

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

НЕСТЕРЮК Олександр Геннадійович

УДК 004.942

ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ МОДЕЛЮВАННЯ І АНАЛІЗУ  
ДИСКРЕТНО-НЕПЕРЕРВНИХ АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМ  
УПРАВЛІННЯ

05.13.06 – Інформаційні технології

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Одеса – 2016

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Одеському національному політехнічному університеті  
Міністерства освіти і науки України

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор  
**Денисенко Володимир Анатолійович**,  
Одеська національна академія харчових технологій,  
професор кафедри автоматизації технологічних  
процесів і робототехнічних систем

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор  
**Удовенко Сергій Григорович**,  
Харківський національний університет радіоелектроніки,  
професор кафедри електронних обчислювальних машин

доктор технічних наук, професор  
**Малахов Євгеній Валерійович**,  
Одеський національний університет ім. І.І. Мечникова,  
завідувач кафедри математичного забезпечення  
комп'ютерних систем

Захист відбудеться 22 грудня 2016 р. о 13:30 на засіданні спеціалізованої вченої  
ради Д 41.052.01 в Одеському національному політехнічному університеті за  
адресою: 65044, м. Одеса, пр. Шевченка, 1, ауд. 400-А.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Одеського національного  
політехнічного університету за адресою: 65044, м. Одеса, пр. Шевченка, 1.

Автореферат розісланий 22 листопада 2016 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради

О.Є. Колесніков

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Автоматизація галузей народного господарства потребує застосування автоматизованих систем управління (АСУ) двох типів, а саме, побудованих за аналоговим і цифровим принципами. До переваг аналогового способу управління відноситься оперативність реакції на зміну зовнішніх умов, а до недоліків – складність налаштування, низька перешкодозахищеність, що знижує його ефективність. В протилежність аналоговим, цифрові системи досить прості в налаштуванні і більш ефективні, проте вони мають великі витрати часу для проведення розрахунків, що знижує оперативність. Для усунення протиріччя між оперативністю та ефективністю часто використовують дискретно-неперервні АСУ (ДН АСУ), в яких найбільш витратні за часом процедури реалізують у вигляді аналогових пристроїв. Прикладами таких систем є системи управління польотами, управління процесами в деяких галузях хімічної промисловості та інші.

При розробці ДН АСУ застосовуються різні методи та інформаційні технології (ІТ) моделювання та аналізу інформаційних систем для автоматизованого управління, засновані на еквівалентних неперервних, або на еквівалентних дискретних моделях. Внаслідок застосування еквівалентних моделей і відповідних ІТ та програмних засобів (неперервних або дискретних, наприклад, таких, як MATLAB, MvStudium, VisSim) знижується якість моделювання, яка зазвичай оцінюється за нормованою середньоквадратичною помилкою між реакціями об'єкту моделювання та моделі, що впливає на загальну ефективність розробки системи. Одним з основних завдань ІТ моделювання та аналізу ДН АСУ є доказ властивості досяжності дискретно-неперервної системи, який проводиться шляхом чисельного експерименту або за допомогою аналітичних методів.

Існуючі методи аналізу властивості досяжності мають істотні недоліки. По-перше, чисельні методи не дозволяють проводити доказ досяжності на ранніх етапах розробки АСУ. По-друге, для аналізу ДН АСУ використовують окремо неперервні та дискретні аналітичні методи дослідження властивості досяжності, що збільшує як час аналізу, так і час синтезу системи.

Для усунення цих недоліків пропонується розробити ІТ моделювання та аналізу властивості досяжності на основі використання мереж Петрі та дискретно-неперервних мереж (ДН-мереж), що дозволить підвищити якість моделювання. Також для аналізу властивості досяжності ДН АСУ пропонується використовувати редукцію-декомпозицію ДН-мережі та сигнального графа, що дозволить зменшити складність обчислень та час аналізу.

Таким чином, розробка інформаційної технології для моделювання та аналізу дискретно-неперервної динаміки засобами ДН-мереж є **актуальною**.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційні дослідження виконано відповідно до науково-дослідних робіт ОНПУ № 559-64 «Цифрові узгоджені фільтри сигналів з розширеним спектром у системах керування збір інформації» (0107U001961), № 664-64 «Частотно-залежні компоненти цифрових систем, які перебудовуються» (0109U008464), а також

№ 54-64 «Дискретно-безперервні мережі в автоматизованих системах управління» (0111U009482).

**Мета і задачі дослідження.** Метою дисертаційної роботи є підвищення якості моделювання та скорочення часу аналізу властивості досяжності шляхом розробки і дослідження моделей, методів та інформаційної технології моделювання і аналізу дискретно-неперервних автоматизованих систем управління на базі мереж Петрі і дискретно-неперервних мереж.

Для досягнення цієї мети в роботі вирішені наступні задачі.

1. Проведено аналіз прикладних областей застосування дискретно-неперервних АСУ, моделей, методів та існуючих ІТ їх моделювання та аналізу.

2. Розроблено дискретно-неперервну модель, яка описує дискретно-неперервні АСУ.

3. Розроблено модифікований сигнальний граф, який представлено у форматі мереж Петрі.

4. Розроблено метод дослідження властивості досяжності дискретно-неперервних АСУ.

5. Розроблені базові ІТ моделювання та аналізу досяжності дискретно-неперервних АСУ на основі ДН-мереж.

6. Проведено моделювання та досліджено властивість досяжності моделі пакетної установки для випарювання розчину хлористого натрію.

*Об'єкт дослідження* – процес імітаційного моделювання та аналізу складних дискретно-неперервних АСУ.

*Предмет дослідження* – моделі, методи та ІТ моделювання і аналізу дискретно-неперервних АСУ на основі ДН-мереж.

**Методи дослідження.** При розробці моделей використовувались методи теорії багатозв'язних САР і дискретно-неперервного простору станів, при розробці методів перетворення сигнального графа і аналізу властивості досяжності – теорію графів і мереж Петрі, а також структурні матриці. При розробці програмного забезпечення використовувались методи об'єктно-орієнтованого програмування і теорія баз даних.

**Наукова новизна одержаних результатів** дослідження полягає в розробці методів та моделей для ІТ моделювання та аналізу ДН АСУ. В роботі отримано наступні наукові результати.

1. Отримала подальший розвиток дискретно-неперервна модель дискретно-неперервних автоматизованих систем управління, яка відрізняється від існуючих моделей наявністю додаткових компонентів: дискретно-неперервних і стохастичних переходів, що дозволило підвищити якість моделювання.

2. Вперше розроблено метод перетворення сигнального графа об'єкта моделювання в представлену мережею Петрі модель системи, який відрізняється від існуючих методів наявністю формальної відповідності між елементами сигнального графа і елементами мережі Петрі, що дозволило розробити метод аналізу властивості досяжності.

3. Вперше розроблено метод та інформаційну технологію аналізу досяжності стану дискретно-неперервної системи, які відрізняються використанням сигнального графа і виконанням редукації-декомпозиції мереж в дискретно-

неперервному просторі, що забезпечує проведення дослідження досяжності дискретно-неперервних АСУ на ранніх етапах розробки системи і дозволяє зменшити час аналізу.

4. Отримали подальший розвиток метод та інформаційна технологія моделювання дискретно-неперервних об'єктів, які базуються на розробленій дискретно-неперервній моделі і відрізняються наявністю етапу дослідження досяжності заданих станів, що дозволяє підвищити якість моделювання і скоротити час моделювання та аналізу.

**Практичне значення одержаних результатів.** Практична цінність роботи полягає в тому, що на основі розроблених методик, алгоритмів і програм вперше стало можливим в рамках ІТ моделювати складні ДН системи, представлені за допомогою ДН-мережі, та досліджувати їх властивості. Результати досліджень апробовані і впроваджені в навчальний процес кафедри «Комп'ютерні системи» Одеського національного політехнічного університету, а також в НВП «ХАРТРОН-ЕНКОС» і НВКЦ «ОДІС-W», що дозволило скоротити час розробки на 30% і покращити якість продукції на 6 – 7%.

**Особистий внесок здобувача** полягає у розвитку методів моделювання і моделей ДН систем, заснованих на базі ДН-мереж, визначення способів їх декомпозиції з метою вирішення завдання досяжності, а саме: реалізація операцій у програмному середовищі DCNET [1], постановка завдань досяжності [18, 20], розробка алгоритмів аналізу досяжності [2, 4, 5, 7, 8, 15, 18, 20]; проведення моделювання системи випарювача [3]; розробка алгоритмів згортки ДН-мереж [6, 21], перетворення МСГ, та їх практична реалізація [6]; участь у проведенні моделювання [9, 10, 14] та їх порівняльний аналіз [10]; огляд [12], отримання характеристик [29] і аналіз властивостей середовища DCNET, а також можливості її інтеграції в систему дистанційного навчання [11]; верифікація програмного середовища моделювання [14]; введення нечіткого переходу і модифікації програмного середовища [19]; розробка структур зберігання даних, їх динамічного відновлення, структур файлів і баз даних, систем моделювання, аналізу досяжності, відображення графіків і таблиць, графічного редактора [2, 7, 9, 13, 16 – 18, 30, 31]. Розроблена ІТ для моделювання і дослідження ДН систем реалізована в програмному середовищі DCNET. Здобувач брав участь у проведенні її випробувань та аналізі результатів.

