbf{R}^r \rightarrow \mathbf{R}^m$  и  $f: \mathbf{R}^N \rightarrow \mathbf{R}$  — неизвестные нелинейные операторы, удовлетворяющие определенным ограничениям, которые уточняются далее, а  $b \in \mathbf{R}$  — неизвестное число ( $0 < |b| < \infty$ ).

Предполагается, что  $v := v_0, v_1, v_2, \dots$  — ограниченная последовательность ( $v \in \ell_\infty$ ), причем ее граница  $\varepsilon$ , фигурирующая в оценке сверху нормы

$$\|v\| \leq \varepsilon < \infty, \quad (2)$$

априори неизвестна конструктору системы (и это существенно); см. [4, 6, 7].

Ставятся и решаются задачи синтеза робастных регуляторов, реализующих линейные обратные связи по  $y$  и обеспечивающих стабилизацию выхода  $y := y_1, y_2, \dots$  объекта (1) в окрестности заданной точки  $y^0 \in \mathbf{R}^m$  ( $\|y^0\| \neq 0$ ) при ограничениях (2) в условиях непараметрической неопределенности относительно  $\Phi$  (в неадаптивной постановке для класса NMSP и в адаптивной постановке для класса NSDP). При этом устанавливаются условия, гарантирующие предельную ограниченность  $y$  и  $u$  в форме [3, 4]

$$\limsup_{n \rightarrow \infty} (\|y_n\| + \tau \|u_n\|) < \infty, \quad \tau > 0. \quad (3)$$

Вводится следующее основополагающее предположение относительно класса NMSP: считается, что элементы матрицы Якоби  $B(u) = (\partial \varphi^{(i)} / \partial u^{(j)})_{m \times r}$  вектор-функции  $\varphi(u) = [\varphi^{(1)}(u), \dots, \varphi^{(m)}(u)]^T$ , зависящей от  $u = [u^{(1)}, \dots, u^{(r)}]^T$  и фигурирующей в уравнении

$$y_n = \varphi(u_{n-1}) + v_n, \quad (4)$$

к которому приводится уравнение (1), удовлетворяет ограничениям

$$\underline{b}^{(ij)} \leq \partial \varphi^{(i)}(u) / \partial u^{(j)} \leq \bar{b}^{(ij)}, \quad 0 < \underline{b}^{(ij)} \bar{b}^{(ij)} < \infty, \quad (i = 1, \dots, m; j = 1, \dots, r) \quad (5)$$

с априори известными  $\underline{b}^{(ij)}$ ,  $\bar{b}^{(ij)}$ .

Следуя работе [7], для построения линейного неадаптивного робастного регулятора, включенного в контур обратной связи, зафиксируем некоторую матрицу  $B_0 = (b_0^{(ij)})$  с элементами  $b_0^{(ij)} \in [\underline{b}^{(ij)}, \bar{b}^{(ij)}]$  такую, что  $\text{rank } B_0 = r$ , и найдем соответствующую ей псевдообратную матрицу  $B_0^+$ . Закон управления объектом (4) определяется согласно [7] как

$$u_n = u_{n-1} + B_0^{-1}(y^0 - y_n). \quad (6)$$

В докладе устанавливается достаточное условие, гарантирующее выполнение требования (3) в замкнутой системе (4), (6) для любого объекта класса NMSP, стесненного ограничениями (5), и любого возмущения  $v \in \ell_\infty$  (гарантированный результат I).

