

УДК 004.942:004.021

DOI: 10.15587/2313-8416.2016.77768

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ ПО ГЛОБАЛЬНОЙ СВЯЗНОСТИ В САПР

© А. Л. Становский, П. С. Швец, В. В. Бондаренко, А. В. Торопенко

Проанализированы проблемы проектирования, возникающие при многоцелевой оптимизации систем со слабо связанными аргументами. Выполнена классификация ограничений на оптимизирующие аргументы. Введено понятие «глобальная связность» как межпараметрическое ограничение, влияющее практически на все конструктивные и потребительские свойства системы. На примере электротехнического оборудования разработан метод оптимизации системы по глобальной связности, испытание которого обеспечило положительный технический эффект

Ключевые слова: оптимизирующие аргументы, ограничения, глобальная связность между аргументами систем, электротехническое оборудование

The design problems arising in multi-purpose optimization of systems with weakly bound arguments were analyzed. A classification of constraints on optimization arguments was done. The concept of "global connectivity" as interparametric limitation affecting virtually all the design and consumer properties of the system was introduced. Method of the global connectivity system optimization was developed on example of electrical equipment, which test provided a positive technical effect

Keywords: optimizing arguments, restrictions, global connectivity between arguments of the systems, electrical equipment

1. Введение

Факторов, влияющих на режим работы сложных технических систем, настолько много, что их выбор в качестве комплектующих для современных устройств, а, тем более, создание конструкций новых машин является одной из сложнейших задач проектирования [1, 2].

Решая эту задачу, приходится не только оптимизировать параметры машин с помощью моделей механических (напряжение, деформация в подвижных элементах), электромагнитных и тепловых полей, но и учитывать внешние стохастические, прогнозные воздействия на машину и технико-экономические аспекты ее проектирования, изготовления и эксплуатации. Перечисленные факторы порождают многомерные, многоэкстремальные и многокритериальные задачи оптимизации, решение которых, с одной стороны, позволяет применять более эффективные современные математические методы, а с другой, требует разработки и постоянного усовершенствования этих методов.

2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

В работах П. С. Швеца, Е. Ю. Лебедевой [3, 4], А. А. Перпери [5] сделан акцент на связях между ар-

гументами, выполнена классификация связности, показано, как многоцелевые связные задачи решаются методами эволюционной оптимизации. К сожалению, такие «интенсивные» методы (просто взаимное изменение границ ограничений) хороши для связей типа «две шестерни на одном валу», когда эти парные (или больше) связи не взаимодействуют между собой и никак не ограничивают возможности варьирования других аргументов.

Примером такой связности параметров является скольжение в асинхронных электродвигателях (АД) [6, 7]. Скольжение – это типичное ограничение глобального типа, так как оно связывает параметры различных материальных субстанций (поле и физический объект), принадлежащих к различным подсистемам объекта и оказывает существеннейшее значение практически на все его эксплуатационные характеристики [8, 9]. Обычно при расчетах оно «выбирается из таблиц» или просто проверяется на «приемлемое значение», что, в итоге, порождает далекие от оптимума конструкции. Расчет же оптимальных значений «по скольжению» ограничивается сегодня отсутствием соответствующих методов в действующих САПР и моделей, необходимых для реализации этих методов. Отсутствуют также оперативные методы экспериментальной оценки скольжения в АД, необ-

ходимые для подтверждения адекватности оптимизационных моделей.

В результате, проектирование объектов, оснащенных электродвигателями, может осуществляться в двух различных направлениях. Во-первых, при проектировании с последующим изготовлением нового, ранее не существовавшего электродвигателя. Работу в этом направлении можно считать весьма редкой, так как существующая богатая линейка готовых изделий подобного вида позволяет просто подобрать необходимый вариант для самых разнообразных потребительских нужд [10, 11]. Исключения могут составить такие уникальные, привязанные своей конструкцией к необычному объекту двигателя, как линейный [12], с внешним ротором [6], для уникальных приложений, например, космических аппаратов, где основным и единственным критерием качества двигателя является его масса [13], и другие, которые тоже можно отнести к категории редких. Во-вторых, при проектировании машин и аппаратов с готовыми покупными электродвигателями, выбор которых является лишь частью работы над проектом в целом [7, 14].

Любой из диапазонов мягкой связности параметров электрооборудования имеет свои пределы, иначе параметры становятся несвязанными. Действительно, скольжение асинхронных двигателей ограничивается несколькими процентами, скорость движения поручней эскалатора не должна отличаться от скорости движения ступеней более чем на 2 % [15] и т. п. Однако и в этих пределах изменение отклонения параметров могут оказать существенное влияние на результаты оптимизации.

