

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И АВТОМАТИЗАЦИЯ НА ТРАНСПОРТЕ

DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-2-422-431

THE ALGORITHM OF A FORMANCE GAIN OF ELECTROENERGY SYSTEMS FOR WATER TRANSPORT USING FUZZY LOGIC

D. V. Dmitrienko, A. A. Chertkov, S. V. Saburov

Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
St. Petersburg, Russian Federation

The problem of increasing the efficiency of diesel-generator units (DGA) for various purposes and energy systems of water transport, running on fuel of various sorts, as well as with alternative and renewable sources of electricity, is determined by the untapped reserves and opportunities for new energy-efficient solutions for institutional and technical levels using computer technology and numerical methods of energy conservation. Since energy facilities to a greater or lesser extent, have a negative impact on the environment Wednesday, their work required to optimize in view of the operation of each power grid in different operating conditions. The complexity of the optimization problem is that its decision should be implemented when significant differences in technical, economic and sensitive characteristics of individual elements of the system, and an analytical description of the difficult in cases of high dimension power grid with regulators for various purposes and extent.

The algorithm is cost-effective modes of the grid by the distribution of active power between generating sources of electricity using the incremental characteristics of the object class with the expenditure characteristics of the approximated quadratic polynomials. In contrast to existing methods of defining and measuring the minimum consumption of conventional fuel per unit of electricity generated, the proposed algorithm for optimal power allocation in terms of technological limitations is determined by constructing incremental characteristics, based on which work out solutions for each generator as a function of the power consumed by the network. The solutions are piecewise linear functions that allows to embed the algorithm, the elements of fuzzy logic and, in particular, the trapezoidal membership function, which contributes to simplification of computation. Examples, confirming the correctness and efficiency of algorithm.

Keywords: power generators, parallel operation, network, fuel consumption, optimization, incremental functions, elements of fuzzy logic.

For citation:

Dmitrienko, Dmitry. V., Alexandr A. Chertkov, and Sergei V. Saburov. "The algorithm of a formance gain of electroenergy systems for water transport using fuzzy logic." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 9.2 (2017): 422–431. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-2-422-431.

УДК 621.394.02

АЛГОРИТМ ПОВЫШЕНИЯ ЭКОНОМИЧНОСТИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ НА ВОДНОМ ТРАНСПОРТЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФУНКЦИЙ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ

Д. В. Дмитриенко, А. А. Чертков, С. В. Сабуров

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Проблема повышения экономичности дизель-генераторных агрегатов различного назначения и систем энергообеспечения водного транспорта, работающих на топливах различных сортов, а также с альтернативными и возобновляемыми источниками электроэнергии, определяется неиспользованными резервами и возможностями получения новых энергоэффективных решений на организационном и техническом уровнях с применением компьютерных технологий и численных методов энергосбережения. Поскольку энергетические объекты в той или иной мере оказывают негативное влияние на окружающую

среду, их работу требуется оптимизировать с учетом функционирования каждой энергосистемы в различных условиях эксплуатации. Сложность задачи оптимизации состоит в том, что ее решение должно выполняться при существенных различиях технических, экономических и режимных характеристик отдельных элементов системы, а аналитическое описание затруднено в случаях высокой размерности энергосистемы с регуляторами различного назначения и степени сложности.

Рассмотрен алгоритм обеспечения экономических режимов энергосети путем распределения активной мощности между генерирующими источниками электроэнергии с использованием метода инкрементальных характеристик для класса объектов с расходными характеристиками, аппроксимируемыми квадратичными полиномами. В отличие от существующих способов определения и оценки минимального расхода условного топлива, приходящегося на единицу генерируемой электроэнергии, в предлагаемом алгоритме оптимальное распределение мощности в условиях технологических ограничений определяется путем построения инкрементальных характеристик, на основе которых получают решения для каждого генератора как функции мощности, потребляемой сетью. Решения являются кусочно-линейными функциями, что позволяет встроить в алгоритм элементы нечеткой логики и, в частности, трапециевидную функцию принадлежности, что способствует упрощению вычислений. Приводятся примеры, подтверждающие корректность и эффективность алгоритма.

Ключевые слова: генераторы электроэнергии, параллельная работа, сеть, расход топлива, оптимизация, инкрементальные функции, элементы нечеткой логики.

Для цитирования:

Дмитриенко Д. В. Алгоритм повышения экономичности электроэнергетических систем на водном транспорте с использованием функций нечеткой логики / Д. В. Дмитриенко, А. А. Чертков, С. В. Сабуров // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 2. — С. 422–431. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-2-422-431.