При наличии объекта класса NSDP, когда уравнение (1) приобретает вид

$$y_n = f(y_{n-1}, \dots, y_{n-N}) + bu_{n-1} + v_n, \quad (7)$$

предполагается, что сама неизвестная нелинейная функция  $f(\cdot)$ , зависящая от вектора  $x_{n-1} = [y_{n-1}, \dots, y_{n-N}]^T$ , может быть точно представлена суммой

$$f(x_{n-1}) = \theta^T x_{n-1} + \Delta(x_{n-1}), \quad (8)$$

в которой  $\theta \in \mathbf{R}^N$  — неизвестный вектор; при этом  $|\Delta(x)|$  может расти по мере роста нормы  $\|x\|$  со скоростью, не выше линейной:

$$|\Delta(x)| \leq k_0 + k_1 \|x\| \quad (k_0 > 0, k_1 \geq 0 \text{ — неизвестные числа}). \quad (9)$$

Строго доказывается, что адаптивный регулятор, реализующий линейную обратную связь  $u_n = (y^0 - \theta_n^T x_{n-1}) b_n^{-1}$  с подстройкой вектора параметров  $\tilde{\theta}_n = [\theta_n^T, b_n]^T \in \mathbf{R}^{N+1}$  по той же схеме, что и в работе [6], обеспечивает робастную стабилизацию (в смысле выполнения требования (3)) любого объекта (7) в условиях ограничений (2), (8), (9) (гарантированный результат II).

### Литература

1. Поляк Б.Т. Робастная устойчивость и управление / Б.Т. Поляк, П.С. Щербаков. — М.: Наука, 2002. — 303 с.
2. Кунцевич В.М. Управление в условиях неопределенности: гарантированные результаты в задачах управления и идентификации / В.М. Кунцевич. — К.: Наук. думка. — 2006. — 264 с.
3. Житецкий Л.С. Адаптивные системы управления с параметрическими и непараметрическими неопределенностями / Л.С. Житецкий, В.И. Скурихин. — К.: Наук. думка. — 2010. — 301 с.
4. Соколов В.Ф. Робастное управление при ограниченных возмущениях / В.Ф. Соколов. — Сыктывкар: Коми научный центр УрО РАН, 2011. — 218 с.
5. Isidori A. Nonlinear Control Systems II / A. Isidori. — London: Springer-Verlag, 1999. — 293 p.
6. Zhiteckii L.S. Singularity-free stable adaptive control of a class of nonlinear discrete-time systems / L.S. Zhiteckii // Proc. 15th IFAC World Congress. Barcelona, Spain, 2002. — Vol. M. Adaptation and Learning. — pp. 475 — 480.
7. Zhiteckii L.S. Discrete-time robust steady-state control of nonlinear multivariable systems: a unified approach / L.S. Zhiteckii, V.N. Azarskov, K.Yu. Solovchuk, O.A. Sushchenko // Prep. 19th IFAC World Congress. Cape Town, South Africa, 2014. pp. 8140 — 8145.

УДК 519.7

Д.В. Дмитришин, д-р техн. наук, проф., Одес. нац. политехн. ун-т

## МЕТОДЫ ЛОКАЛИЗАЦИИ ПЕРИОДИЧЕСКИХ ОРБИТ

Запропоновано метод пошуку циклів динамічних систем з безперервним часом: спочатку будується допоміжна динамічна система з дискретним часом, потім ця дискретна система коригується за допомогою управління, побудованого як узагальнений нелінійний зворотний зв'язок з запізненням. Наведено простий алгоритм знаходження оптимальних коефіцієнтів посилення в цьому зворотньому зв'язку

*Ключові слова:* нелінійні динамічні системи; оптимальне управління

Предложен метод поиска циклов динамических систем с непрерывным временем: сначала строится вспомогательная динамическая система с дискретным временем, затем эта дискретная система корректируется с помощью управления, построенного как обобщенная нелинейная обратная связь с запаздыванием. Приведен простой алгоритм нахождения оптимальных коэффициентов усиления в этой обратной связи.

