

METHOD OF ENERGY-EFFICIENT MANAGING THE SHIP'S DIESEL-GENERATOR SETS

V. V. Sakharov, A. A. Chertkov, S. V. Saburov

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

For marine diesel generator sets (DGS), working for a total load of variable modes of active and reactive power, their economy greatly depends on the time of day, weather conditions, ambient temperature, location, as well as flow characteristics of each set. While the total power consumed by ship systems and objects of various purposes can vary widely. In these circumstances, maintenance of efficient operation modes of DGS is possible due to the optimal distribution of the load between the concurrent DGS, at which generated electricity cost is minimized. The task of optimizing the load on generators is complicated by the significant differences in the technical, operating and economic characteristics of individual units of the system, as well as its analytical description in the presence of various regulators of complexity degree. In the presence of powerful computing setting, advanced tools and methods of numerical optimization the implementation of energy-efficient modes of DGS at a qualitatively new level through the use of digital technologies is offered to ensure.

Energy-efficient algorithm of load balancing between concurrent DGS using the optimality principle of R. Bellman, allowing instead of one complex task of energy-saving for a group of k generators to consistently solve k simple task of energy-saving for each generator separately, is developed. Unlike the existing ways to implement the energy-efficient modes, DGS method is applicable for digital management (on-line) of ship's current energy network, not sensitive to nonlinearity of flow characteristics of its sets, as well as to the issue of "dimensionality curse" of ship's network. In the algorithm, the search for optimal solutions is proposed to carry out using rotation and sequential analysis technology elements in each diagonal of a matrix that simplifies the calculations. The algorithm effectiveness and correctness of the obtained results are confirmed by a specific example.

Keywords: diesel-generator sets, parallel work, networking, optimization, fuel consumption, flow characteristics, rotation matrix.

For citation:

Sakharov, Vladimir V., Alexander A. Chertkov, and Sergey V. Saburov. "Method of energy-efficient managing the ship's diesel-generator sets." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S.O. Makarova* 11.4 (2019): 786–793. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-4-786-793.

УДК 681.5

СПОСОБ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ СУДОВЫМИ ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРНЫМИ АГРЕГАТАМИ

В. В. Сахаров, А. А. Чертков, С. В. Сабуров

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

Решается проблема обеспечения экономичности дизель-генераторных агрегатов, работающих на общую нагрузку (ДГА) в режимах с изменяемой активной и реактивной мощностью, в зависимости от времени суток, погодных условий, температуры окружающей среды, местоположения, а также расходных характеристик каждого агрегата. При этом суммарная мощность, потребляемая судовыми системами и объектами различного назначения, может изменяться в широких пределах. В этих условиях поддержание экономичных режимов возможно за счет оптимального распределения нагрузки между параллельно работающими ДГА, при котором стоимость вырабатываемой электроэнергии минимизируется. Отмечается, что решение данной задачи осложняется тем, что ДГА могут иметь различные настройки расходных характеристик, работать на различных сортах топлива, отличаться по номинальной мощности, техническому состоянию, что связано со сложностями создания математических моделей, адекватных объектам. Предлагается при наличии мощных вычислительных сред, развитых инструментов

и методов численной оптимизации обеспечить реализацию энергоэффективных режимов работы ДГА на качественно новом уровне путем использования цифровых технологий. Построен алгоритм энергоэффективного распределения нагрузки между параллельно работающими ДГА с использованием принципа оптимальности Р. Беллмана, позволяющего вместо одной сложной задачи энергосбережения для группы, состоящей из k генераторов последовательно решать k простых задач энергосбережения для каждого генератора в отдельности. В отличие от существующих способов реализации энергоэффективных режимов работы ДГА, предлагаемый метод применим для цифрового управления (в режиме «on-line») судовой энергосетью, нечувствителен к нелинейностям расходных характеристик ее агрегатов, а также к вопросу «проклятия размерности» судовой сети. В алгоритме поиск оптимальных решений предлагается осуществлять с использованием оператора вращения массивов и технологии последовательного анализа элементов каждой диагонали матрицы, что обеспечивает упрощение вычислений. Эффективность применения алгоритма и корректность полученных результатов подтверждены конкретным примером.

Ключевые слова: дизель-генераторные агрегаты, параллельная работа, сеть, расход топлива, оптимизация, расходные характеристики, матрицы вращения.

