

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-2-411-419

ANALYSIS OF INFLUENCE OF NON-PROPORTIONAL DISTRIBUTION OF LOAD BETWEEN PARALLELLY OPERATING GENERATORS FOR THE POWER FACTOR OF LOADING OF EACH GENERATOR

A. A. Vinogradov

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

The article analyzes the influence of the disproportionate distribution of active and reactive components of the total electric power on the coefficients of the capacities that fall on each of the DGS operating in parallel. Expressions are given showing the dependence of load power factor for a generator set from nature of the total electrical load and the ratio of distributed generators active and reactive components of load current. It is shown that proportional distribution of the load, the power factors of the loads attributable to each of the DGS operated in parallel are the same and equal to the power factor of the total electrical load. Produced an overview of the requirements of the classification societies to how should be distributed the load between the parallel running of diesel generator units, for example, Rules for the classification and construction of sea-going ships of Russian Maritime register of shipping, and permissible deviations from the required distribution of the electric load. The possibility of using the method of disproportionate distribution of the electric load between parallel diesel generator sets, but within the permissible deviations, to reduce the total specific fuel consumption, in view of the difference in the characteristic dependence of the specific fuel consumption $q(P, \cos\Phi)$ on the load power and power factor for each generator set, which take place even for the generating units of the same nominal power and series, and, in particular, for a long period of operation, is analyzed. An example of proportional and disproportionate load distribution for two generator sets of different rated capacities with specified values of the total load current, the ratio of the nominal capacity of the generators (coefficient of proportionality) and the pre-determined load distribution between them is given.

Keywords: diesel-generator set, specific fuel consumption, parallel operation, proportional distribution, disproportionate power distribution, load power factor, load current, active and reactive components.

For citation:

Vinogradov, Andrey A. "Analysis of influence of non-proportional distribution of load between parallely operating generators for the power factor of loading of each generator." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.2 (2018): 411–419. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-2-411-419.

УДК 621.313.322-843.6

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ НЕПРОПОРЦИОНАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НАГРУЗКИ МЕЖДУ ПАРАЛЛЕЛЬНО РАБОТАЮЩИМИ ГЕНЕРАТОРАМИ НА КОЭФФИЦИЕНТ МОЩНОСТИ НАГРУЗКИ КАЖДОГО ГЕНЕРАТОРА

А. А. Виноградов

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

В статье проводится анализ того, как влияет непропорциональное распределение активных и реактивных составляющих общей электрической мощности на коэффициенты мощностей, приходящихся на каждый из дизель-генераторных агрегатов (ДГА), работающих параллельно. Приведены выражения, отображающие зависимость коэффициента мощности нагрузки того или иного генераторного агрегата

от характера общей электрической нагрузки и от соотношения распределяемых между генераторами активных и реактивных составляющих тока нагрузки. Показано, что при пропорциональном распределении нагрузки коэффициенты мощности нагрузок, приходящихся на каждый из ДГА, работающих параллельно, оказываются одинаковыми и равными коэффициенту мощности общей электрической нагрузки. Выполнен обзор требований классификационных обществ к тому, как должна распределяться нагрузка между параллельно работающими ДГА на примере Правил классификации и постройки морских судов Российского морского регистра судоходства и рассмотрены допустимые отклонения от требуемого распределения электрической нагрузки. Проанализирована возможность использования приведенного метода непропорционального распределения электрической нагрузки между параллельно работающими ДГА в рамках допустимых отклонений для уменьшения суммарного удельного расхода топлива ввиду неодинаковости характерных зависимостей удельного расхода топлива $q(P, \cos\varphi)$ от мощности нагрузки и коэффициента мощности для каждого генераторного агрегата, которые имеют место даже для генераторных агрегатов одинаковой номинальной мощности и серии, и в особенности при длительном периоде эксплуатации. Приведены примеры пропорционального и непропорционального распределения нагрузки для двух генераторных агрегатов различных номинальных мощностей с заданными значениями общего тока нагрузки, отношения номинальных мощностей генераторов (коэффициент пропорциональности) и предполагаемого распределения нагрузки между ними.

Ключевые слова: дизель-генераторный агрегат, удельный расход топлива, параллельная работа, пропорциональное распределение, непропорциональное распределение мощности, коэффициент мощности нагрузки, ток нагрузки, активная и реактивная составляющие.

Для цитирования:

Виноградов А. А. Анализ влияния непропорционального распределения нагрузки между параллельно работающими генераторами на коэффициент мощности нагрузки каждого генератора / А. А. Виноградов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 2. — С. 411–419. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-2-411-419.

