О.В. Байрамова, Ю.Г. Якусевич, В.В. Штрибець, В.В. Трішин

Державний університет інфраструктури та технологій, Київ

МОДЕЛЬ УПРАВЛІННЯ ЕКОНОМІЄЮ ЕНЕРГОРЕСУРСІВ У СИСТЕМІ ЕНЕРГОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ РІЧКОВИХ СУДЕН

В статті розглянуто застосування квадратичної оптимізації на прикладі задачі розподілу енергоресурсів у системі електропостачання берегових об'єктів від трьох джерел (трьох підстанцій) між чотирма споживачами таким чином, щоб втрати електроенергії в електромережі були мінімальними. Розроблено програму в кодах MATLAB, що дозволяє вирішувати широкий спектр задач розподілу ресурсів: визначення оптимального завантаження суднових дизель-генераторних агрегатів при рівнобіжній роботі; оптимальне завантаження системи електропостачання портів, суднобудівних судноремонтних заводів та ін. Потреба в нових технічних рішеннях визначена необхідністю підвищення економічності суднових енергетичних установок та їх складових елементів. Усунення кризових явищ у вітчизняній транспортній системі полягає у створенні нових моделей та методів управління енергоефективністю, алгоритмів оптимізації й автоматизації суден і суднових технічних засобів, способів побудови систем на основі сучасних технологій енергоефективного машинобудування, розробки алгоритмів для підвищення економічності суднових енергетичних установок та їх елементів шляхом ефективного використання різних видів ресурсів у кожному рейсі. Серед технічних засобів, що підлягають автоматизації, необхідно виділити судові енергетичні системи, системи та пристрої суднових електроенергетичних комплексів, засоби управління рухом, вантажними операціями, забезпечення життєдіяльності, засоби автоматизації енергоємних виробничих процесів. Актуальність даної статті полягає в тому, що в результаті отримується модель економії енергоресурсів в системі, синтезуються системи автоматизації та управління енергозабезпечення річкових суден і судном у цілому, реалізуючи ефективні закони управління шляхом оптимізації технологічних процесів на базі принципу найменшої дії з використанням операційних досліджень.

Ключові слова: енергоефективність, енергоресурси, квадратичне програмування, оптимізація, річкові судна, судові енергетичні установки.

Вступ

Постановка проблеми. Нові технології ресурсозбереження, управління складними судновими об'єктами, реалізовані з урахуванням вимог безпеки плавання, системності і забезпечення життєдіяльності екіпажів судів, повинні стати визначальними в забезпеченні конкурентоздатності вітчизняного флоту на ринку транспортних послуг.

Потреба в нових технічних рішеннях визначена необхідністю підвищення економічності суднових енергетичних установок (СЕУ) та їх складових елементів. Усунення кризових явищ у вітчизняній транспортній системі полягає у створенні нових моделей та методів управління енергоефективністю, алгоритмів оптимізації й автоматизації судів і суднових технічних засобів, способів побудови систем на основі сучасних технологій енергоефективного машинобудування, розробки алгоритмів для підвищення економічності судових енергетичних устано-

вок та їх елементів шляхом ефективного використання різних видів ресурсів у кожному рейсі. Серед технічних засобів, що підлягають автоматизації, необхідно виділити судові енергетичні системи, системи та пристрої суднових електроенергетичних комплексів, засоби управління рухом, вантажними операціями, забезпечення життєдіяльності, засоби автоматизації енергоємних виробничих процесів. Актуальність даної статті полягає в тому, що в результаті отримується модель економії енергоресурсів в системі, синтезуються системи автоматизації та управління енергозабезпечення річкових суден і судном у цілому, реалізуючи ефективні закони управління шляхом оптимізації технологічних процесів на базі принципу найменшої дії з використанням операційних досліджень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Розвитку алгоритмів і обчислювальних процедур пошуку оптимальних рішень для класу динамічних задач методами математичного програмування