**Апробація результатів дисертації.** Основні теоретичні положення і результати дисертаційної роботи доповідалися на наступних конференціях і семінарах: IV семінарі «Моделювання в прикладних наукових дослідженнях» (Одеса, 1997), 1-st International modeling School (Alushta, 1996), 45th International Scientific Colloquium, (Imenau Technical University, 2000), Міжнародних конференціях «Автоматика» (Одеса, 2001, Вінниця, 2006, Одеса, 2008), Міжнародних науково-практичних конференціях «Сучасні інформаційні і електронні технології» (Одеса, 2002, 2003, 2007 – 2012), семінарі «Інформаційні системи і технології» (Одеса, 2003), Міжнародній конференції «Кораблебудування: освіта, наука, виробництво» (Миколаїв, 2002), Міжнародній конференції «Сучасні технології вищої освіти» (Одеса, 2003), Міжнародній науково-практичній конференції «Системний аналіз та інформаційні технології» (Київ, 2004), 61-й науково-

технічній конференції професорсько-викладацького складу ОНПУ (Одеса, 2004), XV міжнародній науково-методичній конференції «Управління якістю підготовки фахівців» (Одеса, 2010), Європейській виставці інформаційних технологій СеВІТ'98 (Ганновер, Німеччина, 1998), а також на розширеному науковому семінарі кафедри комп'ютерних систем ОНПУ (Одеса, 2016).

**Публікації.** Результати дисертації опубліковані в 31 публікації, у тому числі в 10 статтях в наукових журналах і збірках наукових праць, визначених МОН України як фахових видань з технічних наук, та 20 збірниках праць та тез міжнародних конференцій. Одну зі статей опубліковано у виданні України, яке включено до міжнародних наукометричних баз Index Copernicus International, Ulrich's Periodicals Directory, Electronic Journals Library, РИНЦ, ВИНІТИ РАН.

**Структура і обсяг роботи.** Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів і висновків, викладених на 217 сторінках, з них 142 сторінки основного тексту, 12 сторінок переліку використаних джерел; містить 68 рисунків, 13 таблиць, перелік використаних джерел із 116 найменувань та три додатки.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

**У вступі** дана загальна характеристика роботи, яка підтверджує її актуальність, показана відповідність роботи державним науковим програмам, а також наукова новизна та практичне значення одержаних результатів, визначено об'єкт і предмет дослідження, сформульовано мету і задачі дослідження.

**Перший розділ** присвячений аналізу сучасного стану розробки АСУ, ІТ для АСУ, основ їх побудови, побудови математичних моделей, дослідження їх деяких властивостей, зокрема, досяжності. До недоліків аналогових АСУ може бути віднесено складність налаштування і низька перешкодозахищеність, недоліків цифрових АСУ – великі витрати часу на проведення розрахунків. АСУ відносяться до складних систем управління, що складаються з обладнання та установок, які стосуються як неперервних, так і дискретних технологічних об'єктів, алгоритмічного та програмного забезпечення, а також інтерфейсу між ними. До їх особливостей відносяться: велика кількість складних елементів і виконуваних функцій, багаторежимне функціонування. На сучасному етапі розробці найчастіше використовуються моделі на основі об'єднання теоретико-множинної математичної схеми (теорія графів) та алгебраїчної схеми (системи диференційних рівнянь). Такі схеми дозволяють відобразити процеси отримання і обробки інформаційних потоків. Існуючі моделі складних технічних об'єктів і комплексів, розроблені на основі логіко-динамічних моделей, мають істотний недолік – ускладнене моделювання синхронних і асинхронних режимів взаємодії між різними частинами системи.

При моделюванні процесів різної природи, які властиві АСУ, а також при аналізі досяжності, доцільно використовувати моделі, засновані на ДН-мережах, які можуть бути розширені за рахунок додаткових алгоритмічних особливостей і функціональних взаємодій (доповнення переходами різних класів). Для аналізу властивості досяжності пропонується використання сигнального графа, а також проведення редукції-декомпозиції системи.

Показано, що відомі системи моделювання MATLAB/SIMULINK, MBTU, Visual Object Net++, VisSim не передбачають можливість моделювання та аналізу складних дискретно-неперервних об'єктів, які представлено ДН-мережами.

Таким чином, був визначений напрямок дослідження: розробка ІТ моделювання та аналізу ДН АСУ на базі мереж Петрі і ДН-мереж для підвищення якості моделювання та скорочення часу розробки системи.

У **другому розділі** розроблена дискретно-неперервна модель, в якій передбачені переходи, що забезпечують реалізацію додаткових функцій у неперервно-подієвої (НП) частині, а також засобів інтерфейсу між підсистемами різної природи. Проводиться поетапний перехід від системи, представленої перехідним графом стану з логічними елементами, і методу управління логічними елементами (управління структурою дискретно-неперервної системи) до подання з використанням розширеної ДН-мережі, що дозволяє описувати ДН АСУ найбільш придатними для цього засобами.

Для того, щоб здійснити перехід від сигнального графа (СГ) до модифікованого СГ (МСГ), поданого у форматі мереж Петрі, розроблено метод перетворення, який полягає в наступному.

1. Проводиться перевірка вершин СГ на кількість вхідних дуг. Якщо є вершини, які мають більш однієї вхідної дуги, то кожна з таких вершин обробляється у відповідності з кроком 2, після чого здійснюється перехід до кроку 3. Інакше – перехід до кроку 3.

2. Знайдена вершина замінюється на вершину-перехід, якій ставиться у відповідність функція перетворення сигналу – суматор з вершиною-позицією, пов'язаною з ним одиничною дугою. При цьому вихідні дуги заміненої вершини стають вихідними дугами вершини-позиції, що вводиться.

3. Кожна дуга СГ, за винятком введених вихідних дуг на кроці 2, замінюється на вершину-перехід, з'єднаний вхідною дугою з тією вершиною, з якої виходила дуга, що замінюється, і вихідною дугою з тією вершиною, до якої входила ця дуга. Переходу, що введено, ставиться у відповідність функція перетворення сигналу, яка була призначена дузі, що замінюється.

Така модифікація СГ відрізняється від звичайного представлення наявністю вершин двох типів – позицій, яким призначена функція маркування, та переходів, яким передані функції перетворення сигналів. Вона дозволяє формалізувати процес переходу від СГ до НП частини дискретно-неперервної моделі, представленої ДН-мережею, і розробити метод аналізу властивості досяжності.

В якості елементів розширення ДН-мережі були використані переходи, що отримані в результаті накладання різних видів елементарних мереж або фрагментів мереж.

Розроблена модель дискретно-неперервної системи базується на теоретико-множинному поданні, яке представлено на рис. 1. Система складається з НП та дискретно-подієвої (ДП) частин і засобів інтерфейсу між ними.

Вектор стану НП частини  $x^c$  змінюється під дією вектора керуючого впливу  $u^c \in U^c = R^{n^c}$  і вектора управління структурою НП частини  $\bar{u}^d \in \bar{X}^d = R^{n^d}$ .

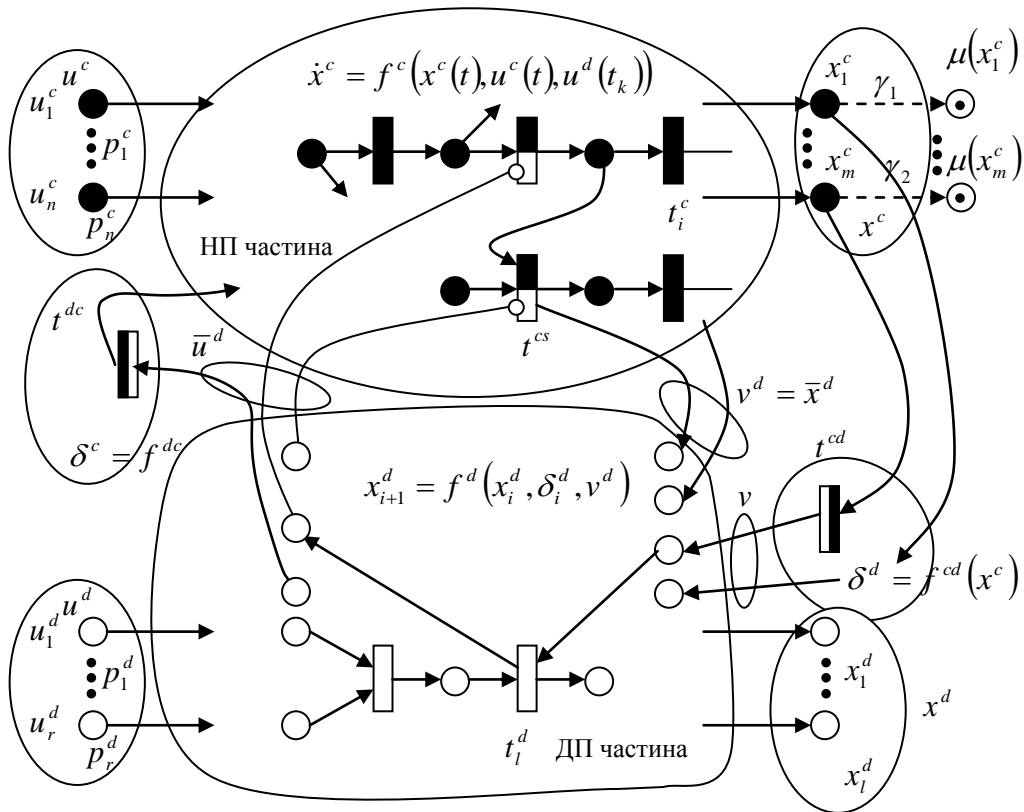


Рисунок 1 – Теоретико-множинне представлення моделі дискретно-неперервної системи на основі ДН-мережі