Введение (Introduction)

При параллельной работе дизель-генераторных агрегатов (ДГА) общая электрическая нагрузка должна распределяться между ними согласно требованиям Правил классификации и постройки морских судов Российского морского регистра судоходства (РМРС) следующим образом [1]:

- при параллельной работе генераторов переменного тока в диапазоне 20 – 100 % общей нагрузки ее распределение на каждый генератор должно происходить пропорционально их мощностям и не должно отличаться более чем на 15 % от расчетной нагрузки большего из генераторов или на 25 % от расчетной нагрузки рассматриваемого генератора в зависимости от того, что меньше;
- генераторы переменного тока, предназначенные для параллельной работы, должны снабжаться такой системой компенсации реактивного напряжения, чтобы во время параллельной работы распределение реактивной нагрузки между генераторами не отличалось от их пропорциональной мощности более чем на 10 % номинальной реактивной нагрузки наибольшего генератора или не более чем на 25 % номинальной мощности наименьшего генератора, если это значение меньше вышеуказанного.

В работе [2] изложена методика непропорционального распределения нагрузки между параллельно работающими ДГА с целью минимизации удельного расхода топлива (УРТ) и приведено выражение, отражающее зависимость УРТ от нагрузки генераторного агрегата и коэффициента мощности $q(P, \cos\varphi)$. Вывод данного выражения выполнен в работах [3] – [5]. Ввиду неодинаковости характерных зависимостей УРТ для каждого из параллельно работающих генераторных агрегатов (особенно для генераторных агрегатов, эксплуатирующихся в течение длительного времени), манипуляции с распределением мощности и / или изменением коэффициента мощности, приходящейся на тот или иной ДГА, может обеспечить снижение расхода топлива [6] – [8]. В статье исследуется возможность изменения коэффициентов мощности нагрузки каждого из параллельно работающих генераторов путем непропорционального распределения между ними активных и реактивных составляющих тока нагрузки.

Вычисления и обсуждения (Calculations and Discussions)

Рассмотрим два ДГА, работающих в параллель на общую электрическую нагрузку.

Пусть $P_{1н}$, кВт — номинальная мощность первого ДГА; $P_{2н}$, кВт — номинальная мощность второго ДГА; $P_{нагр}$, кВт — нагрузка на шинах главного распределительного щита (ГРЩ); $\cos \varphi$ — коэффициент мощности нагрузки; $k = P_{1н} / P_{2н}$ — отношение номинальных мощностей первого и второго генераторов, или коэффициент пропорциональности; I , А — полный ток нагрузки.

Предположим, что частота электрического тока f , Гц, и напряжение U , В, постоянны и во время параллельной работы ДГА не изменяются, что обеспечивается автоматическими устройствами (автоматические регуляторы напряжения, устройство регулирования частоты напряжения).

Полный ток нагрузки I имеет активную I_a и реактивную I_p составляющие: $I = I_a + i \cdot I_p$, где i — мнимая единица.

Обозначим I_1 — ток нагрузки первого ДГА; I_2 — ток нагрузки второго ДГА.

Тогда можно записать:

$$I = I_1 + I_2;$$

$$I_1 = I_{a1} + iI_{p1};$$

$$I_2 = I_{a2} + iI_{p2},$$

где I_{a1} , I_{a2} — активные составляющие токов нагрузки первого и второго ДГА соответственно; I_{p1} , I_{p2} — реактивные составляющие токов нагрузки первого и второго ДГА соответственно.

Таким образом, получим:

$$I_a = I_{a1} + I_{a2}; \quad (1)$$

$$I_p = I_{p1} + I_{p2}. \quad (2)$$

Как указано ранее, при параллельно работе ДГА полный ток нагрузки должен быть распределен между ними пропорционально их номинальным ($P_{н}$) мощностям, т. е.

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{P_{1н}}{P_{2н}} = k. \quad (3)$$

Добиться выполнения этого условия можно, если активные и реактивные составляющие токов нагрузки первого и второго генераторов будут распределены пропорционально номинальным мощностям ДГА, т. е.

$$\frac{I_{a1}}{I_{a2}} = \frac{I_{p1}}{I_{p2}} = k. \quad (4)$$

Покажем это. Так как $\frac{I_{a1}}{I_{a2}} = k$ и $\frac{I_{p1}}{I_{p2}} = k$, то $I_{a1} = kI_{a2}$ и $I_{p1} = kI_{p2}$.