При всем концептуальном различии направлений у них можно выделить одно общее свойство: создание по-настоящему оптимальных по каким-либо критериям устройств невозможно без учета тех конкретных условий, в каких предстоит работать электродвигателю. Такие условия чаще всего накладывают дополнительные, зачастую, жесткие связи между параметрами двигателя и среды, приводящие к существенным изменениям математических методов оптимизации в проектировании, особенно, автоматизированном, так как эти методы требуют большого объема компьютерных вычислений.

Эти связи могут быть представлены как дополнительные ограничения, учитываемые в процессе оптимизации конструкции [3], так и в качестве основных целевых функций оптимизации, позволяющих выполнить этот процесс глубже за счет выявления новых видов целевых функций и новых взаимодействий между аргументами. В конечном итоге, все это должно привлечь в процесс проектирования новые, ранее скрытые, связи и современные математические методы.

Примерами такой связности может служить соотношение скорости вращения магнитного поля статора и ротора асинхронного двигателя [16], скорости движения ступеней и перил в эскалаторах [15], параметров конструкции и технологии изготовления резиноталлических амортизаторов [4] и многое другое.

3. Цель и задачи исследования

Целью работы является повышение качества проектирования технических систем на примере оборудования, содержащего асинхронные электродвигатели, за счет использования параметров связности оптимизирующих аргументов в качестве целевой функции оптимизационных расчетов.

Для достижения этой цели в работе были решены следующие задачи:

– выполнена классификация ограничений и связности аргументов в задачах оптимизации сложных электротехнических систем;

– выполнена оптимизация сложной системы по связности на примере объекта «топливный электрогенератор – асинхронный электродвигатель».

4. Диапазон связности как целевая функция оптимизационных расчетов в проектировании

4.1. Классификация ограничений и связности аргументов в задачах оптимизации сложных электротехнических систем

Если рассматривать сложную систему, которую мы собираемся проектировать или которой мы предполагаем управлять в качестве цепочки связанных между собой элементов, то, как известно [17], в этой цепочке всегда есть «слабое звено», – некоторый элемент, ограничивающий эффективность решения оптимизационных задач в САПР и АСУ. Иногда при взаимозависимости параметров отдельных элементов слабое звено представляет собой кластер из связанных элементов, в которых уже сами связи можно рассматривать как «слабые звенья» системы в целом.

Классическая *одноцелевая* оптимизация в САПР предполагает наличие целевой функции, вектора оптимизирующих аргументов (их количество определяет размерность задачи), от которых эта функция зависит, формул или правил вычисления значения функции по значениям этих аргументов и, наконец, ограничений на область существования аргументов. При этом ограничения в САПР воспринимаются как некоторые «досадные» природные, ресурсные, юридические или прочие запреты на произвольное независимое варьирование аргументов проектировщиком в процессе оптимизации (назовем их *ограничениями первого рода – ОПР*) (рис. 1, а).

Связи между аргументами (*ограничения второго рода – ОВР*) в этом случае просто понижают размерность исходной задачи оптимизации, упрощая ее решение (рис. 1, б).

С другой стороны, существует большая группа сложных систем, в которых одна (глобальная) связь между аргументами доминирует над всеми остальными в том смысле, что она присутствует в наибольшем количестве решающих правил (формул и т. п.) в процессе оптимизации, ее выбор оказывает решающее влияние на объект в целом (рис. 1, в). В этом случае перспективным представляется постановка и решение обратной задачи, когда именно *величина связности становится оптимизирующим аргументом*, а остальные параметры существования системы в целом переводятся в список ограничений

первого или второго рода. В то же время, в реальных сложных технических системах (например, в электротехническом оборудовании) целевых функций всегда существует больше одной, например, стоимость и масса, размеры и надежность и т. п. Это порождает в САПР задачи *многоцелевой* оптимизации, не имеющие, в общем случае, однозначного решения. Это решение проектировщик вынужден выбирать из множества «приемлемых», например, множества Парето, что, с одной стороны, делает задачу «нечеткой» (нельзя математически доказать, что выбранное решение действительно оптимально), а с другой – создает новые возможности для расширения множества «приемлемых» решений [18].