Вектор дискретного стану  $x^d$  (рух маркерів по дискретних позиціях  $p_i^d$ ) змінюється під дією дискретного керуючого впливу  $u^d \in X^d = R^{n^d}$  і впливів  $v$  та  $v^d$ . НП частина представлена засобами МСГ, що відрізняється від звичайного графа передачею функцій перетворення сигналу від дуг вершин-переходів і наявністю розмітки вершин-позицій, а ДП частина – засобами розширеної мережі Петрі. Поєднанням цих підсистем отримана дискретно-неперервна система, представлена кортежем

$$\Gamma = \langle \Sigma, R, H, \bar{F}, M_0, \Pi, time, tdugi \rangle, \quad (1)$$

де  $\Sigma$  – абстрактно-алгоритмічний рівень, представлений системами рівнянь неперервного та дискретного стану;  $R = \langle P, T, I, O \rangle$  – представлення ДН-мережі;  $P$  – кінцевий набір позицій;  $T$  – кінцевий набір переходів;  $P \cap T = 0$  і  $P \cup T = 0$ ;  $I(p_i, t_j)$  – функція, яка визначає дуги від позиції до переходу;  $O(p_i, t_j)$  – функція, яка визначає дуги від переходу до позиції;  $H : P \cup T \rightsquigarrow \{d, c, cs, cd, dc, \Pi\}$  – оператор, названий призначаючою функцією, якій вказує, що вузол є дискретним або неперервним, або із структурою, що управляється, або неперервно-дискретним, або дискретно-неперервним, а також вказує, яким сигналом (оператором  $\Pi$ ) він позначений;  $M_0 = |\mu_0(p_1^c), \mu_0(p_1^c), \dots, \mu_0(p_n^c), \mu_0(p_1^d), \mu_0(p_2^d), \dots, \mu_0(p_m^d)|^T$  – початкове маркування;  $\Pi$  – оператор перетворення системи, представленою системою рівнянь у теоретико-множинному представленні у вигляді ДН-мережі;  $\bar{F}$  – матриця інцидентності позицій і переходів НП частини;  $Time(t)$  – функція призначення часу  $\tau^d$ , яка пов'язує раціональне число або затримку спрацьовування кож-



ного переходу;  $Time(p,t)$  – функція, яка пов'язує раціональне число (час  $s^d$ ) з кожною дугою.

Неперервний стан  $x^c(t)$  змінюється у відповідності з моделлю в просторі станів

$$\dot{x}^c(t) = f^c(x^c(t), \bar{u}^d(t), u^c(t)). \quad (2)$$

Стан  $x^c(t)$  змінюється під дією вхідного сигналу  $u^c(t)$  і дискретного сигналу  $\bar{u}^d(t) = f^{cd}(x^c(t))$ , останній забезпечує миттєву зміну структури НП частини системи.

Дискретний стан  $x^d(t)$  моделі відповідає маркованому вектору мережі Петрі, що інтерпретує метод логічного управління НП частиною з динамікою

$$x^d(t_{i+1}) = f^d(x^d(t_i), \delta(t_i), u^d(t_i)). \quad (3)$$

Дискретні зміни стану викликаються дією вхідного вектора  $u^d(t_i)$ , динамікою мережі Петрі (умовами спрацьовування  $\delta(t_i)$ ), булевими умовами  $\delta^d(t) = f(u^d(t), v^d(t)) \in \{0,1\}$ , де  $v^d(t) = f^{cd}(x^c(t), c) \in \{0,1\}$ .

Якщо НП частину спільно з інтерфейсом  $v^d = f^{cd}(x^c(t))$  представлено підграфом  $G_1$ , а ДП частину – підграфом  $G_2$ , то їх перетинання  $G_1 \cap G_2 \subset \Phi = \{t_i^{cd}\}$  є переходами, що структурно управляються.

Побудувавши матрицю інцидентності на основі теоретико-множинного подання проведено класифікацію ДН АСУ.

Математична модель системи може бути представлена у просторі станів  $(x^c(t), x^d(t_k))$  системою рівнянь:

$$\dot{x}^c(t) = f^c(x^c(t), \bar{u}^d(t_k), u^c(t), t), \quad (4)$$

$$x^d(t_k) = x^d(t_{k+1}) + H\delta^d(t_k, \tau^d, s^d) + u^d(t_k, \tau^d, s^d), \quad (5)$$

$$\delta^d(t_k, \tau^d, s^d) = \Delta(u^d(t_k, \tau^d, s^d), \eta^d(t_k)), \quad (6)$$

$$x^d(t_0) = x_0^d, \quad u^d(t_0) = u_0^d,$$

де  $\delta^d(t_k) = |\delta_1^d, \delta_2^d, \delta_3^d|^T$  – вектор управління  $\delta_i^d \cap \delta_j^d = 0$ ;  $\delta_i^d \cup \delta_j^d = 1$  для  $i \neq j$ ;  $\Delta$  – оператор перетворення;  $H$  – матриця інцидентності ДП частини з елементами  $h_{ij} = \{+1, -1, 0\}$ .

В роботі досліджено якість моделювання ДН АСУ та отримано наступні результати. Для оцінки якості моделювання використовувалася нормована середньоквадратична помилка, яка склала для еквівалентних аналогових моделей АСУ 5-10%, еквівалентних цифрових – 7-15%, розроблених для дискретно-неперервних – 0.1-1%.

**Третій розділ** присвячений аналізу властивості досяжності ДН АСУ, в ньому визначено якісні показники, за якими оцінюється ця властивість, виділено умови, яким повинна задовольняти досліджувана система, наведено метод дослідження.

Однією з основних функцій аналізу, яким повинна задовольняти АСУ при розробці, є аналіз властивості досяжності. Аналіз за допомогою чисельних методів дозволяє провести дослідження, однак має основний недолік – великі часові витрати у порівнянні з аналітичними методами. Для ДН АСУ аналітичних виразів не існує. Однак існує метод аналізу досяжності НП частини, представ-

леної СГ, отже, необхідно розробити метод, що дозволяє здійснити перехід від подання МСГ до еквівалентного СГ, на основі якого, а також з використанням редукції-декомпозиції системи для скорочення її розмірності, розробити метод аналізу досяжності ДН-мережі.

Визначення 1. Нехай необхідно перевести систему (4) – (6) з початкового дискретно-неперервного стану  $(x_0^c, x_0^d)$  в кінцевий стан  $(x_r^c, x_r^d)$ . Система називається досяжною, якщо знайдеться такий кінцевий час  $\tau \leq t$ , протягом якого деякий керуючий вплив  $U = (u^c(t), \bar{u}_i^d(t_k))$  зробить такий перехід можливим.

З урахуванням того, що в ДН АСУ забезпечується кілька режимів  $R_i$  (режим  $R_i$  – послідовність операцій  $\{O_1^i \propto O_2^i \propto \dots \propto O_n^i\}$ , що забезпечують досягнення локальних цілей  $C_i$ ), справедливо наступне визначення.

Визначення 2. Система досяжна, якщо досяжний кожен з режимів  $\{R_i\}_{i=1}^N$ , що реалізуються в системі.

Дослідження досяжності ДН АСУ можливо на основі ітераційної процедури, що поєднує перевірку умов досяжності НП частини і ДП частини.

В роботі розглянуто декілька методів визначення досяжності:

1. Алгебраїчний метод аналізу досяжності  $\Sigma_i$  структури НП частини, перевірка досяжності вектора  $x_i^c$  на основі методу перетворення з МСГ в СГ, редукція-декомпозиція ДП частини (рис. 2) і висновок про досяжність  $i$ -го режиму.

2. Виконання декомпозиції (визначення класів (підграфів)) НП частини (рис. 3) і окремо ДС частини, редукція  $\Sigma_i$  структури НП частини, перевірки досяжності вектора  $x_i^c$ , редукція ДП частини і висновок про досяжність  $i$ -го режиму.

3. Моделювання  $i$ -го режиму ДН АСУ, формування поточного стану  $(x^c(t), x^d(t_k))^T$  розміток і порівняння із заданим станом  $(x_r^c(t), x_r^d(t_k))^T$ . У разі збігу поточного стану  $(x^c(t), x^d(t_k))^T$  із заданим станом  $(x_r^c(t), x_r^d(t_k))^T$  робиться висновок про те, що заданий стан є досяжним.