Введение

В настоящее время проблеме повышения экономичности дизель-генераторных агрегатов (ДГА) различного назначения и электроэнергетических систем (ЭЭС) на предприятиях водного транспорта уделяется большое внимание. Стремление уменьшить расход топлива, приходящийся на единицу генерируемой энергии в сеть при параллельной работе ДГА, определяется неиспользованными резервами и возможностями получения новых энергоэффективных решений на организационном и техническом уровнях с применением компьютерных технологий и численных методов энергосбережения [1]. Повышение требований к качеству электроэнергии определяет новые задачи по обеспечению параллельной работы ДГА и тепловых электростанций, агрегатов автономных систем энергообеспечения и др. на топливах различных сортов в единой энергосети, в том числе с альтернативными и возобновляемыми источниками электроэнергии [2]. Решение этих задач направлено на обеспечение минимальных затрат материальных ресурсов и денежных средств при эксплуатации основных фондов на водном транспорте путем экономии топлива и энергии; поиск новых форм и методов технико-экономического нормирования расходов топлива на речных транспортных, грузовых и пассажирских судах, а также судах технического флота; снижение объемов выбросов в атмосферу составляющих CO_x и NO_x продуктов сгорания на тепловых электростанциях и береговых объектах с автономными источниками электроэнергии и выполнение требований к сохранению экологически чистой окружающей среды согласно международным стандартам ИМО Tier III [3] – [6].

Поскольку энергетические объекты в той или иной мере оказывают негативное влияние на окружающую среду, их работу требуется оптимизировать с учетом функционирования каждой энергосистемы в различных условиях эксплуатации [7]. Сложность задачи оптимизации состоит в том, что ее решение должно выполняться при существенных различиях технических, экономических и режимных характеристик отдельных элементов системы, а аналитическое описание затруднено в случаях высокой размерности энергосистемы с регуляторами различного назначения и степени сложности.

В работе представлен алгоритм оптимизации режимов энергосети при централизованном управлении путем оперативной диспетчеризации распределения активной нагрузки между гене-

рирующими источниками, которая обеспечивает минимальный расход условного топлива с учетом параметрических и технологических ограничений. Решение основано на методе инкрементальных характеристик, изложенном в работе [1]. В отличие от известных способов оптимизации, предлагаемый алгоритм применим к классу объектов с расходными характеристиками, аппроксимируемыми квадратичными полиномами с технологическими ограничениями по генерируемой мощности ДГА. К данному классу объектов можно отнести практически все тепловые электростанции ЭЭС, судовые и корабельные электроэнергетические системы, генераторные агрегаты морских платформ для освоения шельфовых месторождений нефти и газа, буровые суда, ледоколы и другие морские подвижные объекты специального назначения.

Серийный выпуск многотопливных стационарных ДГА на ведущих дизелестроительных заводах, способных работать параллельно с сетью и другими электростанциями соизмеримой мощности, частые изменения технологических параметров топлив, а также их стоимостных показателей свидетельствуют о необходимости введения коррекции коэффициентов полиномов расходных характеристик отдельных ДГА и, следовательно, учета влияния различных составов топлива на экономичность работы системы в целом. При большом числе параллельно работающих ДГА в системе решение задач диспетчеризации энергоэффективного распределения нагрузки между агрегатами становится затруднительным. В подобных ситуациях требуется базироваться на простых алгоритмах принятия оптимальных решений, а также структурных инструментах, обладающих прозрачностью и доступностью для пользователей. Такие свойства присущи предлагаемому алгоритму.

Основная часть

В вычислительном алгоритме применена процедура равенства инкрементов полиномов второго порядка, что соответствует оптимизации технологии распределения нагрузки ДГА с использованием множителей Лагранжа в активной области их работы. При этом переход к инкрементальным характеристикам в условиях ограничений выполняется с использованием трапецеидальных функций принадлежности инструментария нечеткой логики FuzzyLogicToolbox вычислительной среды MatLAB. Оптимизация параметров для каждого ДГА производится с помощью типовых блоков, что значительно упрощает решение задачи диспетчеризации распределения мощности в сети и обеспечивает максимальную «топливную гибкость» при переходе на наиболее экономичное или доступное топливо в режиме online [5]. Способность электростанций и ДГА работать на мазуте, дизельном топливе, нефти, эмульгированном топливе, сжиженном газе (пропан, ГОСТ 20448 и ГОСТ Р52087), жидком биогазе, а также на разных сортах бензина имеет немаловажное значение в условиях меняющихся цен, поскольку определяет многовариантность в выборе альтернативных решений с наиболее приемлемыми показателями энергоэффективности [8] – [10].