Для цитирования:

Сахаров В. В. Способ энергоэффективного управления судовыми дизель-генераторными агрегатами / В. В. Сахаров, А. А. Чертков, С. В. Сабуров // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 4. — С. 786–793. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-4-786-793.

Введение (Introduction)

Применение цифровых технологий в решении оптимизационных задач позволяет не только эффективно работать с большими массивами чисел, но и совершенствовать вычислительные алгоритмы, обеспечивать их устойчивость и быструю сходимость итерационных процедур. К такой технологии можно отнести рассматриваемый далее способ, основанный на использовании операции вращения матриц.

В составе электроэнергетических систем современных речных землесосов имеется, как правило, несколько дизель-генераторных агрегатов (ДГА), первичные двигатели которых имеют различные расходные характеристики [1]–[2]. В то же время большое число ограничений и моделей расходных характеристик генераторов электроэнергии речных землесосов, из-за значительных погрешностей аппроксимации квадратичными полиномами, вынуждает к поиску других алгоритмов энергоэффективных решений, адекватных реальному процессу (например, алгоритмов оптимального распределения активной мощности генерирующих источников). Наиболее подходящим методом для осуществления цифрового (on-line) управления энергоэффективностью судовых генераторов является принцип оптимальности Р. Беллмана, для которого нелинейность расходных характеристик генераторов, а также размерность решаемых задач с учетом мощностей современных вычислительных сред не имеют существенного значения [3].

Для судовой электростанции основными эксплуатационными режимами являются режимы, в которых потребляемая активная и реактивная мощности изменяются во времени [4]. Энергоэффективность таких систем может быть повышена за счет снижения потерь электроэнергии как в сетях, так и в преобразователях различных видов энергии в электрическую [5]. Судовые дизель-генераторы имеют нелинейные расходные характеристики, что с позиций теории управления предопределяет возможность повышения энергоэффективности на парциальных режимах. Работа ДГА при широком спектре внешних воздействий (на ходу, стоянке в порту, выполнении различных технологических режимов, изменении температуры воздуха и забортной воды, времени суток и др.) на нагрузках, меньших номинальной, определяет резерв экономии топлива в каждом рейсе, использование которого способствует повышению показателей энергоэффективности судна [6]–[7].

Методы и материалы (Methods and Materials)

При условии, если питание сети обеспечивается одним генератором и потребляемая мощность не превышает его номинальной мощности, в процедуре оптимизации нет необходимости. Если на общую нагрузку работают несколько однотипных генераторов, имеющих идентичные

расходные характеристики, то оптимальному режиму их работы будет соответствовать режим с одинаковым распределением потребляемой сетью мощности между этими агрегатами или, иными словами, когда расходные характеристики этих агрегатов не идентичны, для обеспечения экономической работы генераторов требуется перераспределение нагрузки между ними [8]–[9].

Предложен алгоритм энергоэффективного управления параллельно работающими ДГА с различными расходными характеристиками для реализации такого распределения их на общую нагрузку, которое получается с использованием принципа оптимальности Р. Беллмана. На основе алгоритма построена программа в кодах MATLAB, реализующая этот алгоритм. Расходные характеристики имеют вид нелинейных функций:

$$F_i = f_i(P_i), i = 1, 2, \dots, n, \quad (1)$$

которые определяются экспериментально. Для аппроксимации характеристик могут использоваться полиномы, сплайн-аппроксимации (при работе ДГА на различных видах топлива), способы функциональной «пригонки» нелинейных характеристик к эксперименту, содержащиеся в вычислительных средах (инструменты «fitting»), вейвлет-аппроксимации [10]–[12]. Все указанные способы с достаточной для практики точностью позволяют аппроксимировать функции (1) по экспериментальным значениям F_i и P_i , где P_i — мощность i -го генераторного агрегата; F_i — стоимость электроэнергии при работе агрегата с мощностью P_i ; n — число генераторов, работающих в сети.