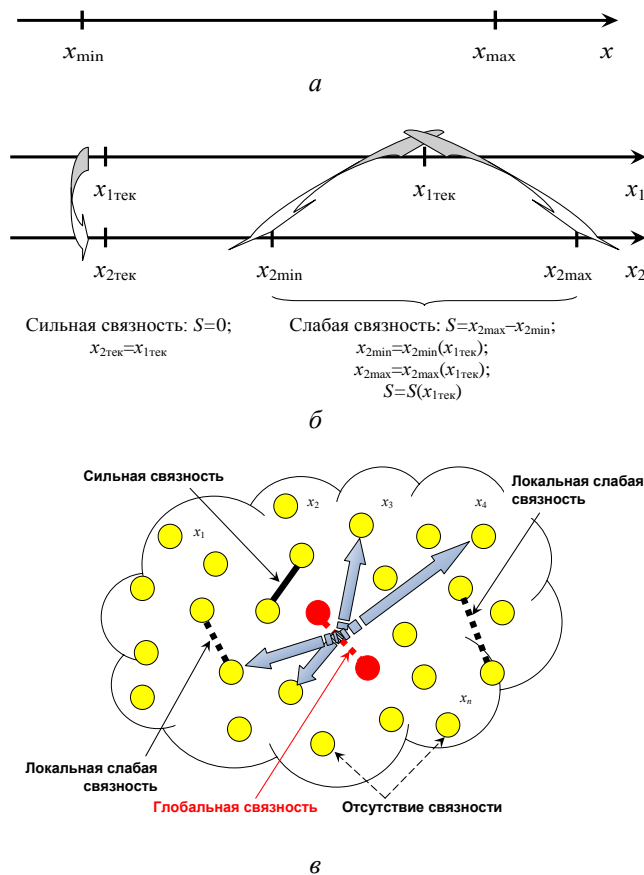


Рис. 1. Классификация ограничений при оптимизации связанных сложных технических систем: *а* – ограничения первого рода (ОПР); *б* – ограничения второго рода (ОВР); *в* – локальные и глобальная связности

4.2 Оптимизации сложной системы по связности на примере объекта «топливный электрогенератор – асинхронный электродвигатель».

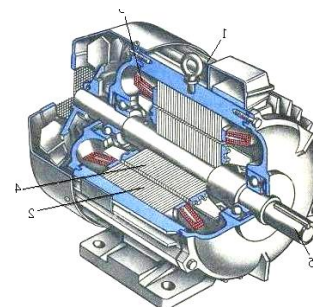
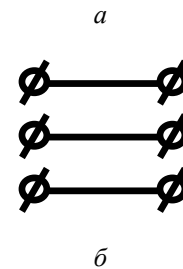
Рассмотрим в качестве примера систему системы «электрогенератор – электродвигатель» (рис. 2).

Пусть в этой системе подсистема «Топливный (дизельный) электрогенератор» покупная (ее проектирование состоит в выборе подходящей модели), а подсистема «Асинхронный электродвигатель» – подлежит проектированию в части оптимизации конструкции и основных электромеханических параметров.

На рис. 2 приведены также основные расчетные характеристики подсистем, причем, расход топлива генератором Q примем за естественную *целевую функцию оптимального проектирования*, а номинальный момент на валу M_H – техническим заданием на *потребительскую характеристику* системы в целом.



Параметры подсистемы: расход топлива, Q ; напряжение на выходе, U ; ток в ветвях, I ; частота на выходе, f



Параметры подсистемы: номинальный момент на валу, M_H ; частота вращения вала, n

в

Рис. 2. Объект проектирования в виде системы «электрогенератор – электродвигатель», соединенной трехфазной проводной связью, и его основные параметры: *а* – топливный (дизельный) электрогенератор; *б* – трехфазная мини ЛЭП; *в* – асинхронный электродвигатель

Максимальный электромагнитный момент M_m связан с номинальным следующим соотношением [8]:

$$M_m = \frac{3 \cdot p \cdot U_H^2}{4 \cdot \pi \cdot f_1 \left[r_1 + \sqrt{r_1^2 + (x_1 + x_2)^2} \right]} \frac{1}{M_H}, \quad (1)$$

где U_H – номинальное напряжение; p – количество полюсов электродвигателя; M_H – номинальный момент на валу двигателя; x_1 – индуктивное сопротивление рассеяния одной фазы обмотки статора; x_2 – индуктивное сопротивление рассеяния обмотки ротора; x_2' – приведенное индуктивное сопротивление рассеяния обмотки ротора; r_1 – активное сопротивление фазы обмотки статора, приведенное к расчетной рабочей температуре; r_2 – активное сопротивление обмотки ротора; r_2' – приведенное активное сопротивление обмотки ротора