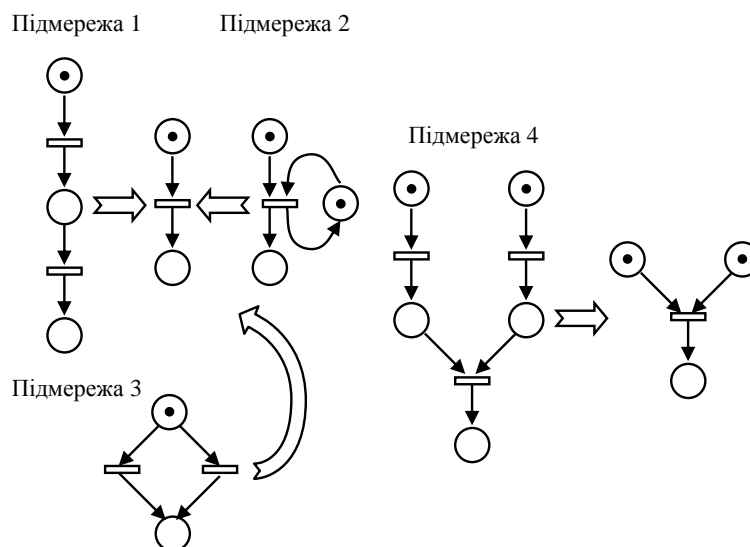


Рисунок 2 – Редукція-декомпозиція ДП частини ДН АСУ

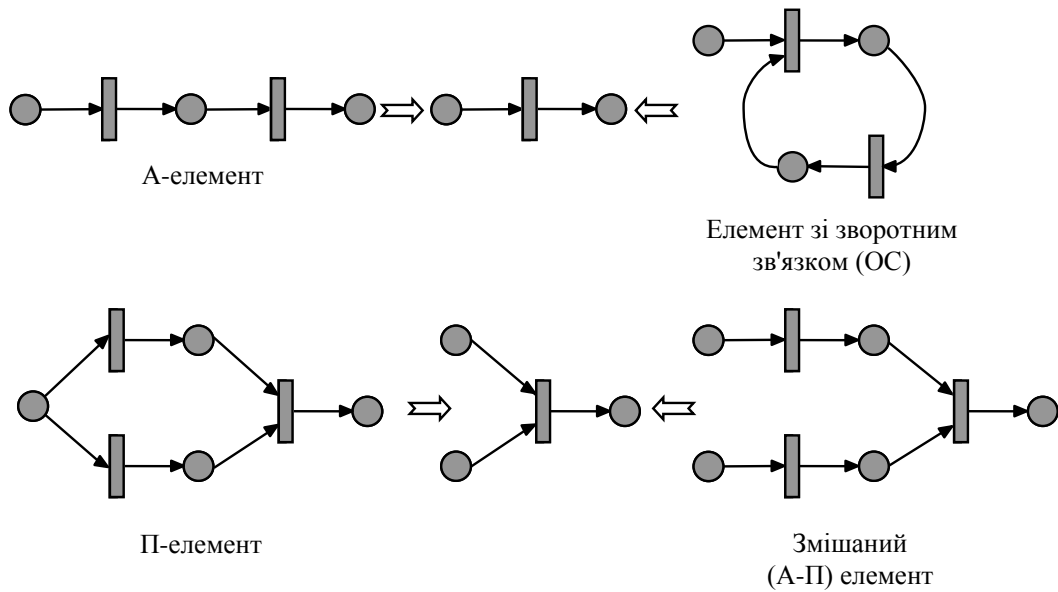


Рисунок 3 – Декомпозиція НП частини ДН АСУ

Перші два з них належать до аналітичних методів, останній є чисельним методом, який реалізується чисельним розв'язанням системи рівнянь (4) – (6).

У процесі аналізу ДП частини ДН-мережі можна виділити чотири класи підмереж (рис. 2), досяжність яких може бути легко встановлена, і провести їх заміну на еквівалентну підмережу згідно з правилами, показаними на рис. 2. Так, мережі 1, 2 і 3 замінюються на підмережу, що складається з переходу і однієї вхідної та однієї вихідної позиції, а підмережа 4 – на підмережу, що складається з переходу, двох вхідних і однієї вихідної позиції. Для НП частини ДН-мережі (рис. 3) виконуються аналогічні заміни: А-елемент, елемент зі зворотним зв'язком – на елемент, представлений підмережею, що складається з переходу і однієї вхідної та однієї вихідної позиції, а П-елемент і змішаний елемент – на елемент, представлений підмережею, що складається з переходу і двох вхідних і однієї вихідної позиції.

Перевагою аналітичних методів дослідження властивості досяжності є зменшення часу, що витрачається на обчислення, а також можливість проводити дослідження властивості досяжності без проведення чисельного моделювання системи, тобто на ранніх етапах побудови моделі; проте редукція-декомпозиція не завжди може дати потрібний результат. Перевагою чисельного методу є його універсальність застосування, однак необхідно відзначити його залежність від параметрів моделювання.

Аналітичний метод аналізу досяжності НП частини заснований на обчисленні матриці інцидентності та може бути записаний наступним чином.

1. Визначити матрицю інцидентності  $A_i^c$  модифікованого сигнального графа  $\Sigma_i$  структурного стану НП частини ДН АСУ.

2. Визначити вхідну матрицю  $A_i^{cl}$ . Вхідна матриця  $A_i^{cl}$  може бути отримана з матриці  $A_i^c$  шляхом заміни всіх її елементів « $a$ » на «0» з подальшою заміною « $-a$ » на « $a$ ».

3. Визначити вихідну матрицю  $A_i^{c0}$ . Вихідна матриця  $A_i^{c0}$  може бути отримана з матриці  $A_i^c$  шляхом заміни всіх її елементів «-  $\alpha$ » на «0».

4. Оскільки при роботі з СГ не використовується поняття нескінченного числа маркерів  $\alpha$ , то необхідно також замінити всі елементи  $\alpha$  матриць  $A_i^{cl}$  і  $A_i^{c0}$  на еквівалентні їм 1, які означають наявність зв'язку між вузлами СГ, також як і  $\alpha$  в МСГ. Після такої обробки матриць  $A_i^{cl}$  і  $A_i^{c0}$  отримаємо відповідно матриці  $A_i^{cl'}$  і  $A_i^{c0'}$ .

5. Визначити матрицю одиничних шляхів  $R_i$ . Матриця одиничних шляхів  $R_i$  може бути побудована об'єднанням матриць  $A_i^{cl'}$  і  $A_i^{c0'}$  в одну матрицю таким чином, щоб кожному рядку і кожному стовпцю відповідала одна вершина.

Матриця  $R_i$  записується наступним чином:

$$R_i = \begin{bmatrix} 0 & A_i^{cl'} \\ A_i^{c0'} & 0 \end{bmatrix}.$$

Матрицю  $R_i$  можна отримати також шляхом використання наступного твердження.

Твердження. Матриця  $R_i$  одиничних шляхів СГ може бути отримана за допомогою бінарного множення транспонованої вхідної  $A_i^{cl'}$  і вихідної  $A_i^{c0'}$  матриць:

$$R_i = A_i^{cl'} \cdot A_i^{c0'}.$$

Фактично, при реалізації даного підходу здійснюється зворотний перехід від МСГ, що представляє СГ у форматі мереж Петрі, до еквівалентного СГ, завдання досяжності для якого вже вирішено.

В основу визначення другого аналітичного методу аналізу властивості досяжності належить наступне: якщо для структурного стану  $\Sigma_i$  позиції-стоки  $p_i^c$ ,  $i = \overline{1, n}$ , позначені вихідними сигналами  $x_i^c$ , досяжні з позицій-витоків  $p_j^c$ ,  $j = \overline{1, n}$ , позначених вхідними сигналами  $u_j^c$ , то система в структурному стані  $\Sigma_i$  досяжна.

Твердження. Якщо  $p_i^c(x_i^c)$  досяжна з  $p_j^c(x_j^c)$  та мітка позиції  $p_i^c \in \mu(p_i^c) = \alpha$ , то тоді  $\mu(p_j^c) = \alpha$ . Іншими словами, в даному випадку існує шлях з  $p_j^c$  в  $p_i^c$ .

Як відомо, застосування аналітичного методу аналізу досяжності не вимагає розв'язання системи рівнянь.

Розглянемо математичну схему ще однієї групи ДН АСУ. У цьому разі розглядається тільки її теоретико-множинне уявлення, тоді в просторі станів  $(x^a(t_0), x^d(t_0))$ , цю систему можна представити формулами:

$$\begin{aligned} x^a(t_{k+1}) &= x^a(t_k) + A_o^a v^a(t_k) + \bar{u}^d(t_k), \\ x^d(t_{k+1}) &= x^d(t_k) + A^d \delta(t_k), \\ x^a(t_0) &= x_0^a, \quad x^d(t_0) = x_0^d, \quad \bar{u}^d(t_0) = \bar{u}_0^d. \end{aligned} \tag{7}$$

У разі подання системи (7) при переведенні з стану  $(x_I^c = a, x_0^d)$  в стан  $(x_{I,r}^c = a, x_r^d)$  вона буде досяжною, якщо знайдуться такі якісні властивості НП і ДП частин системи, виконання яких при керуючому впливі  $U = (u_I^d(t_k), u_o^d(t_k))$  робить такий перехід можливим.