приділяється значна увага, насамперед, оскільки з їх допомогою можна спростити пошук оптимальних управляючих дій і, зокрема, запропонувати способи рішення двохточкових граничних задач ефективними обчислювальними засобами. У розробку різних аспектів проблеми автоматизації систем управління та підвищення економії енергоресурсів внесли вклад такі вчені: Бажан П.И., Басін А.М., Большаков В.Ф., Бутов А.С., Клімов Е.М., Матвеев Ю.І., М'ясников Ю.М., Попов С.А., Сазонов А.С., Чиркова М.М., Фейгін І.А. Результати даних досліджень стали фундаментом до якісно нового рівня автоматизації, у тому числі – оптимізації витрат енергії на судах та оптимізації роботи СЕУ.

Метою статті є розробка математичної моделі управління економією енергоресурсів у системі енергозабезпечення річкових суден.

Виклад основного матеріалу

Рішення завдань оптимізації технологічних процесів пов'язано з вибором математичних методів, які дозволяють реалізувати математичні моделі, що використовуються в даній предметній області. Вибір того або іншого метода в значній мірі залежить від постановки задачі, складності моделі, виду цільової функції, виду обмежень: рівностей та нерівностей, а також від вектора початкових умов на нульовому кроці. Математичне програмування служить основною методологічною базою для рішення задач оптимального розподілу ресурсів, що включає в себе ряд наступних ефективних методів [1–5]:

- лінійне програмування;
- нелінійне програмування;
- методи з використанням невизначених множників Лагранжа;
- квадратичне програмування;
- динамічне програмування;
- чисельні методи оптимізації, засновані на використанні генетичних алгоритмів.

Зазначені методи можна використовувати для оптимального розподілу ресурсів, як окремо, так і в сполученні з іншими методами, що суттєво підвищує ефективність обчислювального процесу. Якщо квадратичні складові вектора змінних стану моделі з'являються в критеріях якості, а обмеження представляються системою лінійних рівнянь або нерівностей, то такі нелінійні оптимізаційні задачі можна віднести до класу задач квадратичного програмування. Відомо, що для їх рішення існує ряд ефективних алгоритмів. Зокрема, у роботах П. Вольфа, С.Е. Лемке [6] та інших учених показано, що задача квадратичного програмування може бути розв'язана за допомогою симплекс-методу, який використовується в лінійному програмуванні [7]. З цією метою формують так звану лінійну допоміжну задачу, що далі вирішується за допомогою алгоритму

С.Е. Лемке [8].

У загальному вигляді задача квадратичного програмування сформулюється в такий спосіб: мінімізувати критерій якості J :

$$J = \min \left(\frac{1}{2} \cdot x^T \cdot H \cdot x + f^T \cdot x \right), \quad (1)$$

при наступних обмеженнях:

$$A \cdot x \leq b; A_{eq} \cdot x = b_{eq}; lb \leq x \leq ub. \quad (2)$$

де H, A, A_{eq} – матриці; f, b, b_{eq}, lb, ub, x – вектори.

Відмітимо, що якщо H – позитивно визначена або позитивно напіввизначена матриця, то для даної задачі виконуються необхідні і достатні умови оптимальності Куна-Таккера.

З приведених рівнянь також випливає, що якщо $H = 0$, замість квадратичного програмування будемо мати задачу лінійного програмування. Однак у цьому випадку не слід використовувати функцію quadprog інструментарію Optimization Toolbox. Для рішення задач лінійного програмування необхідно застосовувати linprog.

Розглянемо процедуру оптимального розподілу ресурсів за допомогою квадратичного програмування в наступній інтерпретації. Нехай L – виробнича матриця, що характеризує розподіл ресурсів, у рядках якої утримуються значення розподіленого по процесах ресурсу, причому сума елементів i -строки відповідає використанню ресурсу P_i -го поставщика ресурсу. У кожному j -му стовпці розміщені види ресурсів, що використовується P_j -им споживачем. Кожен коефіцієнт a_{ij} матриці характеризує витрати, які мають місце при постачанні одиниці ресурсу від i -го постачальника до j -го споживача; x_{ij} – обсяг розподілу ресурсу i -им джерелом j -му споживачу.