Для оптимизации «по скольжению» определим далее его расчетное критическое значение:

$$S_{кр} = \frac{r_2'}{\sqrt{r_1^2 + (x_1 + x_2')^2}} \quad (2)$$

Так как скольжение по определению [8] рассчитывается по формуле:

$$S = (f - n) / f, \quad (3)$$

подставим (3) в (2) и получим значение критической частоты оборотов вала двигателя $n_{кр}$ при неизменной частоте питания сети f :

$$n_{кр} = f(1 - S_{кр}) = f \left(1 - \frac{r_2'}{\sqrt{r_1^2 + (x_1 + x_2')^2}} \right) \quad (4)$$

Зависимость момента на валу от скольжения рассчитаем по формуле Клосса [1, 8]:

$$M = M_m \frac{2 \left(1 + S_{кр} \frac{r_1}{r_2} \right)}{\frac{S}{S_{кр}} + \frac{S_{кр}}{S} + 2 \cdot S_{кр} \cdot \frac{r_1}{r_2}} \quad (5)$$

С учетом (3) зависимость (5) приобретает следующий вид:

$$M = M_m \frac{2 \left(1 + S_{кр} \frac{r_1}{r_2} \right)}{\frac{(f - n) / f}{S_{кр}} + \frac{S_{кр}}{(f - n) / f} + 2 \cdot S_{кр} \cdot \frac{r_1}{r_2}} \quad (6)$$

График зависимости $M(n)$, построенный по (6), при $U_H = 220$ В; $f = 50$ Гц; $p = 3$; $x_1 = 12,94$ Ом; $x_2' = 18,195$ Ом; $r_1 = 14,6$ Ом представляет собой кривую 1 на рис. 3. При уменьшении частоты генератора до $f = 45$ Гц такую зависимость представляет кривая 2 на рис. 3.

Как известно, работа A постоянной силы, приложенной к вращающемуся телу, равна произведению вращающего момента M на угол поворота φ :

$$A = M \cdot \varphi \quad (7)$$

Если работа совершается силой, приложенной к вращающемуся телу, и притом равномерно, то мощность в этом случае рассчитывается по формуле:

$$P = M \cdot n \quad (8)$$

Таким образом, мощность силы [Вт], приложенной к вращающемуся телу, равна произведению вращающего момента [Н·м] на угловую скорость [об/мин].

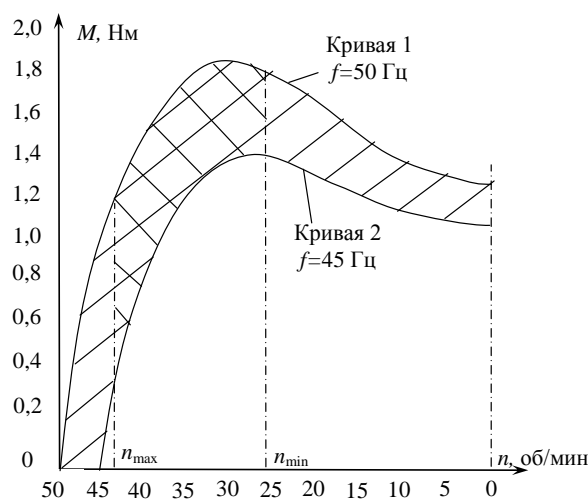


Рис. 3. Момент на валу АД в зависимости от частоты вращения вала при $f = 50$ Гц (кривая 1) и $f = 45$ Гц (кривая 2)

Физический смысл кривых на рис. 3 такой: площадь под ними представляет собой некоторую интегральную мощность $P_{инт}$, развиваемую асинхронным электродвигателем при изменении количества оборотов его вала (при неизменной частоте сети f) от n_{min} до n_{max} :

$$P_{инт} = \int_{n_{min}}^{n_{max}} M(n) dn, \quad (9)$$

а площадь между кривыми 1 и 2 – интегральное изменение мощности при переходе от частоты генератора 50 Гц к частоте 45 Гц.

Повышение момента на валу двигателя приводит не только к снижению числа его оборотов по формуле (6) (кривая 1, рис. 4). При недостаточной мощности генератора это, в свою очередь, приводит к падению частоты тока, вырабатываемого последним (кривая 2, рис. 4), и к срабатыванию частотной защиты [19], приводящему к увеличению мощности генератора за счет повышения расхода горючего.