*Ключевые слова:* нелинейные динамические системы; оптимальное управление

A new method of cycles detecting in a dynamical system with continuous time is suggested. First, an auxiliary system with discrete time is constructing. Then, the new system is adjusting by a control designed as generalized non-linear feedback with delay. A simple computation algorithm for the optimal gain of the constructed DFC is provided

*Keywords:* non-linear dynamical systems; optimal control

Проблема обнаружения предельных циклов динамических систем с непрерывным временем на плоскости является одной из самых актуальных в теории автоматического управления. Для полиномиальных отображений она составляет вторую часть 16 проблемы Гильберта в со-

временной постановке. Эта проблема вынесена в число проблем, оставшихся для решения в 21 веке, в известном обзоре S. Smal [10].

С развитием вычислительных методов и технологий была создана целая индустрия отыскания предельных циклов на плоскости или, в общем случае, периодических орбит с помощью компьютеров. Фактически поиск периодических орбит динамических систем с непрерывным временем был сведен к поиску периодических решений систем с дискретным временем. Традиционными считаются методы отыскания этих периодических решений, предложенные E. Ott, S. Grebodgy, Y.A. Yorke (OGY метод [7]), K. Pyragas (линейный Delayed Feedback Control [9]), O. Morgul (полилинейный Delayed Feedback Control [6]), Б.Т. Поляком (предикативный контроль [8]), D.S.M. Vieira, A.J. Lichtenberg (нелинейный Delayed Feedback Control [12]). Все предложенные методы в дальнейшем были разнообразно модифицированы.

Однако эти методы имеют существенные недостатки. Так, OGY метод требует точного знания орбиты. Метод Pyragas не работает, если разброс мультипликаторов цикла достаточно велик, кроме того, он не инвариантен относительно выпуклого многообразия, что делает его применимым лишь в исключительных случаях модельных задач. Методы Morgul и Viera-Lichtenberg не позволяют отыскать циклы длины больше трех. Метод Поляка требует попадания точек траектории в бассейн притяжения цикла, который резко уменьшается с увеличением порядка итераций, делая это попадание маловероятным.

Таким образом, существует потребность в новых подходах. Один из них предлагается в данном докладе. Еще раз отметим, что большинство существующих подходов к поиску циклов в системах с непрерывным временем так или иначе связано с дискретными отображениями, начиная с сечений Пуанкаре и, заканчивая схемами Рунге-Кутты или Адамса. Известно, что отображение Пуанкаре построить в общем случае сложно. В случае орбитальной неустойчивости  $\tau$ -периодического решения системы с непрерывным временем, соответствующее ему  $T$ -периодическое решение дискретной системы, построенной по методу Рунге-Кутты, также неустойчиво. Более того, даже в случае устойчивости  $\tau$ -периодического решения системы с непрерывным временем, соответствующее ему решение дискретной системы может оказаться неустойчивым. В такой ситуации модифицируют разностную схему, например, введением в нее управления [Зубов], так чтобы устойчивым решениям непрерывной системы соответствовали бы устойчивые решения дискретной системы. Такие разностные схемы называются консервативными.

Основываясь на идеях построения консервативных разностных схем, мы предлагаем для обычной разностной схемы типа Рунге-Кутты построить новую динамическую систему с дискретным временем, у которой  $T$ -периодические решения совпадают с  $T$ -периодическими решениями исходной разностной схемы и при этом бы были локально асимптотически устойчивыми. Разумеется, построенная дискретная система не является разностной схемой для исходной динамической системы с непрерывным временем, так как их решения не близки, за исключением нужных нам периодических решений.

Опишем кратко схему реализации нашей идеи. Пусть задана динамическая система

$$\dot{x} = F(x), \quad x \in R^m \quad (1)$$

с непрерывно дифференцируемой функцией  $F$ . Предположим, что система (1) имеет  $\tau$ -периодическое решение. Зададим шаг дискретизации  $h$ , и построим разностную схему

$$y_{n+1} = \Phi(y_n), \quad (2)$$

например, по методу Рунге-Кутты. Если шаг  $h$  достаточно мал, то можно предполагать, что на отрезке длины периода соответствующие решения систем (1) и (2) будут близки. Если в системе (2) имеется  $T$ -периодическое решение ( $T = \frac{\tau}{h}$ ), то оно окажется близким к  $\tau$ -периодическому решению системы (1). Если  $T$ -периодическое решение локально асимптоти-

чески устойчиво, то, перебирая различные начальные точки из допустимого множества, и запуская итерационный процесс (2), мы сможем найти это решение (цикл длины  $T$ ).