Таблиця 1

Виробнича матриця (приклад)

P_i	P_i			
	P_1	P_2	...	P_n
P_1	a_{11} x_{11}	a_{12} x_{12}	...	a_{1n} x_{1n}
P_2	a_{21} x_{21}	a_{22} x_{22}	...	a_{2n} x_{2n}
...	...	...	...	...
P_m	a_{m1} x_{m1}	a_{m2} x_{m2}	...	a_{mn} x_{mn}

Джерело: розроблено авторами.

За умовою реалізації процесу розподілу ресурсів потрібно забезпечити виконання системи обмежень, що задаються співвідношеннями виду:

$$A \cdot x \leq b \quad (3)$$

$$A_{eq} \cdot x = b_{eq} \quad (4)$$

Рівність (3) означає вимогу до постачання ресурсу споживачам суворо в тому обсязі, який має постачальник, а нерівність (2), обмежує обсяги постачаних ресурсів, що мають в постачальників.

Розглянемо практичний приклад.

Допустимо, що за умовами завантаження системи електропостачання динамічних об'єктів річкового судна, потрібно від трьох постачальників електроенергії (генераторів) розподілити її між чотирма споживачами так, щоб забезпечити мінімум втрат електроенергії в електромережі.

Вихідної для розрахунків є технологічна матриця L .

Таблиця 2

Технологічна матриця L

	P_i	P_i			
		800	200	600	300
$L =$	630	0,3	0,9	0,2	0,3
		x_{11}	x_{12}	x_{13}	x_{14}
	1000	0,4	0,5	1,0	0,1
		x_{21}	x_{22}	x_{23}	x_{24}
	400	0,6	0,8	0,6	0,4
		x_{31}	x_{32}	x_{33}	x_{34}

Джерело: розроблено авторами.

Накладемо обмеження на розподіл електроенергії від першого генератора до третього споживача і від другого генератора до першого споживача у вигляді верхніх кордонів, що дорівнюють значенню 400.

Таким чином, математична модель задачі управління економією електроенергії річкового судна буде виглядати наступним чином: одержати значення змінних x_{ij} , що забезпечують мінімум цільового функціонала (1) при обмеженнях, показаних у формулі 4.

Рішення даного завдання виконано в середовищі MATLAB [7]. Основною операцією є розв'язання задачі квадратичного програмування, що виконане за допомогою оператора `quadprog` з відповідним синтаксисом.

$$\begin{cases} x_{11} + x_{12} + x_{13} + x_{14} \leq 630 \\ x_{21} + x_{22} + x_{23} + x_{24} \leq 1000 \\ x_{31} + x_{32} + x_{33} + x_{34} \leq 400 \\ x_{11} + x_{21} + x_{31} \leq 800 \\ x_{12} + x_{22} + x_{32} \leq 200 \\ x_{13} + x_{23} + x_{33} \leq 600 \\ x_{14} + x_{24} + x_{34} \leq 300 \\ x_{13} \leq 400 \\ x_{21} \leq 400 \\ x_{ij} \geq 0. \end{cases} \quad (5)$$

Для наведених вихідних даних (матриці L та обмежень (4)) за умови $H = \text{diag}(0,0030 \cdot f)$ (отримане наступне розв'язання:

$X_c = [230,0; 0,0; 400,0; 0,0; 400,0; 200,0; 0,0; 300,0; 170,0; 0,0; 200,0; 0,0]$.

Мінімальне значення критерію якості складає: $J_c = 934.3150$.