Дискретно-неперервний метод управління, реалізований в ДН АСУ, є кінцевою множиною операцій, на якій формуються бінарні відносини прямування і паралелізму режимів логічного управління. Визначено особливості розглянутих ДН АСУ. Модель багаторежимної ДН АСУ повинна відображати всі переходи від режиму до режиму для кожної технологічної величини  $X^c(t)$  під дією всіх можливих значень керуючих впливів  $u^c(t)$ ,  $u^d(t)$  і технологічних умов  $\rho_1(x^c(t), x^d(t))$ . Виділимо основні умови, яким повинна задовольняти ДП частина ДН АСУ.

1. Будь-яка операція може бути повторно розпочата тільки після свого завершення, тобто виключається ініціювання операції під час її виконання.

2. Дискретний процес, розпочавшись, завжди повинен бути доведений до кінця. В ході його виконання не повинно виникати «тупикових» ситуацій, які не мають продовження.

Перехід з одного структурного стану  $\Sigma_i$  в інший структурний стан  $\Sigma_j$  станеться, якщо неперервний стан  $x^c(t)$  потрапляє в перехідну множину  $x(t) \in \bar{X}_{ij}$ , де  $\bar{X}_{ij} = \bar{X}_i \cap \bar{X}_j$ ,  $x^c = R^n = \bigcup_{i=0}^N \bar{X}_i$  – простір станів неперервної складової,  $\bar{X}_0$  – область простору  $x^c$ , яка є досяжною з початкового стану  $x_0^c$  в структурному стані  $\Sigma_0$ . Позначимо область досяжності ДН АСУ у початковому структурному стані  $\Sigma_0$  наступним чином:  $\bar{X}_0 = \bar{X}_0(x_{n,1}^c, x^d(t_0))$ . Область досяжності структури представимо в наступному вигляді в загальному випадку подання:  $\bar{X}_i = P_i(\bar{X}_{i-1}(x_{H,i}^c), x^d(t_1))$ .

Визначення 3. Предикативна функція  $\rho_m(x^d(t^h), x^c(t))$  є істинною, якщо для описувача  $d_1(x_i^c(t))$  змінної  $x_i^c(t)$ , виконується  $d_1(x_i^c(t))$ :  $\mu(p_i^c) = a$ , при цьому в ДС частині формується  $u^d(t_k)$  умова переходу з  $\Sigma_i$  в  $\Sigma_{i+1}$ .

Визначення 4. Дискретно-неперервна множина досяжності ДН-мережі є операційно обчислювана множина чотирьох кортежів

$$(x_v^d(t_k), x^d(t_l), x_{H,v}^c), \rho(x^d, x^e(t_l)) = 1; x_{v+1}^d(t_{k+1})).$$

Розроблений метод аналізу досяжності стану ДН-системи полягає в наступному.

1. Формування структури  $\Sigma_i$  НП підсистеми. Формування матриці інцидентності  $A_{H_i}^e$  для структури  $\Sigma_i$ .

2. Перевірка досяжності структури  $\Sigma_i$  (на основі аналізу  $R_i$ , на основі аналізу  $A_{H_i}^e$  або редукції-декомпозиції структури  $\Sigma_i$ ).

3. Перевірка істинності умови  $\rho(x^d(t_k), x_i^e(t)) = 1$ . При виконанні істинності предикатної функції, проводиться перевірка умови  $\rho(x^d(t_k), x_i^e(t)) = \rho_m$ , при виконанні якої робиться висновок про досяжність стану, в іншому випадку – визна-

чається новий вектор стану  $x_{v+1}^d(t_{k+1})$  (проводиться редукція-декомпозиція ДС підсистеми), при цьому автоматично формується  $\bar{y}^d(t_k)$ ; і процес дослідження повторюється.

Таким чином, на ранніх етапах розробки ДН системи може бути використаний розроблений аналітичний метод аналізу властивості досяжності. Даний метод дозволяє істотно скоротити час аналізу досяжності, а саме, у 8 – 14 разів у порівнянні з аналізом досяжності за допомогою чисельного експерименту, що має істотне значення при оптимальному синтезі ДН АСУ і дозволяє істотно скоротити час її розробки.

**У четвертому розділі** розроблено та досліджено базові ІТ моделювання та аналізу властивості досяжності ДН АСУ, проведено вбудовування їх в ІТ DCNET, що застосовується при розробці АСУ, а також наведено результати розробки моделі ДН АСУ пакетної установки для випарювання розчину хлористого натрію, розробленої з використанням ІТ моделювання та аналізу властивості досяжності.

Розроблений метод моделювання ДН об'єктів полягає в наступному.

1. Проводиться ініціалізація системи з обчисленням початкового маркування дискретної і неперервної частин системи.

2. При необхідності проводиться аналіз властивості досяжності за допомогою аналітичного методу.

3. Проводиться виділення поточної структури неперервної частини системи, при цьому обчислюються умови спрацьовування переходів, що структурно управляються.

4. Для активних неперервних, дискретно-неперервних переходів, а також переходів, що структурно управляються, проводиться обчислення значень вихідних сигналів на поточний момент часу.

5. Значення неперервних сигналів, обчислених на попередньому етапі передаються позиціям.

6. Обробляються умови спрацьовування неперервно-дискретних переходів, формується пов'язані з цим зміни дискретних маркерів. Якщо змін немає, то тоді етапи 4 і 5 повторюються з новими значеннями поточного часу до виявлення таких змін, інакше проводиться обробка дискретних переходів і позицій. У результаті виходить нова дискретна розмітка, на підставі якої формується нова структура, яка і обробляється на другому етапі. При дослідженні властивості досяжності на даному етапі проводиться порівняння поточної розмітки з заданою, на підставі результатів якого робиться висновок про досяжності заданого стану.

Розроблено ІТ моделювання ДН АСУ, засновану на запропонованому методі моделювання. Для моделювання подієвої складової використовується обчислення вектора спрацьовування дискретної мережі Петрі та обчислення дискретного управляючого впливу на переходи, що структурно управляються. Для моделювання неперервної частини системи, що досліджується, були реалізовані методи Ейлера та Рунге-Кутта четвертого порядку, за допомогою яких здійснюється моделювання сигналів, що обробляються неперервними переходами або

переходами мережі, що структурно управляються. Зворотний зв'язок між ними забезпечується за допомогою роботи неперервно-дискретних і дискретно-неперервних переходів. При проведенні моделювання проводиться візуалізація вихідних сигналів стану системи (неперервного  $x^c(t)$  і дискретного  $x^d(t_k)$ ), а також зміни стану маркування дискретних позицій та зміни маркування  $a$  в неперервних позиціях.

Для виконання аналізу властивості досяжності розроблено відповідну ІТ. Ця ІТ передбачає два режими роботи аналізатора. В аналітичному режимі на підставі скомпільованої моделі системи аналіз проводиться відповідно до алгоритму, наведеному на рис. 4. В результаті роботи аналізатора формується матриця інцидентності і робиться висновок про досяжність. В режимі повномасштабного моделювання проводиться накопичення ДН векторів розміток та порівняння їх із заданим, в результаті якого робиться висновок про досягнення заданого стану.

На основі розроблених базових ІТ була здійснена розробка модулів моделювання та аналізу властивості досяжності для ІТ моделювання і аналізу ДН АСУ DCNET.

ІТ моделювання і аналізу ДН АСУ DCNET, спрощена схема якої показана на рис. 5, розроблено для використання під ОС Microsoft Windows, для чого використано стандартні бібліотеки, механізми і технології, які входять до складу ОС сімейства Windows. Ця ІТ не пред'являє жорстких вимог до апаратного забезпечення комп'ютера, займає усього кілька мегабайт дискового простору (основний модуль) і може бути запущена в мінімальному варіанті практично на будь-якому комп'ютері, що дозволяє за своїми характеристиками встановити і запустити саму ОС серії MS Windows.

На підставі аналізу, проведеного в розділі 1, впливає, що прикладною проблемою, для реалізації якої розробляється ІТ, є забезпечення автоматизації процесу моделювання, аналізу властивостей, вирішення окремих завдань проектування і експлуатації складних технічних і соціально-економічних систем управління. Модель прикладної області розробляється на основі властивостей і особливостей ДН-мереж. Значущими одиницями мови є лінійні і нелінійні елементи, що застосовуються при побудові структурних схем автоматизованих систем управління і ДН-мереж, представлених умовними позначеннями та їх відображеннями, а саме, переходами і позиціями різних типів, зображених двовимірними образами і навантажених їх графічними і неграфічними атрибутами.