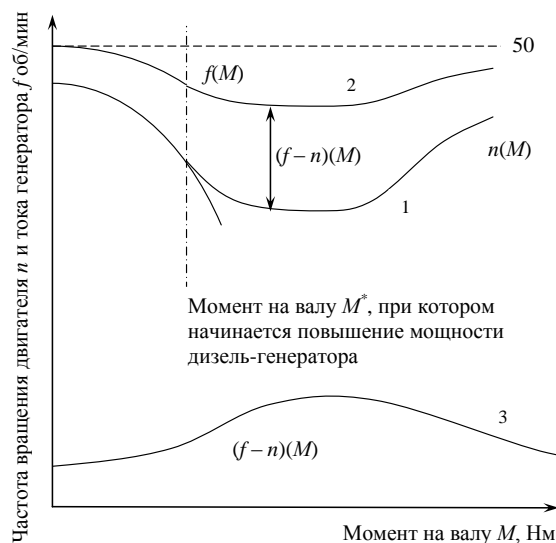


Рис. 4. Зависимости частот генератора f и двигателя n от момента на валу

Разница частот между кривыми 1 и 2 (кривая 3, рис. 4) имеет прямое отношение к скольжению (3), а зависимости, приведенные на рис. 3, 4 позволяют поставить и решить задачу оптимизации скольжения как глобальной связности в системе

«генератор – двигатель», где целевой функцией выступает расход горючего [20]. В работе в рамках САПР такую задачу решали методом скользящего окна, блок-схема алгоритма которого приведена на рис. 5 [18].

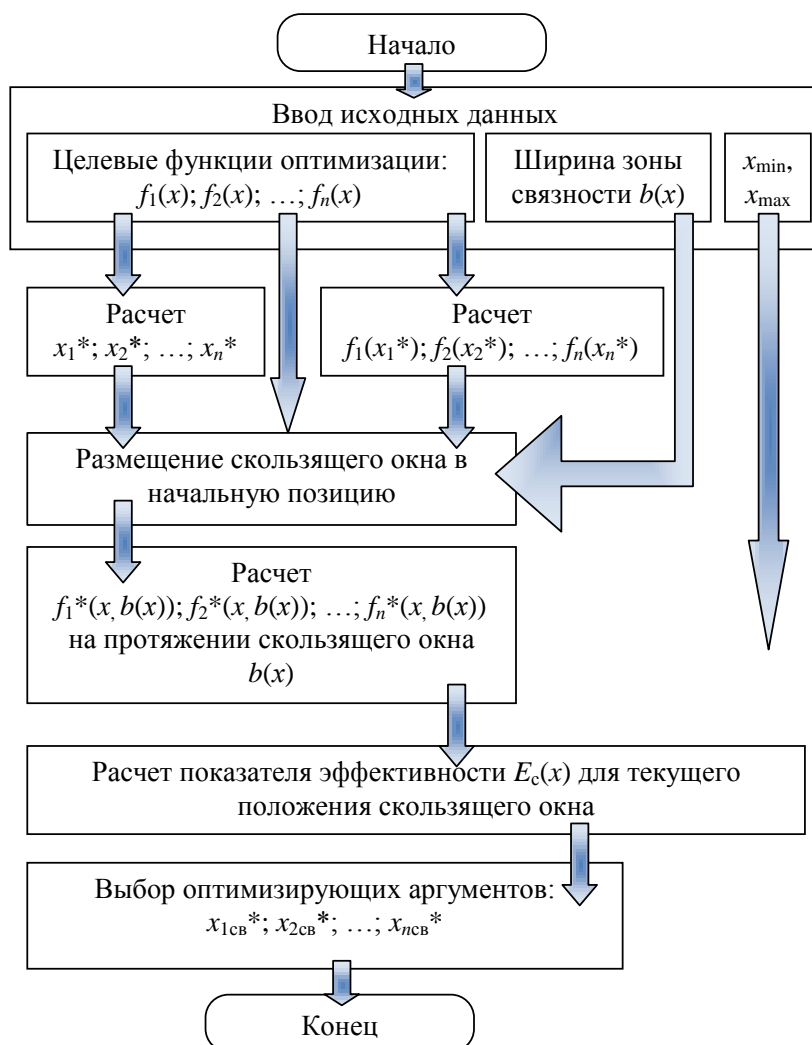


Рис. 5. Блок-схема алгоритма оптимизации систем со слабосвязанными параметрами методом скользящего окна

Дальнейшая последовательность операций при проектировании асинхронного двигателя соответствует стандартной схеме [8, 9], но скольжение в результатах расчетов уже не «получается» и не проверяется на соответствие допуску, а является результатом описанных выше оптимизационных расчетов.

5. Результаты исследований и их обсуждение

В ЧП «СЭП Энерго-КОМ» было проведено испытание САПР электротехнического оборудования «OPTIGLOC» (*Optimization by the global connectivity*), которая базируется на предложенных моделях и методе оптимизации параметров сложных систем по глобальной связности параметров их подсистем и обеспечивает поддержку принятия проектных решений для элементов последних.