Проблема возникает, если  $T$ -периодическое решение не устойчиво. В этом случае мы строим управление в системе (2), используя и обобщая нелинейный Delayed Feedback Control из [12]. В результате получаем систему вида

$$z_{n+1} = \sum_{j=1}^N a_j(N, T) \Phi(z_{n-jT+T}), \quad \sum_{j=1}^N a_j(N, T) = 1. \quad (3)$$

Задача: для данного натурального  $T$  выбрать наименьшее возможное  $N$  и коэффициенты  $a_j(N, T)$  так, чтобы циклы длины  $T$  системы (3) были бы локально асимптотически устойчивыми. Минимальность  $N$  важно, так как для длинных предысторий попадание начальных траекторий в бассейн притяжения цикла маловероятно.

Пусть  $\{\mu_1, \dots, \mu_m\}$  — мультипликаторы цикла. Установлено, что необходимыми и достаточными условиями существования коэффициентов  $a_j(N, T)$ , при которых  $T$ -цикл системы (3) локально асимптотически устойчив, являются  $\mu_j \notin [1, +\infty)$ ,  $j = 1, \dots, m$ . Если мультипликатор имеет положительную вещественную часть и по модулю значительно больше единицы, то длина предыстории, определяемая числом  $N$ , может быть весьма большой, что осложняет реализацию алгоритма.

На настоящий момент детально исследованы вещественный случай  $\mu_j < 0$  и комплексный случай  $\text{Re}(\mu_j) < 0$ , при которых удалось найти коэффициенты  $a_j(N, T)$  [1, 2, 3]. При этом использовались методы геометрической теории функций комплексной переменной. Опишем алгоритм построения коэффициентов в случае нечетного  $N$  (в случае четных  $N$  нужны небольшие соответствующие изменения):

1) задаются узлы  $\psi_k = \pi \frac{2+T(2k-1)}{2+T(N-1)}$  в вещественном случае или  $\psi_k = \pi \frac{1+T(2k-1)}{1+T(N-1)}$  — в комплексном,  $k = 1, \dots, \frac{N-1}{2}$ ;

2) строится вспомогательный полином  $\sum_{j=1}^N c_j z^j = z \prod_{j=1}^{\frac{N-1}{2}} (z - e^{i\psi_j})(z - e^{-i\psi_j})$ ;

3) усредняем вспомогательный полином по Чезаро-Фейеру, его коэффициенты и будут искомыми

$$a_j(N, T) = \left(1 - \frac{1+T(j-1)}{2+T(N-1)}\right) c_j, \quad j = 1, \dots, N. \quad (4)$$

В общем случае явные формулы для коэффициентов получаются громоздкими, поэтому проще коэффициенты вычислять приближенно. Также в общем случае нам удалось доказать лишь асимптотическую оптимальность коэффициентов, показано, что в вещественном случае величина  $N$  растет, как корень квадратный из длины отрезка локализации мультипликаторов, а в комплексном случае как диаметр круга локализации мультипликаторов.

Доказательство оптимальности коэффициентов нам удалось найти в трех частных случаях. В случае вещественных мультипликаторов при  $T = 1, 2$ , при этом

$$a_j(N, 1) = 2 \tan \frac{\pi}{2(N+1)} \left(1 - \frac{j}{N+1}\right) \sin \frac{\pi j}{N+1},$$

$$a_j(N, 2) = \frac{2(N-j)+1}{N^2},$$

и в случае комплексных мультипликаторов при  $T = 1$ , при этом

$$a_j(N, 1) = \frac{2}{N} \frac{N - j + 1}{N + 1}.$$

Удивительно, что эти коэффициенты в вещественном случае есть ренормализованные коэффициенты полиномов T.J. Suffridge [11] при подходящем выборе параметров, а в комплексном случае это коэффициенты классического экстремального полинома Фейера.