Оптимизация должна производиться с введением ограничений [13], [14]. Ограничения-равенства устанавливаются соотношением (2), согласно которому суммарная мощность, генерируемая k генераторами в любой момент t , должна равняться мощности $P(t)$, потребляемой сетью:

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

Для реализации энергоэффективного управления требуется минимизировать критерий

$$F(t) = \sum_{i=1}^k f_i(P_i(t)), k = 1, 2, \dots, n, \quad (3)$$

путем распределения мощности между k параллельно работающими ДГА при соблюдении ограничений. Тогда, с учетом ограничений-неравенств, критерий (3) можно представить в виде:

$$J(k, t) = \min \sum_{i=1}^k f_i(P_i(t)) \quad k = 1, 2, \dots, n;$$

$$0 \leq P_1(t) \leq P_{1\max};$$

$$0 \leq P_2(t) \leq P_{2\max};$$

.....

$$0 \leq P_k(t) \leq P_{k\max};$$
(4)

где $P_{i\max}$ — максимальная мощность, развиваемая i -генераторным агрегатом.

Ограничения могут изменяться по разным причинам (например, расход моторесурса, ремонт узлов ДГА и др.).

Применяя метод динамического программирования, выполним минимизацию функционала (4) при соблюдении ограничения (2) путем разделения одной сложной задачи на ряд из k простых задач, подлежащих дальнейшему решению:

$$J(k, P) = \min [f_k(P_k) + J(k-1, P - P_k)], 0 \leq P_k \leq P_{k\max} \quad (5)$$

при $P > 0, k = 2, 3, \dots$, причем $J(1, P) = f_1(P)$ для $P \leq P_{1\max}$.

Решение (5) получим, применяя простое свойство многоступенчатых процессов в данном классе задач, с учетом специфики рассматриваемой задачи. При работе на общую нагрузку все генераторные агрегаты не должны работать в режимах максимальной мощности, иначе процесс поиска минимума функционала качества не имеет смысла. Поэтому требуется формировать группы генераторов по развиваемой мощности в различных комбинациях (сочетаниях). Применяемые в этих

случаях расчетные таблицы (например, из работы [1, с. 132]) сложны в использовании. Для управления процессом в реальном масштабе времени необходим алгоритм с программной реализацией вычислительной процедуры, позволяющей минимизировать ее объем и время выполнения. Такая программная поддержка построена на основе инструментария вычислительной среды MATLAB.

Алгоритм демонстрируется на примере, когда расходные характеристики трех параллельно работающих ДГА, режимы которых подлежат оптимизации согласно (5), заданы полиномами второго порядка следующего вида:

$$\begin{aligned} F_1 &= 0,035P_1^2 + 2,2P_1 + 90; \\ F_2 &= 0,018P_2^2 + 1,42P_2 + 100; \\ F_3 &= 0,015P_3^2 + 0,90P_3 + 130. \end{aligned} \quad (6)$$

Особенность решения задачи оптимизации с использованием рекуррентных соотношений состоит в приведении расчетных данных F_i к матрицам прямоугольной формы. При этом образуется массив размерности $(M \times N)$, где M — число строк, N — число столбцов ($M \geq N$). Основание массива формируется с помощью оператора «Meshgrid». Оптимальные решения, располагающиеся в диагоналях матриц, выбираются путем вращения массивов с использованием оператора «rot 90». Поиск решений выполняется способом поэлементного анализа элементов каждой диагонали. В результате обеспечивается «просмотр» решений (не только оптимальных) для всех возможных комбинаций генераторов, работающих на общую нагрузку. Ограничения на число генерирующих источников электроэнергии в общем случае не вводятся.

Фрагмент первого блока (подготовки данных) программы, реализованной в файле «sah8.m»:

```
% sah8.m 28.04.2019
% Оптимизация режимов работы судовой электростанции землесоса.
% Применение матриц вращения
% =====
% Подготовка данных.
delt=10;
P1=0:delt:50;
P2=0:delt:70;
P3=0:delt:80;
F1=(0.035*(P1.^2)+2.2*P1+90);
F2=(0.018*(P2.^2)+1.42*P2+100);
F3=(0.015*(P3.^2)+0.90*P3+130);
% pause
```

В блоке подготовки данных приняты следующие обозначения: $delt$ — шаг дискретности задаваемой мощности дизель-генераторов; P_1, P_2, P_3 — векторы дискретных значений мощностей, соответственно, первого–третьего генераторов, для которых $P_{1\max} = 50$ кВт, $P_{2\max} = 70$ кВт, $P_{3\max} = 80$ кВт; F_1, F_2, F_3 — расходные характеристики (6), заданные полиномами второго порядка, где значения, равные, соответственно, 90, 100 и 130 ед., приведены для режима холостого хода. Оператор «pause» служит для редактирования входных данных после просмотра значений функций F_1, F_2, F_3 , а также полученных решений.