Словник мови включає в себе піктограми різних елементів і забезпечує можливість маніпуляції з об'єктами на екрані, зокрема, заміни досліджуваної частини системи макропереходом. В результаті забезпеченої універсальності і гнучкості розроблена ІТ дозволяє проводити моделювання систем, представленими окремими випадками ДН-мереж, а також близькими до них мовними засобами (СГ, МСГ, СП, розширення СП, систем лінійних і нелінійних диференціальних рівнянь). При проведенні набору схеми системи, що досліджується, проводиться попередня перевірка коректності поширених елементів і сполук. Також передбачена робота з макропереходами на декількох

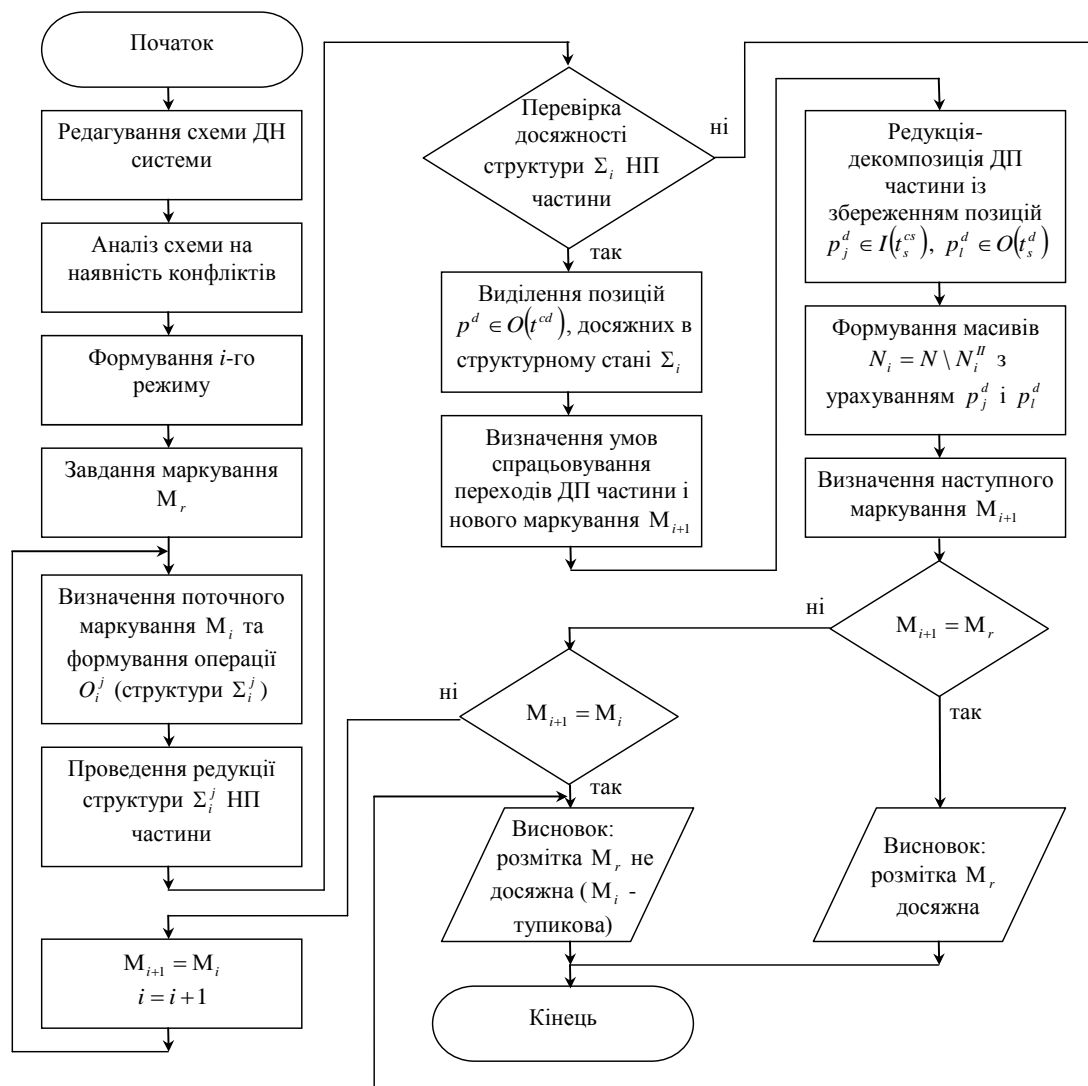


Рисунок 4 – Алгоритм аналітичного методу аналізу властивості досяжності

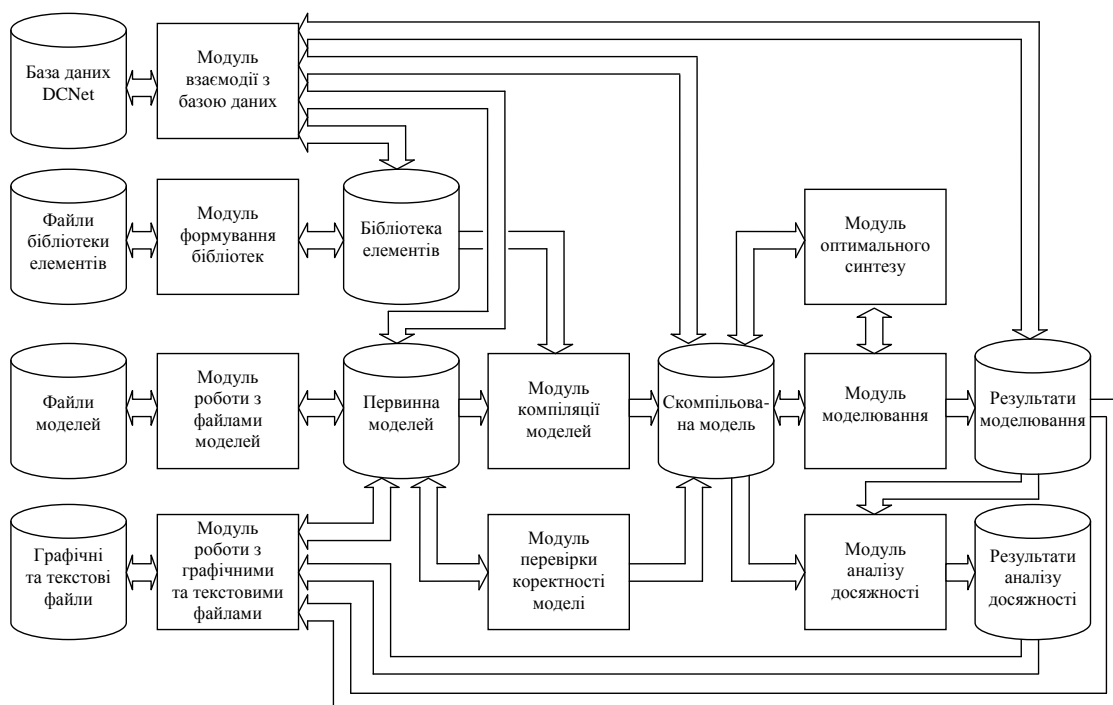


Рисунок 5 – ІТ моделювання і аналізу ДН АСУ



рівнях ієрархії ДН-мережі, коли окремі схеми підсистем можуть зберігатися в окремих файлах бібліотек елементів і підключатися по мірі необхідності. При відсутності серед елементів необхідних математичних і логічних формул вони можуть створюватися завдяки відповідним універсальним елементам з можливістю сумісності моделей із забезпеченням контролю версій.

Під час реалізації модуля моделювання і структур зберігання даних враховано вимоги до зменшення витрат машинних ресурсів. Застосовано засоби скорочення обсягів використаної оперативної пам'яті і прискорення обчислень.

В умовах дотримання заздалегідь обумовлених обмежень на застосування моделі і методу забезпечується перехоплення та обробка можливих помилок користувача.

Для доступу до даних в ІТ DCNET використовується реляційна база даних, що працює під управлінням вільно розповсюдженого сервера PostgreSQL, забезпечує фізичну та логічну незалежність даних. Сукупність таблиць утворює єдину базу даних DCNET, яка є єдиною для всіх систем комплексу. Необхідно також відзначити, що для організації автономного функціонування кожної з окремих систем ІТ DCNET архітектура передбачає наявність крім інтерфейсу роботи з базою даних інтерфейс роботи з окремими файлами. У файлі може бути збережена вся інформація, яка зазвичай зберігається в базі даних системи. Такий підхід дозволяє підвищити надійність всієї ІТ в цілому.

В якості прикладу досліджується розроблена за допомогою ІТ DCNET, в яку попередньо були вбудовані базові ІТ моделювання та аналізу властивості досяжності, ДН АСУ пакетної установки для випарювання розчину хлористого натрію.

Під час проведення аналізу результатів моделювання за допомогою розробленої ІТ моделювання та аналізу властивості досяжності ДН АСУ було зазначено, що час, витрачений на моделювання, становив для моделі установки випарювання розчину хлористого натрію 700 мс. Час проведення аналізу властивості досяжності аналітичним методом становив 50 мс. Час розробки системи за допомогою ІТ DCNET при використанні розроблених модулів скоротився на 30%, а також якість продукції підвищилася на 6 – 7%.

## ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі вирішена важлива наукова задача, яка полягає в розробці та дослідженні моделей, методів для інформаційної технології моделювання і оцінки досяжності дискретно-неперервних автоматизованих систем, моделі яких синтезовані на базі мереж Петрі і дискретно-неперервних мереж.

1. Сучасні автоматизовані системи управління часто є дискретно-неперервними, що дозволяє поєднувати в собі переваги як аналогових, так і цифрових систем, нівелюючи їх недоліки. Ці системи застосовуються в різних галузях народного господарства, де потрібна висока оперативність і ефективність, таких як системи реального часу.

2. Показано, що інформаційні технології моделювання і аналізу дискретно-неперервних систем, наявні на сьогоднішній день, не забезпечують необхідну для потреб практики якість моделювання. Крім того, одне з важливих завдань аналізу вимагає великого часу при оптимальному синтезі системи. У зв'язку з цим було обрано напрямок, який дозволяє зменшити ці недоліки за допомогою використання методів редукції-декомпозиції. Розробка моделей та інформаційних технологій моделювання проводиться на базі ДН-мереж.