Рассмотрим группу судовых ДГА, допускающих аппроксимацию расходных характеристик квадратичными полиномами вида

$$F_i = a_i P_i^2 + b_i P_i + c_i, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (1)$$

где a_i, b_i, c_i — коэффициенты полинома, полученные экспериментальным или расчетным путем; P_i — активная мощность, генерируемая i -м ДГА (технологическим объектом); F_i — расход топлива i -м объектом на режиме, соответствующем нагрузке P_i ; n — число технологических объектов в группе.

При параллельной работе ДГА должно выполняться условие равенства потребляемой сетью мощности P суммарной генерируемой в сеть мощности генераторов

$$P = \sum_{i=1}^k P_i, \quad i = 1, 2, \dots, k, \quad (2)$$

где $k \leq n$ — число параллельно работающих генераторов в текущий момент времени.

Поскольку в составе группы ДГА находятся объекты с различными расходными характеристиками, задача управления состоит в следующем: минимизировать суммарный расход топлива ДГА

$$F = \sum_{i=1}^k F_i(P_i) \quad (3)$$

путем вариации P_i при соблюдении условия (2) с учетом максимально и минимально допустимой мощности ДГА по технологическим нормам

$$P_{i\min} \leq P_i \leq P_{i\max}, \quad i = 1, 2, \dots, k, \quad (4)$$

где $P_{i\min}$, $P_{i\max}$ — минимальное и максимальное предельные значения мощности i -го генератора электроэнергии.

Для решения задачи, представленной зависимостями (1) – (4), могут использоваться различные методы и алгоритмы [11] – [13]. В частности, применимы алгоритмы, базирующиеся на квадратичном программировании, динамическом программировании, сплайн-методах и др. [14], [15]. Для генераторных агрегатов тепловых электростанций с расходными характеристиками, аппроксимированными квадратичными полиномами вида (1), предлагается простой способ оптимизации, основанный на построении инкрементальных функций. Инкрементальные функции вычисляются с помощью зависимостей следующего вида:

$$\frac{\partial F_i}{\partial P_i} = 2a_i P_i + b_i, \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (5)$$

Согласно теории оптимального управления, для решения задачи в активной области (без учета граничных условий) можно использовать технический прием, основанный на применении множителей Лагранжа. В результате оптимальный режим при параллельной работе тепловых генераторов электроэнергии обеспечивается при поддержании равных значений инкрементальных функций, т. е. если выполняется условие

$$S = \frac{\partial F_1}{\partial P_1} = \frac{\partial F_2}{\partial P_2} = \dots = \frac{\partial F_n}{\partial P_n}. \quad (6)$$

При соблюдении ограничений (4) условие (6) для ряда генераторных агрегатов во всем рабочем диапазоне вариации S не выполняется, что вынуждает их работать за пределами активной области на максимальной либо минимальной мощности.

Для построения S -функций коэффициенты полиномов (1) и ограничения (4) запишем в виде матриц A и $P_{\text{огр}}$:

$$A = \begin{bmatrix} a_1 & b_1 & c_1 \\ \dots & \dots & \dots \\ a_k & b_k & c_k \\ \dots & \dots & \dots \\ a_n & b_n & c_n \end{bmatrix}; \quad P_{\text{огр}} = \begin{bmatrix} P_{1\min} & P_{1\max} \\ \dots & \dots \\ P_{k\min} & P_{k\max} \\ \dots & \dots \\ P_{n\min} & P_{n\max} \end{bmatrix}.$$

Если элементы левого столбца матрицы $P_{\text{огр}}$ равны нулю, то минимальные значения инкрементов расходных характеристик определяются вектором

$$b^T = [b_1 \ b_2 \ \dots \ b_n]. \quad (7)$$

В других случаях матрицу $P_{\text{огр}}$ используем для формирования матрицы граничных значений инкрементов:

$$S_{\text{гр}}^T = \begin{bmatrix} S_{1\min} & S_{2\min} & \dots & S_{n\min} \\ S_{1\max} & S_{2\max} & \dots & S_{n\max} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2a_1 P_{1\min} + b_1 & 2a_2 P_{2\min} + b_2 & \dots & 2a_n P_{n\min} + b_n \\ 2a_1 P_{1\max} + b_1 & 2a_2 P_{2\max} + b_2 & \dots & 2a_n P_{n\max} + b_n \end{bmatrix}. \quad (8)$$

Построение инкрементальных характеристик генераторов электроэнергии может осуществляться в любой последовательности, но при условии вариации S в рабочем диапазоне

$$S_{\min} \leq S \leq S_{\max}, \quad (9)$$

где $S_{\min} = \min(S_{\text{гр}}^T)$ и $S_{\max} = \max(S_{\text{гр}}^T)$.