Таким образом, в докладе предложен новый метод поиска циклов (в общем случае неустойчивых) динамических систем с непрерывным временем. Он заключается в том, что сначала строится вспомогательная динамическая система с дискретным временем, как сечение Пуанкаре или как разностная схема типа Рунге-Кутты, Адамса и т.п. Затем эта дискретная система корректируется с помощью управления, построенного как обобщенная нелинейная обратная связь с запаздыванием. Приведен простой алгоритм нахождения оптимальных коэффициентов усиления в этой обратной связи. При этом нет необходимости знать наперед цикл вспомогательной дискретной системы, более того не надо знать точные значения мультипликаторов, достаточно иметь оценки области их локализации.

### Литература

1. Dmitrishin D. Methods of harmonic analysis in nonlinear dynamics / D. Dmitrishin, A. Khamitova // *Comptes Rendus Mathematique*. 2013. — Vol. 351. — Issues 9 — 10. — pp. 367 — 370.
2. Dmitrishin D. Fejer polynomials and chaos / D. Dmitrishin, A. Khamitova, A. Stokolos // *Springer Proceedings in Mathematics and Statistics*. 2014. — Vol. 108, — pp. 49 — 75.
3. On the stability of cycles by delayed feedback control / Dmitrishin D., Hagelstein P., Khamitova A., Stokolos A. // arXiv: 1501.04573. 2015.
4. On generalized linear DFC / Dmitrishin D., Khamitova A., Solyanik A., Stokolos A. // arXiv: 1407.6488. 2014.
5. Dmitrishin D. Generalized Fejer polynomials and non-linear dynamics, in preparation / D. Dmitrishin, A. Khamitova, A. Stokolos, M. Tohanianu // arXiv: 1407.6488. 2014.
6. Morgul O. On the stability of delayed feedback controllers / O. Morgul // *Phys. Rev. Lett. A*. 2003. — 314 — pp. 278 — 285.
7. Ott E. Controlling chaos / E.Ott, C.Grebodgi, J.A. Yorke // *Phys. Rev. Lett.* 1990. — № 64. — pp. 1196 — 1199.
8. Polyak B.T. Stabilizing chaos with predictive control / B.T. Polyak // *Automation and Remote Control*. 2005. — № 66(11). — pp. 1791 — 1804.
9. Continuous control of chaos by self controlling feedback / K. Pyragas // *Phys. Rev. Lett. A*. 1992. — № 170, — pp. 421 — 428.
10. Smail S. Mathematical problems for the next century / S. Smail // *Mathematical intelligencer*. 1998. — Vol. 20 — №. 20. — pp. 7 — 15.
11. Suffridge T. On univalent polynomials / T. Suffridge // *J. London Math. Soc.* 1969 — № 44. — pp. 496 — 504
12. Vieira D.S.M. Controlling chaos using nonlinear feedback with delay / D.S.M. Vieira, A.J. Lichtenberg // *Phys.Rev. E*. 1996. — № 54. — pp. 1200 — 1207
13. Зубов В.И. Консервативные численные методы интегрирования дифференциальных уравнений в нелинейной механике / В.И. Зубов // *Докл. РАН*. 1997. — Т. 354 — № 4. — С. 446 — 448.