3. Розроблено і досліджено дискретно-неперервну модель шляхом розширення форм подання дискретно-неперервної мережі при введенні додаткових дискретно-неперервного і дискретного нечіткого переходів, що дозволяє поліпшити якість моделювання за показником нормованої середньоквадратичної помилки в 5 разів у порівнянні з аналоговою та в 7 разів у порівнянні з цифровою. Дана модель дозволила провести розробку методу перетворення сигнального графа об'єкта моделювання в модель, представлену мережею Петрі.

4. Розроблений модифікований сигнальний граф і методи представлення його у вигляді мереж Петрі, дозволив розробити метод аналізу властивості досяжності та розширів область його застосування порівняно з використанням тільки редукції-декомпозиції.

5. Розроблені аналітичний метод аналізу досяжності дискретно-неперервною мережі на основі редукції-декомпозиції дискретно-подієвої частини та декомпозиції неперервно-подієвої частини і окремо дискретно-подієвої частини, а також чисельний метод аналізу досяжності, який передбачає реалізацію моделювання  $i$ -го режиму системи до збігу поточного стану із заданим станом. Розробка аналітичного методу дозволила забезпечити проведення аналізу властивості досяжності на ранніх етапах розробки і зменшити час аналізу у середньому в 14 разів порівняно з чисельним методом.

6. Розроблені базові інформаційні технології, спрямовані на моделювання та аналіз складних технічних об'єктів з багаторежимним характером функціонування, вбудовано в інформаційну технологію DCNET для моделювання дискретно-безперервних систем та аналізу властивості досяжності. Інформаційна технологія DCNET базується на розробленій дискретно-неперервній моделі і запровадженні спеціального етапу дослідження досяжності заданих станів, що дозволяє підвищити якість моделювання і скоротити час аналізу. Проведений порівняльний аналіз результатів моделювання з системою MATLAB показав нормовану середньоквадратичну помилку менш 1%. Аналіз витраченого часу дослідження властивості досяжності показав його зменшення при застосуванні аналітичного методу в 14 разів порівняно з чисельним методом.

7. Інформаційна технологія DCNET використана при розробці дискретно-неперервної автоматизованої системи управління установки для випарювання розчину хлористого натрію. Для розробленої системи було проведено моделювання системи і аналіз властивості досяжності за допомогою аналітичного і чисельного методів. Результати дисертаційної роботи апробовані та впроваджені також в навчальний процес кафедри «Комп'ютерні системи» Одеського національного політехнічного університету та в НВП «ХАРТРОН-ЕНКОС» і НВКЦ «ОДІС-*W*», де використані при розробці та оптимізації системи контро-

лю міського освітлення СПРУТ. Застосування розроблених інформаційних технологій дозволило скоротити час розробки на 30% і покращити якість обладнання на 6 – 7%.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ РОБІТ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

### *Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації*

1. Денисенко, В. А. Аналитическое представление дискретно-непрерывных сетей в системах автоматического проектирования / В.А. Денисенко, А.Г. Нестерюк // Холодильная техника и технология. – 1998. – № 1. Вып. 58. – С. 88 – 92.
2. Денисенко, В. А. Визуализированная программная среда моделирования дискретно-непрерывных сетей / В.А. Денисенко, А.Г. Нестерюк // Электромашинобудування та електрообладнання. – 2004. – № 63. – С. 116 – 121.
3. Денисенко, В. А. Дискретно-непрерывная сеть как средство моделирования сложных технических систем / В.А. Денисенко, А.Г. Нестерюк, А.А. Гурский // Холодильная техника и технология. – 2004. – № 4. – С. 54–58.
4. Денисенко, В. А. Достижимость гибридной системы / В.А. Денисенко, А.Г. Нестерюк // Холодильная техника и технология. – 2005. – № 3. – С. 67 – 74.
5. Денисенко, В. А. Задача достижимости гибридной системы / В.А. Денисенко, А.Г. Нестерюк // Тр. Одес. политехн. ун-та. – Одесса: ОНПУ, 2005. – Вып. 1 (23). – С. 67 – 74.
6. Денисенко, В. А. Исследование достижимости непрерывной части гибридной системы / В.А. Денисенко, А.Г. Нестерюк // Тр. Одес. политехн. ун-та. – Одесса: ОНПУ, 2003. – Вып. 1 (19). – С. 112 – 115.
7. Денисенко, В. А. Исследование задачи достижимости сложной системы с использованием графического программирования. / В.А. Денисенко, А.Г. Нестерюк // Тр. Одес. политехн. ун-та. – Одесса: ОНПУ, 1999. – Вып. 2 (8). – С. 10 – 13.
8. Денисенко, В. А. Модуль проверки достижимости дискретно-непрерывных сетей / В.А. Денисенко, А.Г. Нестерюк // Наукові праці ОНАХТ. – Одеса, 2004. – Вып. 27. – С. 130 – 137.
9. Денисенко, В. А. Программная среда моделирования систем с управляемой структурой / В.А. Денисенко, А.Г. Нестерюк, В.В. Ляхин // Тр. Одес. политехн. ун-та. – Одесса, 1998. Вып. 2 (6). – С. 17 – 20.
10. Нестерюк, А. Г. Анализ моделирования химического реактора как логико-динамической системы. / А.Г. Нестерюк, А.А. Гурский, А.В. Денисенко // Электронные и компьютерные системы. – 2014. – № 14(90). – С. 124 – 130. [Издательство включено в МНБ – Index Copernicus International, Ulrich's Periodicals Directory, Electronic Journals Library, РИНЦ, ВИНТИ РАН]

*Наукові праці апробаційного характеру*

11. Денисенко, А. В. К вопросу о включении САПР сложных технических объектов в систему дистанционного обучения / В.А. Денисенко, А.Г. Нестерюк // Матеріали XV міжнар. наук.-метод. конф. «Управління якістю підготовки фахівців», м. Одеса, Україна, 22 – 23 квітня 2010 р. Ч. I. – Одеса: ОДАБА, 2010. – С. 41 – 43.
12. Денисенко, А. В. САПР гибридных систем / В.А. Денисенко, А.Г. Нестерюк // Современные информационные и электронные технологии (СИЭТ-2002): труды 3-й междунар. научно-практ. конф., г. Одесса, Украина, 21 – 24 мая 2002 г. – Одесса: ОНПУ, 2002. – С. 92.
13. Денисенко, В. Програма моделювання дискретно-неперервних мереж в середовищі MS Windows. / В. Денисенко, Т. Денисенко, А. Нестерюк, В. Ляхин // Тезис. докл. 1-й международной школы по моделированию (AUTUMN'96), г. Алушта, Украина, 12 – 14 сентября 1996 г. – Алушта, 1996. – С. 39.
14. Денисенко, В. А. Визуальная среда моделирования производственных процессов / В.А. Денисенко, А.Г. Нестерюк // Современные информационные и электронные технологии (СИЭТ-2003): труды 4-й междунар. научно-практ. конф., г. Одесса, Украина, 19–23 мая 2003 г. – Одесса: ОНПУ, 2003. – С. 140.
15. Денисенко, В. А. Достижимость одного класса систем с управляемой структурой / В.А. Денисенко, Х.-М. Ханиш, В.В. Вяткин, А.Г. Нестерюк // IX Міжнародна конференція з автоматичного управління (Автоматика-2001): Тези доповідей 9-ї міжнар. наук.-техн. конф., м. Одеса, Україна, 10 – 14 вересня, 2001 р. – Одесса, 2001. – С. 26 – 27.
16. Денисенко, В. А. Использование программной среды DCNET для исследования систем с управляемой структурой / В.А. Денисенко, А.Г. Нестерюк, В.В. Ляхин // В кн. Моделирование в прикладных научных исследованиях. Материалы IV семинара. – Одесса: ОГПУ. – 1997. – С. 9–11.
17. Денисенко, В. А. Компьютерное моделирование гибридных систем / В.А. Денисенко, А.Г. Нестерюк // Друга міжнар. наук.-метод. конф. «Сучасні технології вищої освіти». – Одеса, 2003. – С. 37.
18. Денисенко, В. А. Математическое и программное обеспечения определения достижимости гибридных систем / В.А. Денисенко, А.Г. Нестерюк // XIII Міжнародна конференція з автоматичного управління (Автоматика-2006): Тези доповідей 13-ї міжнар. наук.-техн. конф., м. Вінниця, Україна, 25 – 28 вересня, 2006 р. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2006. – С. 19.
19. Денисенко, В. А. Нечеткие дискретно-непрерывные сети и среда их моделирования / В.А. Денисенко, А.В. Денисенко, А.Г. Нестерюк // XV Міжнародна конференція з автоматичного управління (Автоматика-2008): Тези доповідей 15-ї міжнар. наук.-техн. конф., м. Одеса, Україна, 23 – 26 вересня, 2008 р. – Одесса, 2008. – С. 154 – 155.
20. Денисенко, В. А. Определение условий достижимости в гибридных системах / В.А. Денисенко, А.Г. Нестерюк // Кораблебудування: освіта, наука, виробництво: Матеріали міжнар. конф., Миколаїв, Україна, 24 – 25 вересня 2002 р. Т. II. – Миколаїв, 2002. – С. 232 – 233.