Экономичные режимы с учетом ограничений можно получить, используя при построении S -функций трапецидальные характеристики пакета FuzzyLogicToolbox.

Трапецидальная характеристика в пакете нечеткой логики инструментария MatLAB, согласно синтаксису, зависит от настроечных коэффициентов a, b, c, d и является функцией S , где a и d определяют нижнее основание трапеции, а коэффициенты b и c — верхнее основание с единичной амплитудой:

$$y(S, a, b, c, d) = \begin{cases} 0, & S \leq a; \\ \frac{S-a}{b-a}, & a \leq S \leq b; \\ 1, & b \leq S \leq c; \\ \frac{d-S}{d-c}, & c \leq S \leq d; \\ 0, & d \leq S. \end{cases} \quad (10)$$

Для использования трапецидальной характеристики в качестве механизма построения S -функции k -го генераторного агрегата требуется ввести следующие обозначения настроечных коэффициентов:

$$a = b_k; \quad b = S_{k_{\max}}; \quad c = S_{\max}; \quad d = S_{\max} + \delta,$$

где для определенности можно принять $\delta = 0,1$.

Согласно (10), расстояние от верхнего основания трапеции до нижнего в границах $S_{k_{\max}} \leq S \leq S_{\max}$ с использованием введенных обозначений можно задать с помощью соотношения

$$P_k = ((S_{k_{\max}} - b_k) / (2a_k)) \cdot y(b_k, S_{k_{\max}}, S_{\max}, S_{\max} + \delta). \quad (11)$$

Введенные S -функции с учетом логических условий (10) представляют собой зависимости $P_i^* = f_i(S)$, где символ (*) применен для обозначения оптимального решения. Их сумма является нагрузкой сети, соответствующей экономичному режиму распределения мощности между генераторами электроэнергии:

$$P = \sum_{i=1}^n P_i^*. \quad (12)$$

В алгоритме используется модульная структура вычислений. В каждом модуле, в соответствии с изложенной теорией, формируются решения при соблюдении (9). Приведенный далее фрагмент алгоритма в кодах MatLAB, содержащий модуль k -го генератора с расходной характеристикой

$$P_k = a_k \cdot P_k^2 + b_k \cdot P_k + c_k,$$

позволяет убедиться в простоте выполнения вычислительных операций и получении решения $P_k^* = f_k(S)$ при параллельной работе в составе ЭЭС:

```

if S<=bk;
pk=Pkmin;
elseif(S>bk)&(S<=skmin)
pk=Pkmin;
else (S>skmin)&(S<=skm);
pk=trapmf(S,[bkskmSmax Smax+0.1]);

```

$$p_k = p_k^* (s_k m - b_k) / (2 \cdot a_k);$$

end

$$P_k = [P_k p_k] \cdot G_k;$$

P_k ; % $P_k = P_k^*$ – оптимальное решение для k -го генератора.

Основной функцией модуля является функция `trapmf`, введенная в модуль с соблюдением синтаксиса для выполнения вычислений, определенных соотношением (11). В процессе реализации цикла происходит «наполнение» вектора $P_k = P_k^*$ с учетом логических операций, предусмотренных технологическими требованиями (4). Видно, что вход в активную область инкрементальной характеристики происходит с момента достижения границы $S > S_{kmin}$ при значении $P_k = P_{kmin}$. В случае нулевых начальных условий судовых ДГА, операции, содержащиеся в третьей и четвертой строках программы модуля, могут быть отменены.