УДК 519.873:62 – 50 (047)

А.С. Кулик, д-р техн.наук, проф., Нац. аерокосм.  
ун-т «ХПІ»

## РАЦИОНАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ АВТОНОМНЫМИ ОБЪЕКТАМИ В УСЛОВИЯХ ДЕСТАБИЛИЗИРУЮЩИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

Розглянуто особливості функціонування автономних об'єктів в умовах дестабілізуючих впливів. Представлені положення раціонального управління такими об'єктами за допомогою нового принципу управління по діагнозу. Описано моделі та методи діагностування та відновлення працездатності багатовимірних об'єктів управління в тимчасовій області. Наведено результати експериментальних досліджень щодо раціонального управління різних макетних об'єктів.

*Ключові слова:* раціональне управління; дестабілізуючі впливи; управління по діагнозу; діагностування; відновлення.

Рассмотрены особенности функционирования автономных объектов в условиях дестабилизирующих воздействий. Представлены положения рационального управления такими объектами посредством нового принципа управления по диагнозу. Описаны модели и методы диагностирования и восстановления работоспособности многомерных объектов управления во временной области. Приведены результаты экспериментальных исследований по рациональному управлению различных макетных объектов.

*Ключевые слова:* рациональное управление; дестабилизирующие воздействия; управление по диагнозу; диагностирование; восстановление.

The features of the functioning of autonomous objects in destabilizing influences. Presented situation rational management of such facilities through a new management principle of diagnosis. The models and methods of diagnosing and disaster recovery multidimensional control objects in the time domain. The results of experimental studies on the sustainable management of various mock-objects.

*Keywords:* good governance; destabilizing effects; Administration of the diagnosis; diagnostics; recovery.

Теория автоматического управления представляет собой развивающуюся область знания о принципах, моделях и методах автономной стабилизации и позиционирования объектов различной, не полностью определенной, физической природы. Неполная определенность обуславливается приближенностью модельных представлений, как объекта управления, так и нестационарностью условий функционирования систем автоматического управления. Возрастающая энергетическая масштабность и функциональная уникальность таких систем приводят к нештатным ситуациям, оказывающим ощутимые дискомфортные влияния на биосферу. При этом базовым принципом управления остаётся классический принцип управления по отклонению. Внутренняя противоречивость этого принципа, состоящая в необходимости допустить отклонение от штатного функционирования, а затем его компенсировать, не позволяет разрабатывать системы управления, эффективно парирующие нештатные ситуации. Это обстоятельство обуславливает поиск новых идей, а также инструментальных средств автоматического управления создаваемых автономных искусственных объектов, функционирующих в условиях дестабилизации. Одно из перспективных направлений разрешения существующих противоречий состоит в формировании рационального управления на базе нового принципа управления по диагнозу [1]. Анализ причин нарушения работоспособности автономных объектов на всех этапах их жизненного цикла позволил сформировать классы дестабилизирующих воздействий: помех, возмущений и отказов. Дестабилизирующие воздействия – это неконтролируемые и неопределенные воздействия. Характеристики таких дестабилизирующих воздействий не могут быть получены в результате непосредственных измерений, а могут быть получены с помощью диагностирования процесса функционирования, в результате которого получается информация о времени появления дестабилизирующего воздействия, месте его локализации и виде дестабилизирующего воздействия. Эффективное восстановление работоспособности дестабилизированного объекта

возможно посредством разумного использования имеющихся избыточных средств, соответствующих полученному диагнозу.

На рис.1 представлена упрощенная блок-схема такой системы автоматического управления. Блок - схема системы состоит из двух взаимосвязанных подсистем. Первая — это объект рационального управления (ОРУ), включающий объект управления, блок приводов и блок датчиков. На всю подсистему ОРУ действует множество неконтролируемых, неопределенных дестабилизирующих воздействий —  $D = \{d_1, d_2, \dots, d_q\}$ . Вторая подсистема — устройство рационального управления (УРУ) состоит из блока диагностики функционального состояния, в котором по векторным сигналам задающему  $u_3(kT_0)$  и расширенному выходному  $y_p(kT_0)$  формируется диагноз ОРУ. В блоке управления формируется управляющее воздействие  $u_B(kT_0)$ , обеспечивающее восстановление работоспособности ОРУ.