Висновки

Застосування квадратичного програмування для оптимізації розподілу ресурсів дозволяє значно розширити клас практично розв'язуваних задач. До них відносяться наступні задачі:

- визначення оптимального завантаження паралельно працюючих судових допоміжних агрегатів;
- оптимальне завантаження електроенергетичної системи портів, суднобудівних і судноремонтних підприємств та ін.

Також використання квадратичного програмування дозволить дослідити чутливість цільового функціонала при варіації коефіцієнтів виробничої матриці.

Список літератури

1. Юдин Ю.И. Проблемы обеспечения функционирования, безопасности и качества при эксплуатации судов с динамическими системами управления / Ю.И. Юдин, А.В. Барахта // Вестник Московского государственного технического университета. – 2009. – № 2(12). – С. 259-262.
2. Cannon V. Efficient nonlinear model predictive control algorithms / V. Cannon // Annual Reviews in Control. – 2004. – № 28. – P. 229-237.
3. Сахаров В.В. Модели и алгоритмы оптимизации технологических процессов на объектах водного транспорта в среде MATLAB: монография / В.В. Сахаров, А.А. Кузьмин, А.А. Чертков. – СПб.: ГУМРФ им. адм. С.О. Макарова, 2015. – 436 с.
4. Wang L. Model predictive control system design and implementation using MATLAB / L. Wang. – London: Springer-Verlag London Limited, 2009. – 403 p.
5. Автоматизация и повышение эффективности использования топлива на судах / С.О. Барышников, А.А. Кузьмин, В.В. Сахаров, С.Н. Тарануха. – СПб.: Изд-во Политехнического ун-та, 2016. – 390 с.
6. Венцель Е.С. Исследование операций: задачи, принципы, методология / Е.С. Венцель. – 2-е изд. – М.: Наука, 1988. – 208 с.
7. Дьяконов В.П. Математические пакеты расширения MatLAB: специальный справочник / В.П. Дьяконов, В.В. Круглов. – СПб.: Питер, 2001. – 480 с.
8. Акулич И.Л. Математическое программирование в примерах и задачах: учеб. пособие / И.Л. Акулич. – 3-е изд. – СПб.: Лань, 2011. – 352 с.
9. Сахаров В.В. Балансовые модели и их применение в автоматизированных системах управления производством / В.В. Сахаров, А.А. Кузьмин // Журнал университета водных коммуникаций. – 2013. – № 1. – С. 46-53.
10. Иванов Е.Н. Способ расчета электрических цепей на основе квадратичного программирования / Е.Н. Иванов, А.В. Черникова, М.Б. Шамсиева // Журнал университета водных коммуникаций. – 2012. – № 4. – С. 67-71.

11. Pang C.K. Modal parametric identification of flexible mechanical structures in mechatronic system / C.K. Pang, F.L. Lewis, T.H. Lee // Transactions of the Institute of Measurement and Control. – 2010. – № 2(32). – P. 137-154.

12. Компьютерное моделирование систем управления движением морских подвижных объектов / Е.И. Веремей, В.М. Корчанов, М.В. Коровкин, С.В. Погожев. – СПб.: Изд-во НИИ Химии СПбГУ, 2002. – 370 с.

Надійшла до редколегії 26.06.2020

Схвалена до друку 18.08.2020

Відомості про авторів:

Байрамова Олена Вікторівна

доцент

Державного університету інфраструктури та технологій,
Київ, Україна

<https://orcid.org/0000-0002-3199-0612>

Якусевич Юрій Геннадійович

доцент

Державного університету інфраструктури та технологій,
Київ, Україна

<https://orcid.org/0000-0002-5933-5417>

Штрибець Валерій Валерійович

старший викладач

Державного університету інфраструктури та технологій,
Київ, Україна

<https://orcid.org/0000-0001-8892-8951>

Тришин В'ячеслав Валентинович

старший викладач

Державного університету інфраструктури та технологій,
Київ, Україна

<https://orcid.org/0000-0001-7562-2662>

Information about the authors:

Olena Bayramova

Senior Lecturer

of the State University of Infrastructure and Technology,
Kyiv, Ukraine

<https://orcid.org/0000-0002-3199-0612>

Yuriy Yakusevych

Senior Lecturer

of the State University of Infrastructure and Technology,
Kyiv, Ukraine

<https://orcid.org/0000-0002-5933-5417>

Valeriy Shtribets

Senior Instructor

of the State University of Infrastructure and Technologies,
Kyiv, Ukraine

<https://orcid.org/0000-0001-8892-8951>

Vyacheslav Tryshin

Senior Instructor

of the State University of Infrastructure and Technologies,
Kyiv, Ukraine

<https://orcid.org/0000-0001-7562-2662>

МОДЕЛЬ УПРАВЛЕНИЯ ЭКОНОМИЕЙ ЭНЕРГОРЕСУРСОВ В СИСТЕМЕ ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕНИЯ РЕЧНЫХ СУДОВ

Е.В. Байрамова, Ю.Г. Якусевич, В.В. Штрибец, В.В. Тришин

В статье рассмотрено применение квадратичной оптимизации на примере задачи распределения энергоресурсов в системе электроснабжения береговых объектов от трех источников (трех подстанций) между четырьмя потребителями таким образом, чтобы потери электроэнергии в электросети были минимальными. Разработана программа в кодах MATLAB что позволяет решать широкий спектр задач распределения ресурсов: определение оптимальной загрузки судовых дизель-генераторных агрегатов при параллельной работе; оптимальная загрузка системы электроснабжения портов, судостроительных судоремонтных заводов и др. Среди технических средств, подлежащих автоматизации, необходимо выделить судовые энергетические системы, системы и устройства судовых электроэнергетических комплексов, средства управления движением, грузовыми операциями, обеспечения жизнедеятельности, средства автоматизации энергоемких производственных процессов. Актуальность данной статьи заключается в том, что в результате получается модель экономии энергоресурсов в системе, синтезируются системы автоматизации и управления энергообеспечения речных судов и судном в целом, реализуя эффективные законы управления путем оптимизации технологических процессов на базе принципа наименьшего действия с использованием операционных исследований.

Ключевые слова: энергоэффективность, энергоресурсы, квадратичное программирование, оптимизация, речные суда, судовые энергетические установки.

MODEL OF ENERGY ECONOMY MANAGEMENT IN THE ENERGY SUPPLY SYSTEM OF RIVER SHIPS

O. Bayramova, Yu. Yakusevich, V. Shtribets, V. Tryshin

The article discusses the application of quadratic optimization using the example of the problem of energy resources distribution in the power supply system of coastal facilities from three sources (three substations) between four consumers so that electricity losses in the power grid are minimal. A program in MATLAB codes has been developed that allows solving a wide range of resource allocation problems: determination of the optimal loading of marine diesel generator sets during parallel operation; optimal loading of the power supply system of ports, shipbuilding shipyards, etc. The need for new technical solutions is determined by the need to improve the efficiency of ship power plants and their constituent elements. Elimination of crisis phenomena in the domestic transport system consists in the creation of new models and methods of energy efficiency management, algorithms for the optimization and automation of ships and ship technical equipment, methods for constructing systems based on modern technologies of energy efficient mechanical engineering, the development of algorithms to increase the efficiency of ship power plants and their elements through effective use of different types of resources on each voyage. Among the technical means subject to automation, it is necessary to single out ship power systems, systems and devices of ship electric power complexes, traffic control, cargo operations, life support, automation means for energy-intensive production processes. The relevance of this article lies in the fact that as a result, a model of energy saving in the system is obtained, automation and control systems for the power supply of river vessels and the ship as a whole are synthesized, implementing effective control laws by optimizing technological processes based on the principle of least action using operational research.

Keywords: energy efficiency, energy resources, quadratic programming, optimization, river vessels, ship power plants.