Вычислительный алгоритм поиска экономичных режимов генераторов электроэнергии, работающих в параллель, можно представить выполнением последовательности операций:

- 1) подготовить исходные данные по расходным характеристикам параллельно работающих генераторов электроэнергии (1) и представить их в виде элементов матриц A и $P_{огр}$;
- 2) согласно (8), с помощью алгоритма выполнить расчеты элементов $S_{гр}^T$;
- 3) определить левую и правую границы вариации инкремента S в соотношении (9);
- 4) используя вектор $G = [G_1 \ G_2 \ G_3 \ \dots \ G_n]$, обозначить работающие генераторы единицами, а неработающие — нулями и определить максимально допустимую нагрузку на сеть;
- 5) произвести расчеты инкрементальных характеристик по блокам генераторов электроэнергии, согласно (11), и по данным вычислений выполнить оптимальное (по расходу топлива) распределение мощности генераторов по формуле (12);
- 6) рассчитать минимальные расходы топлива (1), используя режимы работы, полученные при выполнении пп. 5 алгоритма. Оптимизировать процесс диспетчеризации распределения активной мощности генераторов при изменении текущего значения нагрузки P электроэнергетической сети.

Эффективность реализации алгоритма зависит от адекватности технологического процесса и модели инкрементального управления, ошибок аппроксимации расходных характеристик, своевременности коррекции исходных данных при изменениях, вызванных переходами на новые сорта топлива, температурными режимами, различными внешними и внутренними возмущениями.

В реальных условиях необходимо обеспечить устойчивость системы, требуемые качественные показатели группы функционирующих генераторов электроэнергии в динамике и другие показатели. Поэтому кратковременные изменения потребляемой мощности, а также незначительные изменения, вызванные перетоками мощности между узлами энергетической сети, могут быть сглажены за счет фильтрации сигналов в определенной частотной области, повышения качества информационного обеспечения, реализации методов и средств предиктивного управления технологическими процессами.

Рассмотрим применение алгоритма на примере ЭЭС с тремя генераторами электроэнергии [13]. Действия алгоритма поясним на примере параллельной работы трех генераторных агрегатов электроэнергии. Расходные характеристики генераторов заданы полиномами [3]:

$$F_1 = 0.004 \cdot P_1^2 + 5.3 \cdot P_1 + 500 \text{ [т условного топлива/ч];}$$

$$F_2 = 0.006 \cdot P_2^2 + 5.5 \cdot P_2 + 400 \text{ [т условного топлива/ч];}$$

$$F_3 = 0.009 \cdot P_3^2 + 5.8 \cdot P_3 + 200 \text{ [т условного топлива/ч].}$$

Технологические ограничения (4) имеют вид

$$P_{огр} = \begin{bmatrix} P_{1min} & P_{1max} \\ P_{2min} & P_{2max} \\ P_{3min} & P_{3max} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 200 & 450 \\ 150 & 350 \\ 100 & 225 \end{bmatrix} \text{ МВт.}$$

Уравнения баланса мощностей на экономичном режиме определяются соотношением (12).

1. Выбор работающих генераторов

$$G = [G_1 \ G_2 \ G_3] = [1 \ 1 \ 1].$$

Матрица граничных инкрементов

$$S_{\text{гп}}^T = \begin{bmatrix} S_{1\text{min}} & S_{2\text{min}} & S_{3\text{min}} \\ S_{1\text{max}} & S_{2\text{max}} & S_{3\text{max}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2a_1P_{1\text{min}} + b_1 & 2a_2P_{2\text{min}} + b_2 & 2a_3P_{3\text{min}} + b_3 \\ 2a_1P_{1\text{max}} + b_1 & 2a_2P_{2\text{max}} + b_2 & 2a_3P_{3\text{max}} + b_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 6.90 & 7.30 & 7.60 \\ 8.90 & 9.70 & 9.85 \end{bmatrix}.$$

Границы вариации S

$$S_{\text{min}} = \min(S_{\text{гп}}^T) = 6.9 \quad \text{и} \quad S_{\text{max}} = \max(S_{\text{гп}}^T) = 9.85.$$

Расчет инкрементальных характеристик выполнен для вектора

$$S = S_{\text{min}} : \text{delt} : S_{\text{max}}$$

с шагом дискретности $\text{delt}=0.01$ и представлен на рис. 1 в виде соотношений

$$P_1^* = f_1(S); \quad P_2^* = f_2(S) \quad \text{и} \quad P_3^* = f_3(S)$$

и критерия качества $J(P)$.