Во втором блоке программы, согласно соотношениям (5), решается система рекуррентных соотношений и поэтапно реализуется алгоритм оптимизации в пространстве состояний:

```
for T=1:2;
    r1=size(F1);r2=size(F2);
if r1(2)<=r2(2)
    N=r1(2); M=r2(2);
else
```

```

N=r2(2); M=r1(2);
end
[x,y]=meshgrid(F1,F2);
z=x+y;
M;
N;
X=rot90(z,3);
%.....

```

Первый шаг предназначен для численной оптимизации режимов работы двух параллельно работающих генераторов. Решение на втором шаге, согласно рекуррентному соотношению, представляется в форме, удобной для поиска минимума критерия для первых двух и третьего генератора. Аналогично получается решение для первых трех и четвертого генератора — на третьем шаге, для пяти генераторов — на четвертом шаге и т. д. На с. 791 в разделе «Результаты» приведен пример экономичного распределения мощности для электростанции с тремя ДГА. Представлено решение, полученное на двух шагах. Согласно алгоритму, на каждом шаге формируется матрица z размерности $(m \times n)$. С этой целью сначала с помощью оператора «size» определяются размерности $r1$ и $r2$ векторов $F1$, $F2$. Затем находятся элементы матрицы z . Минимумы искомого решения находятся вращением z , выполняемым с применением оператора «rot90», что позволяет анализировать массивы чисел, находящиеся ниже главной диагонали.

Во втором цикле «for-end» формируются матрицы XX , IM и $IM3$. Первая матрица XX служит для размещения оптимальных решений, полученных в соответствующем цикле T , вторая и третья матрицы (соответственно IM и $IM3$) — для размещения оптимальных вариантов распределения мощностей генераторов:

```

XX=[];IM=[];IM3=[];
for cc=-(N-1):(M-1);
    [v,I]=min(diag(X,cc));XX=[XX v];
if cc<=-1
    IM3=[IM3 abs(cc-I)];
else
    IM=[IM I];
end
    IMM=[IM3 IM];
end
X1=rot90(XX,2);IM1=rot90(IMM,2);
Opt1=[X1;IM1.*delt-delt];
%.....
end

```

По окончании вычислительной процедуры сформирована матрица «Opt», содержащая в каждой из четырех строк оптимальные распределения мощности на каждом шаге. В первой строке матрицы находятся минимальные значения критерия, во второй и третьей строках — оптимальные распределения мощности очередного k -го (генератора) и суммарной мощности $(k-1)$ предшествующих генераторов. Элементами четвертой строки представлены значения мощности, потребляемой судовой сетью. Затем вектору $F2$ присваиваются значения первой строки матрицы «Opt». Программа возвращается ко второму шагу с использованием расходной характеристики F_i третьего генераторного агрегата. С выполнением цикла «for ... end» завершается вычислительная процедура в целом.

Результаты (Results)

Оптимальные распределения мощности параллельно работающих на общую нагрузку генераторных агрегатов.

>> % Решение на первом шаге: >> Opt (:,1:13)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
190.0	206.0	225.6	248.8	274.3	301.1	331.5	364.0	398.0	435.6	475.1	521.6	575.1
0	0	0	0	10.0	10.0	10.0	20.0	20.0	20.0	30.0	40.0	50.0
0	10.0	20.0	30.0	30.0	40.0	50.0	50.0	60.0	70.0	70.0	70.0	70.0
0	10.0	20.0	30.0	40.0	50.0	60.0	70.0	80.0	90.0	100.0	110.0	120.0

>> % Решение на втором шаге:

>> Opt (:,1:21)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
320.0	330.5	344.0	360.0	376.5	396.0	415.6	438.1	461.30	486.8	512.3	539.1	567.6
0	10.0	20.0	20.0	30.0	40.0	40.0	50.0	50.0	50.0	60.0	60.0	70.0
0	0	0	10.0	10.0	10.0	20.0	20.0	30.0	40.0	40.0	50.0	50.0
0	10.0	20.0	30.0	40.0	50.0	60.0	70.0	80.0	90.0	100.0	110.0	120.0
14	15	16	17	18	19	20	21					
598.0	629.5	662.0	696.0	733.6	773.1	819.6	873.1					
70.0	80.0	80.0	80.0	80.0	80.0	80.0	80.0					
60.0	60.0	70.0	80.0	90.0	100.0	110.0	120.0					
130.0	140.0	150.0	160.0	170.0	180.0	190.0	200.0					

Обсуждение (Discussion)

Из приведенных расчетных данных следует, что на первом шаге решения — для двух (первого и второго) параллельно работающих генераторов число столбцов матрицы “Opt” равно 13; на втором — для трех генераторов получено 21 решение.