Тогда $I_1 = I_{a1} + iI_{p1} = kI_{a2} + ikI_{p2} = k(I_{a2} + iI_{p2}) = kI_2$ и $\frac{I_1}{I_2} = \frac{kI_2}{I_2} = k$.

При обеспечении пропорционального распределения тока нагрузки между параллельно работающими ДГА коэффициент мощности нагрузки каждого из ДГА ($\cos \varphi_1$, $\cos \varphi_2$) будет равен коэффициенту мощности общей электрической нагрузки $\cos \varphi$, т. е. $\cos \varphi_1 = \cos \varphi_2 = \cos \varphi$. Покажем это.

Коэффициент мощности общей электрической нагрузки

$$\cos \varphi = \frac{I_a}{\sqrt{I_a^2 + I_p^2}}. \quad (5)$$

Коэффициент мощности нагрузки первого ДГА

$$\cos \varphi_1 = \frac{I_{a1}}{\sqrt{I_{a1}^2 + I_{p1}^2}}. \quad (6)$$

Коэффициент мощности нагрузки второго ДГА

$$\cos \varphi_2 = \frac{I_{a2}}{\sqrt{I_{a2}^2 + I_{p2}^2}}. \quad (7)$$

Сравним $\cos \varphi$ и $\cos \varphi_1$:

$$\begin{aligned} \frac{I_a}{\sqrt{I_a^2 + I_p^2}} \nu \frac{I_{a1}}{\sqrt{I_{a1}^2 + I_{p1}^2}} &\Rightarrow \frac{I_a^2}{I_a^2 + I_p^2} \nu \frac{I_{a1}^2}{I_{a1}^2 + I_{p1}^2} \Rightarrow \\ I_a^2 (I_{a1}^2 + I_{p1}^2) \nu I_{a1}^2 (I_a^2 + I_p^2) &\Rightarrow \\ I_a^2 I_{a1}^2 + I_a^2 I_{p1}^2 \nu I_{a1}^2 I_a^2 + I_{a1}^2 I_p^2 &\Rightarrow I_a^2 I_{p1}^2 \nu I_{a1}^2 I_p^2 \Rightarrow \\ I_a I_{p1} \nu I_{a1} I_p. & \end{aligned}$$

По условиям задач (1) и (2) имеем:

$$\begin{aligned} I_a &= I_{a1} + I_{a2} \text{ и } I_p = I_{p1} + I_{p2} \\ I_a I_{p1} \nu I_{a1} I_p &\Rightarrow (I_{a1} I_{p1} + I_{a2} I_{p1}) \nu (I_{a1} I_{p1} + I_{a1} I_{p2}) \Rightarrow \\ I_{a2} I_{p1} \nu I_{a1} I_{p2} &\Rightarrow \frac{I_{a1}}{I_{a2}} \nu \frac{I_{p1}}{I_{p2}}. \end{aligned}$$

По условию задачи (4)

$$\frac{I_{a1}}{I_{a2}} = \frac{I_{p1}}{I_{p2}},$$

значит, $\cos \varphi_1 = \cos \varphi$, что и требовалось показать. Аналогично можно продемонстрировать равенство $\cos \varphi_2 = \cos \varphi$.

Таким образом, при пропорциональном распределении между параллельно работающими ДГА активных и реактивных составляющих тока нагрузки обеспечивается равенство $\cos \varphi_1 = \cos \varphi_2 = \cos \varphi$.

Рассмотрим ситуацию, когда $\frac{I_{a1}}{I_{a2}} \neq k$ и / или $\frac{I_{p1}}{I_{p2}} \neq k$, а $\frac{I_{a1}}{I_{a2}} = k_a$ и $\frac{I_{p1}}{I_{p2}} = k_p$, где k_a и k_p — некоторые коэффициенты, отличные от k , причем $k_a \neq k_p$.

В этой ситуации определим коэффициент мощности нагрузки $\cos \varphi_1$ первого ДГА.