В качестве объекта автоматизированного проектирования использовали систему «Дизельный генератор – асинхронный двигатель переменного тока». В результате испытаний установлено, что ис-

пользование упомянутой выше САПР «OPTIGLOC» позволило уменьшить удельный расход дизельного топлива в генераторе на 5,3 %, сохранив при этом неизменным срок службы системы и стабильность выполнения ею технических задач, а также снизить сроки проектирования в среднем на 13,7 %.

6. Выводы

1. Выполнена классификация ограничений и связностей аргументов в задачах оптимизации сложных электротехнических систем. Введено понятие «глобальная связность», влияющая на большинство конструктивных и эксплуатационных параметров системы в целом. В стандартных схемах проектирования асинхронных электродвигателей такой глобальной связностью является скольжение – целевая функция оптимизации. Предложена постановка и решение обратной задачи, когда в качестве целевой функции выступает важнейшая потребительская характеристика – расход горючего, а величина связно-

сти становится оптимизирующим аргументом, при этом остальные параметры существования системы в переводятся в список ОПР и/или ОВР

2. Метод скользящего окна для оптимизации сложной электротехнической системы по связности (скольжению) испытан на примере объекта «покупной топливный электрогенератор – проектируемый асинхронный электродвигатель». Метод прошел производственные испытания в рамках САПР «OPTIGLOC» с положительным технико-экономическим эффектом.

Литература

1. Воробьев, В. Е. Расчет трехфазных асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором [Текст] / В. Е. Воробьев, В. И. Рябуха, А. А. Томов. – СПб.: СЗПИ, 2000. – 151 с.

2. IEEE 112. IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators [Text]. – New York, 2004. doi: 10.1109/ieeestd.2004.95394

3. Духанина, М. А. Эволюционная оптимизация слабосвязанных систем [Текст] / М. А. Духанина, Е. Ю. Лебедева, П. С. Швець, Л. А. Одукалец // Збірник наукових праць Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г. С. Пухова. – Київ, 2013. – № 67. – С. 74–81.

4. Shvets, P. S. The computer-aided design of rubber-metal products [Text] / P. S. Shvets, O. Yu. Lebedeva, V. V. Bondarenko // Odes'kyi Politechnichnyi Universytet. Pratsi. – 2015. – Issue 3. – P. 36–40. doi: 10.15276/opu.3.47.2015.10

5. Сидорова, Н. В. Оптимізація силікатних матеріалів неавтоклавного твердіння по комплексу критеріїв якості з використанням елементів аксонометрії [Текст] / Н. В. Сидорова, Ю. В. Доценко, А. О. Перпері // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету. Прикладна геометрія та інженерна графіка. – Мелітополь, 2008. – Т. 39, Вип. 4. – С. 119–122.

6. Ступичный асинхронный тяговый двигатель с внешним ротором [Текст]. – Н. Neudorfer. Glasers Annalen. – 2001. – Issue 6/7. – P. 237–242.

7. Применение асинхронных электродвигателей [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://lesopilka777.ru/raznotematcheskoe/81-poleznye-materialy/718primjenenijenasinkhronnykheljektrodvigateljel.html>

8. Горохов, В. Л. Расчет асинхронных двигателей [Текст] / В. Л. Горохов, А. Н. Лукин, Г. М. Жигалова. – М.: МГТУ, 2008. – 91 с.

9. Копылов, И. П. Проектирование электрических машин [Текст] / И. П. Копылов, Б. К. Клоков, В. П. Морозкин, Б. Ф. Токарев. – М.: Высшая школа, 2005. – 767 с.

10. Liang, X. Induction Motor Starting in Practical Industrial Applications [Text] / X. Liang, O. Pochonwu // IEEE Transactions on Industry Applications. – 2011. – Vol. 47, Issue 1. – P. 271–280. doi: 10.1109/tia.2010.2090848

11. "Induction (Asynchronous) Motors" [Text]. – Mississippi State University Dept of Electrical and Computer Engineering, Course ECE 3183, 'Electrical Engineering Systems for non-ECE majors'. – 2012.

12. Гринченко, В. А. Обоснование базовой конструкции линейного электродвигателя [Текст] / В. А. Гринченко // Theoretical & Applied Science. – 2013. – Vol. 1, Issue 11 (7). – P. 58–60.