Рассмотрим последовательность действий по использованию полученного решения. Предположим, что потребляемая сетью мощность генерируется первым и вторым генераторами и составляет 120 кВт. Тогда, согласно расчетным данным на первом шаге, оптимальные распределения мощности равны: для первого генератора 50 кВт; для второго — 70 кВт. Минимальные потери, согласно критерию, равны 575.1 расчетных единиц (см. последний столбец, первую строку).

Для трех работающих генераторов на общую нагрузку при потребляемой мощности 120 кВт (см. решение: второй шаг, первая строка, 13 столбец) минимум критерия составит 567.6. При таком распределении мощности третий генератор 70 кВт, второй — 40 кВт, первый — 10 кВт.

Предположим, что потребляемая сетью мощность составила 180 кВт. Тогда, согласно расчетным данным, минимальным затратам будет соответствовать следующее распределение мощности генераторов: P1 = 60 кВт, P2 = 40 кВт; P3 = 80 кВт.

Полученный результат можно проверить путем прямой подстановки P1, P2 и P3 в формулы F1, F2, F3 (см. текст файла «sah8.m» (с. 789)). Значение минимума критерия составляет для полученного распределения 873.1. Очевидно, что любое другое распределение не будет соответствовать минимуму критерия качества.

Выводы (Summary)

1. Полученные с применением принципа оптимальности Беллмана результаты энергоэффективных решений для группы дизель-генераторов, работающих на судовую сеть потребителей электроэнергии, полностью подтверждают его практическую реализуемость, базирующуюся на инвариантном погружении и рекуррентных соотношениях.

2. Для повышения точности решения необходимо уменьшить шаг дискретности с учетом ограничений в форме равенств и неравенств. Для устойчивости системы при скачкообразных изменениях нагрузки сети следует применять PID-регуляторы [15], а также различные классы интеллектуальных систем.

3. Алгоритм пригоден для автоматизации и оптимизации распределения нагрузки судовых ДГА, а также решения задач диспетчеризации источников электроэнергии в электроэнергетических сетях и системах.

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 Политехн. ун-та, 2016. — 390 с.
2. 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.
3. Bellman R. On a Routing Problem / R. Bellman // Quarterly of Applied Mathematics. — 1958. — Vol. 16. — № 1. — С. 87–90. DOI: 10.1090/qam/102435.
4. Гаврилов А. Анализ воздействия режимов работы тепловых электростанций на окружающую среду / А. Гаврилов, А. Махнитко // Elektroenergetika. — 2008. — Vol. 1. — No. 2. — Pp. 27–32.
5. Чертков А. А. Энергоэффективное управление судовой динамической системой на основе теории неравенств / А. А. Чертков, Д. С. Тормашев, С. В. Сабуров // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 4 (26). — С. 54–58.
6. 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.
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. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-3-103-112.
8. Cho B. B. A distributed control approach to optimal economic dispatch of power generators. MS (Master of Science) Thesis / B. B. Cho. — The University of Iowa, 2010. — 32 p. DOI: 10.17077/etd.qux5q9b5.
9. Energy Efficiency related Rules and Regulations — EEDI and Ship Design. EEDI and other EEE Rules and Regulations. — 2014. — 55 p. [Электронный ресурс] / Mia Elg. — Режим доступа: http://laradi.fi/images/files/suyspaivat_2014/Deltamarin_Elg_EE_Rules_and_Regulations_-_EEDI.pdf (дата обращения: 10.11.2014).
10. Saadat H. Power System Analysis / H. Saadat. — USA: McGraw-Hill Higher Education, 1999. — 720 p.
11. Saadat H. Power System Analysis / H. Saadat. — 2nd edition. — McGraw-Hill Primis: Custom Publishing, 2002. — 712 p.
12. Shrivastava A. A. Simulation Analysis of Optimal Power Flow using Differential Evolution Algorithm for / A. Shrivastava, H. M. Siddiqui // International Journal of Recent Development in Engineering and Technology. — 2014. — Vol. 2. — Is. 3. — Pp. 50–57.
13. Сахаров В. В. Алгоритм энергоэффективного управления курсом судна / В. В. Сахаров, А. Г. Таранин, А. А. Чертков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2013. — № 3 (22). — С. 38–46.
14. Ramesh G. Optimal Dispatch of Real Power Generation Using Classical Methods / G. Ramesh, T. K. Sunil // International Journal of Electronics and Electrical Engineering. — 2015. — Vol. 3. — No. 2. — Pp. 115–120. DOI: 10.12720/ijeee.3.2.115-120.
15. Чертков А. А. Параметрическая настройка ПИД-регуляторов динамических систем средствами MATLAB / А. А. Чертков, Д. С. Тормашев, С. В. Сабуров // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 5 (27). — С. 164–171.