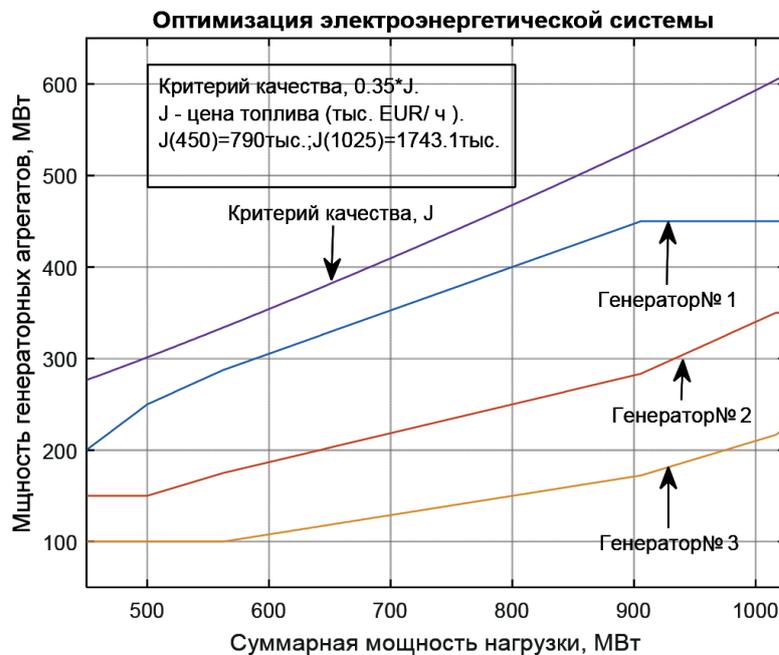


Рис. 1. Распределение мощности трех генераторов при минимальной стоимости электроэнергии

Приведем фрагмент решения из расчетных данных в виде таблицы

P_1^*	200	205	250	332.5	440	450	450	450
P_2^*	150	150	150	205	280	325	340	350
P_3^*	100	100	100	120	170	200	210	225
P	450	455	500	657.5	895	975	1000	1025

2. Выбор работающих генераторов

$$G = [G_1 \ G_2 \ G_3] = [1 \ 0 \ 1].$$

При неработающем втором генераторе максимальная мощность, потребляемая сетью, не должна быть больше 675 МВт. Результаты расчетов экономических режимов при параллельной работе первого и второго генераторов, выполненных по алгоритму, представлены на рис. 2.

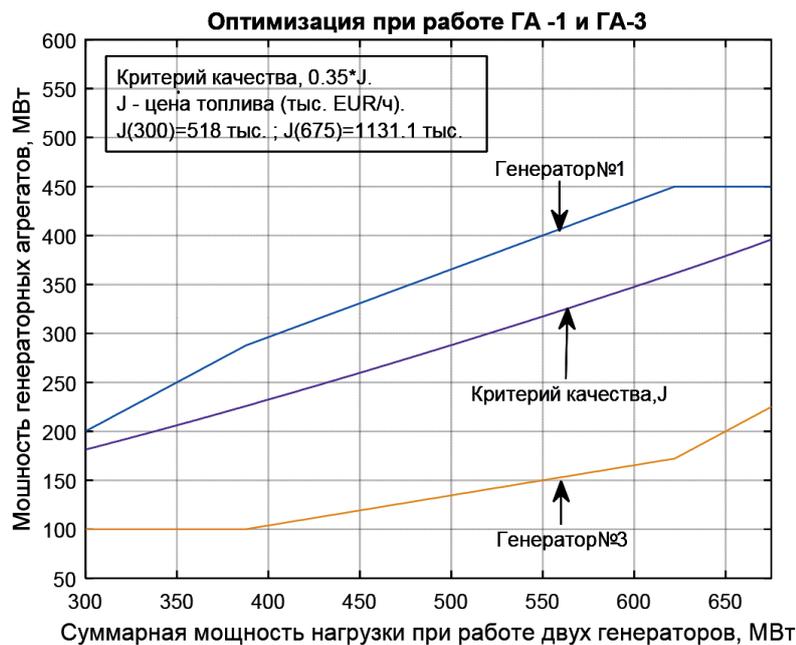


Рис. 2. Распределение мощности двух генераторов при минимальной стоимости электроэнергии

Приведенный далее фрагмент решения содержит распределения мощности двух генераторов, критерий качества F , а также его составляющие F_1 и F_3 для нагрузки сети 300, 420, 598.75 и 675 МВт.