13. Шабалов, П. Г. Авиационный электропривод [Текст] / П. Г. Шабалов, Е. Ф. Галкин. – Самара: СГАУ, 2005. – 52 с.

14. Ozyurt, C. H. Parameter and Speed Estimation of Induction Motors from Manufacturers Data and Measurements [Text] / C. H. Ozyurt // Middle East Technical University. – 2005. – P. 33–34.

15. Бакулин, А. С. Сооружения, устройства и подвижный состав метрополитена [Текст] / А. С. Бакулин, К. И. Кудринская, П. А. Куи, Е. Т. Мосин, В. А. Пронин, Е. А. Федоров. – М.: Транспорт, 1979. – 239 с.

16. Маркович, И. М. Режимы энергетических систем [Текст] / И. М. Маркович. – М.: Госэнергоиздат, 1963. – 360 с.

17. Управление по ограничениям [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.businessstuning.ru/op/219-upravlenie-po-ogranicheniyam.html>

18. Швець, П. С. Многоцелевая оптимизация объектов со связанными параметрами с помощью метода скользящего окна [Текст] / П. С. Швець, Д. А. Монова, В. В. Бондаренко, Е. А. Оборотова // ScienceRise. – 2016. – Т. 4, № 2 (21). – С. 31–36. doi: 10.15587/2313-8416.2016.67616

19. Александров, В. Ф. Частотная разгрузка в энергосистемах [Текст] / В. Ф. Александров, В. Г. Езерский, О. Г. Захаров, В. С. Малышев. – М.: НТФ «Энергопроект», 2007. – 76 с.

20. Становський, О. Л. Оптимізація зв'язності елементів в задачах автоматизованого проектування систем [Текст] / О. Л. Становський, П. С. Швець, А. В. Торопенко, В. В. Бондаренко, А. О. Становський, О. Абу Шена, О. М. Красножон // Вісник НТУ «ХП». – 2015. – № 49 (1158). – С. 170–175.

References

1. Vorobev, V. E., Ryabuha, V. I., Tomov, A. A. (2000). Raschet trehfaznykh asinkhronnykh dvigateley s korotkozamknutyim rotorom. Sankt-Peterburg: SZPI, 151.

2. IEEE 112. IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators (2004). New York. doi: 10.1109/ieeestd.2004.95394

3. Duhana, M. A., Lebedeva, E. Yu., Shvets, P. S., Odukalets, L. A. (2013). Evolyutsionnaya optimizatsiya slabosvyazannykh system. Zbirnyk naukovykh prats Institutu problem modelyuvannya v energetitsi im. G. S. Puhova. Kyiv, 67, 74–81.

4. Shvets, P., Lebedeva, O., Bondarenko, V. (2015). The computer-aided design of rubber-metal products. Odes'kyi Politechnichnyi Universytet. Pratsi, 3, 36–40. doi: 10.15276/opu.3.47.2015.10

5. Sidorova, N. V., Dotsenko, Yu. V., Perperi, A. O. (2008). Optimizatsiya sillkatnih materialiv neavtoklavного tverdinnya po kompleksu kriteriyiv yakosti z vikoristanniam elementiv aksonometriyi. Pratsi taviyskogo derzhavnogo agrotehnologichnogo universitetu. Prikladna geometriya ta inzhenerna grafka, Melitopol, 39 (4), 119–122.

6. Stupichnyy asinkhronnyy tyagovyiy dvigatel s vneshnim rotorom (2001). H. Neudorfer. Glasers Annalen, 6/7, 237–242.

7. Primenenie asinkhronnykh elektrodvigateley (2014). Available at: <http://lesopilka777.ru/raznotematcheskoe/81-poleznye-materialy/718-primjenenijenasinkhronnykheljektrodvigateljel.html>

8. Gorohov, V. L., Lukin, A. N., Zhigalova, G. M. (2008). Raschet asinkhronnykh dvigateley. Moscow: MGTU, 91.

9. Kopylov, I. P., Klokov, B. K., Morozkin, V. P., Tokarev, B. F. (2005). Proektirovanie elektricheskikh mashin. Moscow: Vysshaya shkola, 767.

10. Liang, X., Pochonwu, O. (2011). Induction Motor Starting in Practical Industrial Applications. IEEE Transactions on Industry Applications, 47 (1), 271–280. doi: 10.1109/tia.2010.2090848

11. "Induction (Asynchronous) Motors" (2012). Mississippi State University Dept of Electrical and Computer Engineering, Course ECE 3183, 'Electrical Engineering Systems for non-ECE majors'.