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. Dmitrienko, Dmitry V., Alexander 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.
3. Bellman, Richard. “On a Routing Problem.” *Quarterly of Applied Mathematics* 16.1 (1958): 87–90. DOI: 10.1090/qam/102435.

4. Gavrilov, A., and A. Mahnitko. "Analysis of the effects of the modes of operation of thermal power plants on the environment Wednesday." *Elektroenergetika* 1.2 (2008): 27–32.
5. Chertkov, Alexander A., Dmitry S. Tormashov, and Sergei V. Saburov. "Shipping dynamic system energoefficient control on the base of inequality theory." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 4(26) (2014): 54–58.
6. Grishkin, V.V. "O dejatelnosti v oblasti sokraschenija vybrosov parnikovyh gazov s sudov." *Nauchno-tehnicheskij sbornik Rossijskogo morskogo registra sudohodstva* 34 (2011): 153–166.
7. Ivanchenko, Alexander 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. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-3-103-112.
8. Cho, Brian Bumseok. *A distributed control approach to optimal economic dispatch of power generators. MS (Master of Science) thesis.* The University of Iowa, 2010. DOI: 10.17077/etd.qux5q9b5.
9. Elg, Mia. *Energy Efficiency related Rules and Regulations - EEDI and Ship Design. EEDI and other EEE Rules and Regulations.* 2014. Web. 10 Nov. 2014 <http://laradi.fi/images/iles/syyspaivat_2014/Deltamarin_Elg_EE_Rules_and_Regulations_-_EEDI.pdf>.
10. Saadat, Hadi. *Power System Analysis.* USA: McGraw-Hill, 1999.
11. Saadat, Hadi. *Power System Analysis.* 2nd edition. McGraw-Hill Primis Custom Publishing 2002.
12. Shrivastava, A., and H.M. 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.
13. Saharov, Vladimir V., Alexander G. Taranin, and Alexander A. Chertkov. "Energoefficient ship steering control algorithm." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 3(22) (2013): 38–46.
14. Ramesh, Guguloth, and T. K. Sunil. "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.
15. Chertkov, Alexander A., Dmitry S. Tormashov, and Sergei V. Saburov. "Dynamic systems parametric arrange by means PID tuner in MATLAB." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 5(27) (2014): 164–171.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

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: _saharov_@rambler.ru, SaharovVV@gumrf.ru
Чертков Александр Александрович — доктор технических наук, профессор
 ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»
 198035, Российская Федерация,
 Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7
 e-mail: chertkov51@mail.ru,
kaf_electricalautomatic@gumrf.ru
Сабуров Сергей Валерьевич — аспирант
Научный руководитель:
 Сахаров Владимир Васильевич
 ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»
 198035, Российская Федерация,
 Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7
 e-mail: kaf_osnivr@gumrf.ru

Sakharov, 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: _saharov_@rambler.ru, SaharovVV@gumrf.ru
Chertkov, Alexandr A. — 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: chertkov51@mail.ru,
kaf_electricalautomatic@gumrf.ru
Saburov, Sergey V. — Postgraduate Supervisor:
 Sakharov, Vladimir V.
 Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping
 5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035, Russian Federation
 e-mail: kaf_osnivr@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 24 июня 2019 г.
 Received: June 24, 2019.