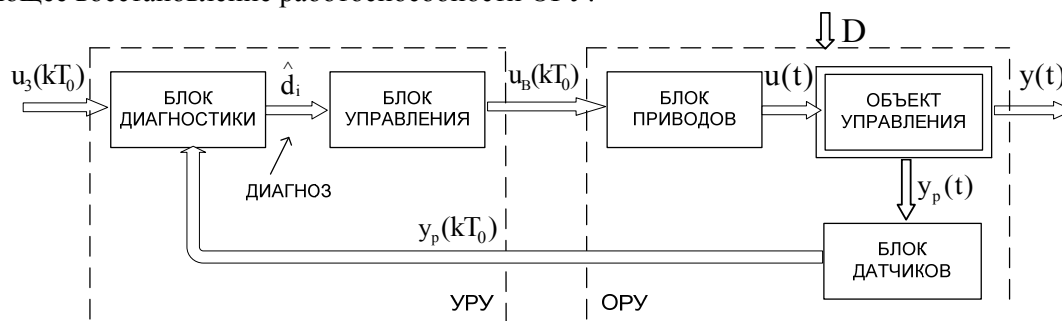


Рис. 1. Блок-схема системы автоматического управления по диагнозу

Проблема заключается в разработке для всех этапов жизненного цикла автономных объектов в условиях дестабилизирующих воздействий моделей, методов и инструментальных средств рационального управления, базирующегося на глубоком диагностировании и гибком восстановлении работоспособности. Для решения этой проблемы актуальными представляются следующие задачи.

Первая заключается в формировании на единой методологической основе вербальных, графических, математических и машинных моделей, отражающих связь косвенных диагностических признаков с прямыми, и обладающих преимуществом для каждого этапа жизненного цикла объектов.

Вторая состоит в формировании связанного ряда методов диагностического обеспечения каждого этапа жизненного цикла. Третья задача — это задача гибкого восстановления работоспособности по результатам диагностирования. Четвёртая задача связана с отработкой алгоритмического и программного обеспечения процессов диагностирования и восстановления работоспособности. Пятая задача — это доводка рационального управления на макетных образцах. При решении первой задачи получены новые модели в пространстве состояний, однозначно связывающие прямые и косвенные признаки дестабилизирующих воздействий, названные диагностическими моделями. На основе диагностических моделей решена вторая задача разработки диагностического обеспечения, позволяющего выявлять все характеристики дестабилизирующих воздействий, необходимые для получения полного диагноза [2].

Третья задача решена для использования таких избыточных средств восстановления как сигнальная и параметрическая подстройки, реконфигурация алгоритмов и аппаратуры. Решение четвёртой задачи производилось с помощью разработанных программных средств имитации дестабилизирующих воздействий и средств рационального управления. Решение пятой задачи производилось на макетных образцах дискообразного летающего изделия, маневренного автономного летающего изделия, макетных образцах блока датчиков, блока приводов, микро-спутника [3]. Проведенные экспериментальные исследования свидетельствуют о принципиальной возможности рационально управлять автономными объектами при дестабилизирующих воздействиях.



### Литература

1. Кулик А.С. Рациональное управление работоспособностью аэрокосмических объектов при дестабилизирующих воздействиях / А.С. Кулик // *Авиационно-космическая техника и технология*. — 2014. — № 1(108). — С. 31 — 38.
2. Кулик А.С. Сигнально-параметрическое диагностирование систем управления / А.С. Кулик. — Харьков.: Гос. аэрокосмический ун-т «ХАИ»; Бизнес-Информ. — 2000. — С. 260.
3. Кулик А.С. Становление и развитие рационального управления объектами в нештатных ситуациях / А.С. Кулик // *Радиоэлектронні і комп'ютерні системи*. — 2007. — № 5(24). — С. 8 — 15.