P_1^*	200	310	433.75	450
P_2^*	0	0	0	0
P_3^*	100	110	165	225
P	300	420	598.75	3.6950e 03
F_1	1.72e 03	2.5274e 03	3.5514e 03	3.6950e 03
F_2	0.27e 03	0.9469e 03	1.4020e 03	1.9606e 03
F	2.59e 03	3.4743e 03	4.5935e 03	5.6555e 03

Выводы

Применение алгоритма инкрементального управления для экономии топлива на тепловых электростанциях и судовых ДГА с использованием функций инструментария нечеткой логики позволяет моделировать поведение сложных систем с помощью простых логических правил, а также реализовать эти правила в блочной структуре алгоритмизации комплексной модели всей динамической системы на практике. Применение интеллектуальных технологий, к которым следует отнести технические решения на базе инструментария FuzzyLogicToolbox, в сфере электроэнергетики ставит новые важные задачи развития систем электроснабжения объектов водного транспорта [8]. Их реализация на основе научно обоснованных решений позволит существенно повысить эффективность функционирования объектов водного транспорта в сфере энергосбережения и эксплуатации основных фондов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Барышников С. О. 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.

2. Безюков О. К. Использование хладопотенциала сжиженного природного газа для снижения выбросов диоксида углерода теплоэнергетическими установками, работающими на сжиженном природном газе / О. К. Безюков, В. Л. Ерофеев, А. С. Пряхин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2016. — № 3 (37). — С. 143–155. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-7-3-143-155.
3. Гаврилов А. Анализ воздействия режимов работы тепловых электростанций на окружающую среду / А. Гаврилов, А. Махнитко // *Elektroenergetika Journal*. — 2008. — Vol. 1. — No. 2. — Pp. 27–32.
4. Гришкин В. В. О деятельности в области сокращения выбросов парниковых газов с судов / В. В. Гришкин // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2011. — № 34. — С. 153–166.
5. Жуков В. А. Контроль качества теплоносителей жидкостных систем охлаждения / В. А. Жуков // Контроль. Диагностика. — 2011. — № 9. — С. 66–72.
6. Международная конвенция по предотвращению загрязнения с судов (MARPOL 1973/78). [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://dic.academic.ru/dic.nsf/ruwiki/1828544> (дата обращения: 24.03.2014).
7. Иванченко А. А. Энергетическая эффективность судов и регламентация выбросов парниковых газов / А. А. Иванченко, А. П. Петров, Г. Е. Живлюк // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 3 (31). — С. 103–112.
8. Пантина Т. А. К вопросу формирования системы мониторинга подпрограммы «Внутренний водный транспорт» ФЦП «Развитие транспортной системы России (2010 – 2020 годы)» / Т. А. Пантина, С. А. Бородулина // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 3 (31). — С. 124–132. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-3-124-132.
9. Хасанов И. И. Развитие средств и технологий морского транспорта сжиженных газов: дис. ... канд. техн. наук: 07.00.10 / И. И. Хасанов. — Уфа, 2015. — 160 с.
10. Cho B. B. A distributed control approach to optimal economic dispatch of power generators. Master thesis. — The University of Iowa, 2010. — 32 p.
11. Energy Efficiency related Rules and Regulations — EEDI and Ship Design [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://laradi.fi/images/files/syyspaivat_2014/Deltamarin_Elg_EE_Rules_and_Regulations_-_EEDI.pdf (дата обращения – 10.11.2014).
12. Ramesh G. Optimal Dispatch of Real Power Generation Using Classical Methods / G. Ramesh, T. K. Sunil Kumar // *International Journal of Electronics and Electrical Engineering*. — 2015. — Vol. 3. — No. 2. — Pp. 115–120. DOI: 10.12720/ijeee.3.2.115-120.
13. Saadat H. Power System Analysis / H. Saadat. — USA: McGraw-Hill Higher Education, 1999. — 720 p.
14. Saadat H. Power System Analysis / H. Saadat. — 2nd edition. — McGraw-Hill Primis Custom Publishing, 2002. — 712 p.
15. Shrivastava A. A Simulation Analysis of Optimal Power Flow using Differential Evolution Algorithm for IEEE-30 Bus System / A. Shrivastava, H. M. Siddiqui // *International Journal of Recent Development in Engineering and Technology*. — 2014. — Vol. 2. — Is. 3. — Pp. 50–57.