21. Денисенко, В. А. Средства моделирования сложных технологических процессов / В.А. Денисенко, А.Г. Нестерюк, А.А. Гурский // Тез. докл. 61-й научно-техн. конф. профессорско-преподавательского состава. – Одесса, 2004.
22. Денисенко, В. А. Формализм свертки сложных систем / В.А. Денисенко, А.В. Кобушко, А.Г. Нестерюк, Т.А. Денисенко // Тез. докл. семинара «Информационные системы и технологии». – Одесса, 2003. – С. 33.
23. Нестерюк, А. Г. Использование сервера баз данных Postgres для организации взаимодействия элементов САПР DCNET / А.Г. Нестерюк // Современные информационные и электронные технологии (СИЭТ-2012): труды 13-й междунар. научно-практ. конф., г. Одесса, Украина, 4 – 8 июня 2012 г. – Одесса: ОНПУ, 2012. – С. 67.
24. Нестерюк, А.Г. Использование серверов баз данных при разработке САПР сложных систем / А.Г. Нестерюк // Современные информационные и электронные технологии (СИЭТ-2011): труды 12-й междунар. научно-практ. конф., г. Одесса, Украина, 23 – 27 мая 2011 г. – Одесса: ОНПУ, 2011. – С. 66.
25. Нестерюк, А. Г. Модуль моделирования САПР технических систем / А.Г. Нестерюк // Современные информационные и электронные технологии (СИЭТ-2010): труды 11-й междунар. научно-практ. конф., г. Одесса, Украина, 24 – 28 мая 2010 г. Т. I. – Одесса: ОНПУ, 2010. – С. 176.
26. Нестерюк, А. Г. Подходы к сокращению объема вычислений при решении задачи достижимости систем с управляемой структурой / А.Г. Нестерюк // Современные информационные и электронные технологии (СИЭТ-2009): труды 10-й междунар. научно-практ. конф., г. Одесса, Украина, 18 – 22 мая 2009 г. Т. I. – Одесса: ОНПУ, 2009. – С. 70.
27. Нестерюк, А. Г. Построение САПР с управляемой структурой / А.Г. Нестерюк // Современные информационные и электронные технологии (СИЭТ-2008): труды 9-й междунар. научно-практ. конф., г. Одесса, Украина, 19 – 23 мая 2008 г. Т. I. – Одесса: ОНПУ, 2008. – С. 170.
28. Нестерюк, А. Г. Практическая реализация модуля исследования достижимости дискретно-непрерывных сетей / А.Г. Нестерюк // Современные информационные и электронные технологии (СИЭТ-2007): тр. 8-й междунар. научно-практ. конф., г. Одесса, Украина, 21–25 мая 2007 г. – Одесса: ОНПУ, 2007. – С. 87.
29. Нестерюк, А. Г. Разработка программной среды анализа достижимости сложных систем / А.Г. Нестерюк // Тези доп. IV міжнар. наук.-практ. конф. студентів, аспірантів та молодих вчених «Системний аналіз та інформаційні технології», м. Київ, Україна, 1 – 3 липня 2004 г. – Київ, 2004. – С. 147 – 148.
30. Denisenko, V. Vergleich grafischer Programmtools zur Simulation diskret-kontinuierlicher System / V. Denisenko, H. Ehrlich, A. Nesteryuk, A. Ilchenko // 45<sup>th</sup> International Scientific Colloquium, Imenau Technical University. – 2000. – P. 472 – 479.

***Наукові праці, які додатково відображають результати дисертації***

31. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір. Комп'ютерна програма «Дискретно-непрерывные сети (DCNET)» / В.А. Денисенко, А.Г. Нестерюк. – №33728; дата реєстрації 15.06.2010.

## АНОТАЦІЯ

Нестерюк О.Г. Інформаційна технологія моделювання і аналізу дискретно-неперервних автоматизованих систем управління. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.06 – Інформаційні технології. – Одеський національний політехнічний університет Міністерства освіти і науки України, Одеса, 2016.

Дисертація присвячена розробці і дослідженню моделей, методів та інформаційної технології моделювання і аналізу дискретно-безперервних автоматизованих систем управління на базі мереж Петрі і дискретно-неперервних мереж для підвищення якості моделювання та скорочення часу аналізу властивості досяжності. Отримала подальший розвиток дискретно-неперервна модель автоматизованих систем управління, яка відрізняється введенням дискретно-неперервних і стохастичних переходів. Розроблено метод перетворення сигнального графа в модель, що представлена мережею Петрі. Розроблено метод та інформаційну технологію аналізу досяжності, які відрізняються використанням сигнального графа і виконанням редукції-декомпозиції мереж. Отримали подальший розвиток метод та інформаційна технологія моделювання дискретно-неперервних об'єктів.

**Ключові слова:** дискретно-неперервна мережа, мережа Петрі, дискретно-неперервна система, гібридна система, досяжність, моделювання.

## ABSTRACT

Nesteruk A. G. Information technology modelling and analysis of discrete-continuous automated control systems. – Manuscript.

The dissertation for a candidate of technical Sciences (Ph.D.) degree in specialty 05.13.06 – Information technology. – Odessa national polytechnic university of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Odessa, 2016.

The thesis is devoted to the development and research of models, methods and informational technologies of modeling and analysis of discrete-continuous automated control systems based on Petri nets and discrete-continuous networks to improve the quality of the simulation and reducing the time of analysis properties reachability. A further development of discrete-continuous model systems with controlled structure, which is distinguished by the introduction of discrete-continuous and stochastic transitions. A method of converting a signal graph in the model represented by a Petri net. Also developed method and information technology of the analysis of the reachability, which is characterized by using the signal graph and the implementation of a reduction-decomposition networks. A further development of the method and information technology of modeling of discrete-continuous objects.

**Keywords:** discrete-continuous net, Petri net, discrete-continuous system, hybrid system, reachability, simulation.

## АННОТАЦИЯ

Нестерюк А.Г. Информационная технология моделирования и анализа дискретно-непрерывных автоматизированных систем управления. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.06 – Информационные технологии. – Одесский национальный политехнический университет Министерства образования и науки Украины, Одесса, 2016.

Диссертация посвящена разработке и исследованию моделей, методов и информационной технологии моделирования и анализа дискретно-непрерывных автоматизированных систем управления на базе сетей Петри и дискретно-непрерывных сетей для повышения качества моделирования и сокращения времени анализа свойства достижимости. Исходя из этого, было выполнено исследование математических моделей и методов, которые используются в автоматизированных системах управления. Получила дальнейшее развитие дискретно-непрерывная модель дискретно-непрерывных систем автоматизированного управления, которая отличается введением дополнительных компонентов: дискретно-непрерывных и стохастических переходов, что позволило повысить качество моделирования. Разработан метод преобразования сигнального графа объекта моделирования в модель системы, представленной сетью Петри, который отличается введением формального соответствия между элементами сигнального графа и элементами сети Петри, что позволило разработать метод анализа свойства достижимости. Разработан метод и информационная технология анализа достижимости состояния дискретно-непрерывной системы, который отличается использованием сигнального графа и выполнением редукции-декомпозиции сетей в дискретно-непрерывном пространстве, что обеспечивает проведение исследования достижимости систем с управляемой структурой на ранних этапах разработки системы и позволяет уменьшить время анализа. Получили дальнейшее развитие метод и информационная технология моделирования дискретно-непрерывных объектов, которые базируются на разработанной дискретно-непрерывной модели и отличаются введением специального этапа исследования достижимости заданных состояний, что позволяет повысить качество моделирования и сократить время моделирования и анализа.

Объектом исследования в данной работе является процесс имитационного моделирования и анализа сложных дискретно-непрерывных автоматизированных систем управления.

Предметом исследования являются модели, методы и информационные технологии моделирования и анализа дискретно-непрерывных автоматизированных систем управления на основе ДН-сетей.

Проведен анализ существующих дискретно-непрерывных систем автоматического управления, математических моделей и методов исследования сложных систем с управляемой структурой, тенденций развития современных моделей. Одним из выявленных недостатков подобных моделей является сложность проведения комплексного моделирования и исследования их свойств. В частно-

сти, существующие средства описания подобных объектов либо не имеют единых математических средств для описания дискретных и непрерывных частей системы, либо требуют значительных затрат для проведения исследования их свойств.

Разработанные базовые информационные технологии, направленные на моделирование и анализ сложных технических объектов с многорежимным характером функционирования, встроены в информационную технологию DCNET для моделирования дискретно-непрерывных систем и анализа свойства достижимости. Данная информационная технология внедрена в учебный процесс и экспериментально показала свою эффективность.

В результате проведенного эксперимента установлено, что разработанная программная среда DCNET позволяет проводить моделирование сложных систем с управляемой структурой и обеспечивает минимальное расхождение результатов по сравнению с такими распространенными системами, как MATLAB (меньше 1%).

**Ключевые слова:** дискретно-непрерывная сеть, сеть Петри, дискретно-непрерывная система, гибридная система, достижимость, моделирование.