12. Grinchenko, V. A. (2013). Obosnovanie bazovoy konstruksii lineynogo elektrodvigatelya. Theoretical & Applied Science, 1/11 (7), 58–60.

13. Shabalov, P. G., Galkin, E. F. (2005). Aviatsonnyiy elektroprivod. Samara: SGAU, 52.
14. Ozyurt, C. H. (2005). Parameter and Speed Estimation of Induction Motors from Manufacturers Data and Measurements. Middle East Technical University, 33–34.
15. Bakulin, A. S. Kudrinskaya, K. I., Kui, P. A., Mo-sin, E. T., Pronin, V. A., Fedorov, E. A. (1979). Sooruzheniya, ustroystva i podvizhnyiy sostav metropolitena. Moscow: Transport, 239.
16. Markovich, I. M. (1963). Rezhimyi energeticheskikh sistem. Moscow: Gosenergoizdat, 360.
17. Upravlenie po ogranicheniyam. Available at: <http://www.businessstuning.ru/op/219-upravlenie-po-ogranicheniyam.html>
18. Shvets, P. S., Monova, D. A., Bondarenko, V. V., Oborotova, E. A. (2016). Multi-objective optimization of the objects with coupled parameters using the sliding window method. ScienceRise, 4/2 (21), 31–36. doi: 10.15587/2313-8416.2016.67616
19. Aleksandrov, V. F., Ezerskiy, V. G., Zaharov, O. G., Malyishev, V. S. (2007). Chastotnaya razgruzka v energosistemah. Moscow: NTF «Energoprogress», 76.
20. Stanovskiy, O. L., Shvets, P. S., Toropenko, A. V., Bondarenko, V. V., Stanovskiy, A. O., Abu Shena, O., Krasnozhan, O. M. (2015). Optimizatsiya zvyaznosti el ementiv v zadachah avtomatizovanogo proektuvannya system. Visnyk NTU «HPI», 49 (1158), 170–175.

Дата надходження рукопису 18.08.2016

Становский Александр Леонидович, доктор технических наук, профессор, кафедра нефтегазового и химического машиностроения, Одесский национальный политехнический университет, пр. Шевченко, 1, г. Одесса, Украина, 65044
E-mail: stanovsky@mail.ru

Швец Павел Степанович, кандидат технических наук, доцент, кафедра электроснабжения и энергетического менеджмента, Одесский национальный политехнический университет, пр. Шевченко, 1, г. Одесса, Украина, 65044
E-mail: pshvets@mail.ru

Бондаренко Виктор Владимирович, старший преподаватель, кафедра электроснабжения и энергетического менеджмента, Одесский национальный политехнический университет, пр. Шевченко, 1, г. Одесса, Украина, 65044
E-mail: snow_dog@ukr.net

Торопенко Алексей Викторович, кафедра нефтегазового и химического машиностроения, Одесский национальный политехнический университет, пр. Шевченко, 1, г. Одесса, Украина, 65044
E-mail: toropenko84@mail.ru

УДК 621.311.1 : 620.92

DOI: 10.15587/2313-8416.2016.77950

АНАЛІЗ ФУНКЦІОНУВАННЯ ІНТЕГРОВАНІХ ЕНЕРГОПОСТАЧАЛЬНИХ СИСТЕМ З ЕНЕРГЕТИЧНИМИ ХАБАМИ

© Ю. А. Веремійчук, І. В. Притискач, О. С. Ярмолук, В. П. Опришко

Проведено аналіз особливостей функціонування інтегрованих інтелектуальних енергопостачальних систем, які передбачають інтеграцію самоорганізуючих систем електро– та теплопостачання. Розглянуто можливість використання моделі енергетичних хабів, які поєднують різномірні джерела генерації теплової та електричної енергії для забезпечення попиту споживачів на енергоресурси. Виконано оцінку доцільності впровадження енергетичних хабів в умовах взаємодії локальних енергетичних систем України на різних рівнях організаційної структури енергетики у процесі лібералізації ринку енергії

Ключові слова: інтегровані інтелектуальні енергопостачальні системи, розосереджена генерація, моніторинг, активний споживач, енергетичний хаб

The analysis of the operation properties of integrated intelligent energy supply systems that provide integration of self-organizing systems of electricity and heat consumption is conducted. Possibility of using energy hub models that combine disparate generate sources of heat and electricity energy for the consumers' demand for energy is considered. The feasibility estimation of implementing energy hubs in terms of interaction of local energy systems in Ukraine at different levels of the organizational structure of the energetics in the energy market liberalization is made

Keywords: integrated intelligent energy supply systems, dispersed generation, monitoring, active consumer, energy hub