REFERENCES

1. Baryshnikov, S. O., A. A. Kuzmin, V. V. Saharov, and S. N. Taranuha. *Avtomatizacia i povyshenie effektivnosti ispolzovaniia topliva na sudah*. SPb.: Izd-vo Politeh. Un-ta, 2016 .
2. Bezyukov, Oleg Konstantinovich, Valentin Leonidovich Erofeyev, and Alexander Sergeyeovich Pryakhin. “Uses of a hladopotentsial of the liquefied natural gas for decrease in emissions of carbon dioxide heat power installations.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 3(37) (2016): 143–155. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-7-3-143-155.
3. Gavrilov, A., and A. Mahnitko. “Analiz vozdeistviya rezhimov raboty teplovykh elektrostantsii na okruzhayushchuyu sredyu.” *Elektroenergetika Journal* 1.2 (2008): 27–32.
4. Grishkin, V. V. “O dejatelnosti v oblasti sokraschenija vybrosov parnikovyh gazov s sudov.” *Nauchno-technicheskij sbornik Rossijskogo morskogo registra sudohodstva* 34 (2011): 153–166.
5. Zhukov, V. A. “Quality Control of Heat Transfer for Cooling Liquid System.” *Testing, Diagnostics* 9 (2011): 66–72.
6. International Convention for the prevention of pollution from ships. (MARPOL 1973/78). Web. 24 March 2014 <<http://dic.academic.ru/dic.nsf/ruwiki/1828544>>.

7. Ivanchenko, A. A., A. P. Petrov, and G. E. Zhivlyuk. "Energy efficiency of ships and regulation of greenhouse gas emissions." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 3(31) (2015): 103–112.

8. Pantina, T. A., and S. A. Borodulina. "Formation of monitoring system for federal program «Development of transport system in Russia (2010 - 2020)» (Direction «Inland Water Transport»).» *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 3(31) (2015): 124–132. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-3-124-1329.

9. Hasanov, I. I. *Razvitie sredstv i tehnologij morskogo transporta szhizhennyh gazov*. PhD diss. Ufa, 2015.

10. Cho, B. B. *A distributed control approach to optimal economic dispatch of power generators*. The University of Iowa, 2010.

11. Energy Efficiency related Rules and Regulations — EEDI and Ship Design. Web. 10 Nov. 2014 <http://laradi.fi/images/files/syyspaivat_2014/Deltamarin_Elg_EE_Rules_and_Regulations_-_EEDI.pdf>.

12. Ramesh, Guguloth, and T. K. Sunil Kumar. "Optimal Dispatch of Real Power Generation Using Classical Methods." *International Journal of Electronics and Electrical Engineering* 3.2 (2015): 115–120. DOI: 10.12720/ijeee.3.2.115-120.

13. Saadat H. *Power System Analysis*. USA: McGraw-Hill Higher Education, 1999.

14. Saadat H. *Power System Analysis*. 2nd edition. McGraw-Hill Primis Custom Publishing, 2002.

15. Shrivastava, Amit, and Hasan Mustafa Siddiqui. "A Simulation Analysis of Optimal Power Flow using Differential Evolution Algorithm for IEEE-30 Bus System." *International Journal of Recent Development in Engineering and Technology* 2.3 (2014): 50–57.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Дмитриенко Дмитрий Владимирович —

кандидат экономических наук
 ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
 адмирала С. О. Макарова»
 198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
 ул. Двинская, 5/7
 e-mail: kaf_electricautomatic@gumrf.ru

Чертков Александр Александрович —

кандидат технических наук, доцент
 ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
 адмирала С. О. Макарова»
 198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
 ул. Двинская, 5/7
 e-mail: chertkov51@mail.ru,
kaf_electricautomatic@gumrf.ru

Сабуров Сергей Валерьевич — аспирант

Научный руководитель:
 Сахаров Владимир Васильевич —
 доктор технических наук, профессор
 ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
 адмирала С. О. Макарова»
 198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
 ул. Двинская, 5/7
 e-mail: kaf_osnibr@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Dmitrienko, Dmitry V. —

PhD
 Admiral Makarov State University
 of Maritime and Inland Shipping
 5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg 198035,
 Russian Federation
 e-mail: kaf_electricautomatic@gumrf.ru

Chertkov, Alexandr A. —

PhD, associate professor
 Admiral Makarov State University
 of Maritime and Inland Shipping
 5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg 198035,
 Russian Federation
 e-mail: chertkov51@mail.ru

Saburov, Sergei V. — Postgraduate
Supervisor:

Saharov, Vladimir V. —
 Dr. of Technical Sciences, professor
 Admiral Makarov State University
 of Maritime and Inland Shipping
 5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg 198035,
 Russian Federation
 e-mail: kaf_osnibr@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 9 февраля 2017 г.

Received: February 9, 2017.