Так как

$$\frac{I_{a1}}{I_{a2}} = k_a \text{ и } \frac{I_{p1}}{I_{p2}} = k_p,$$

то

$$I_{a2} = \frac{I_{a1}}{k_a} \text{ и } I_{p2} = \frac{I_{p1}}{k_p}. \quad (8)$$

По условию

$$I_{a1} + I_{a2} = I_a = I \cdot \cos \varphi \text{ и } I_{p1} + I_{p2} = I_p = I \cdot \sin \varphi. \quad (9)$$

С учетом (8) и (9) получаем

$$I_{a1} \cdot \left(\frac{1}{k_a} + 1 \right) = I \cdot \cos(\varphi) \Rightarrow I_{a1} = \frac{k_a}{k_a + 1} \cdot I \cdot \cos(\varphi); \quad (10)$$

$$I_{p1} \cdot \left(\frac{1}{k_p} + 1 \right) = I \cdot \sin \varphi \Rightarrow I_{p1} = \frac{k_p}{k_p + 1} \cdot I \cdot \sin \varphi. \quad (11)$$

Тогда

$$\begin{aligned} \cos^2 \varphi_1 &= \frac{I_{a1}^2}{I_{a1}^2 + I_{p1}^2} = \frac{1}{1 + \frac{I_{p1}^2}{I_{a1}^2}} = \frac{1}{1 + \frac{\left(\frac{k_p}{k_a + 1}\right)^2 \cdot I^2 \cdot \sin^2 \varphi}{\left(\frac{k_a}{k_a + 1}\right)^2 \cdot I^2 \cdot \cos^2 \varphi}} \\ &= \frac{1}{1 + \operatorname{tg}^2 \varphi \cdot \left(\frac{k_p}{k_a}\right)^2 \cdot \left(\frac{k_a + 1}{k_p + 1}\right)^2}. \end{aligned} \quad (12)$$

Аналогично получим выражение для коэффициента мощности нагрузки $\cos \varphi_2$ второго ДГА

$$\cos^2 \varphi_2 = \frac{1}{1 + \operatorname{tg}^2 \varphi \cdot \left(\frac{k_a + 1}{k_p + 1}\right)^2}. \quad (13)$$

Из выражений (12) и (13) видно, что коэффициенты мощности нагрузок, приходящихся на первый и второй ДГА, зависят от характера общей электрической нагрузки φ и соотношения распределяемых между генераторами активных и реактивных составляющих тока нагрузки.

Следует отметить, что если $k_a = k_p$, то

$$\cos^2 \varphi_1 = \cos^2 \varphi_2 = \frac{1}{1 + \operatorname{tg}^2 \varphi}. \quad (14)$$

Исходя из основного тригонометрического тождества, равенство (14) возможно только при условии, если $\varphi_1 = \varphi_2 = \varphi$. Отсюда можно сделать вывод о том, что добиться равенства коэффициентов мощности нагрузки первого и второго ДГА коэффициенту мощности общей нагрузки можно при обеспечении равенства $\frac{I_{a1}}{I_{a2}} = \frac{I_{p1}}{I_{p2}}$, при этом отношения активных и реактивных составляющих тока нагрузки первого и второго ДГА не обязательно должны быть равны коэффициенту пропорциональности k .

Изменяя соотношения активных и реактивных составляющих тока нагрузки, можно добиться тех или иных значений коэффициентов мощности, приходящихся на первый и второй ДГА. При этом следует отслеживать выполнение требований РМРС в части допустимых отклонений при распределении нагрузки между параллельно работающими ДГА. Метод варьирования коэффициентов мощности может быть полезен при поиске оптимального суммарного расхода топлива при параллельной работе, так как удельный расход топлива (УРТ) зависит от коэффициента мощности нагрузки.

В качестве примера рассмотрим следующую задачу. Исходные данные: пусть общий ток нагрузки $I = 600$ А, $\cos \varphi = 0,8$. Тогда $I_a = 480$ А и $I_p = 360$ А.

Обозначим I_1 — полный ток первого ДГА, I_{a1} — активная составляющая тока нагрузки первого ДГА, I_{p1} — реактивная составляющая тока нагрузки первого ДГА; $\cos \varphi_1$ — коэффициент мощности нагрузки первого ДГА; I_2 — полный ток второго ДГА; I_{a2} — активная составляющая тока нагрузки второго ДГА; I_{p2} — реактивная составляющая тока нагрузки второго ДГА; $\cos \varphi_2$ — коэффициент мощности нагрузки второго ДГА. Предположим, что отношение номинальных мощностей составляет $k = 1,5$. Варианты распределения нагрузки между ДГА и соответствующие данным вариантам распределения нагрузки параметры электрической энергии приведены в следующей таблице:

Распределение нагрузки между дизель-генераторными агрегатами

Значения параметров $I_{a1}, I_{p1}, I_{a2}, I_{p1}, \cos \varphi_1, \cos \varphi_2$ при пропорциональном распределении нагрузки		
I_{a1}, A		288
I_{p1}, A		216
$\cos \varphi_1$		0,8
I_1, A		360
I_{a2}, A		192
I_{p2}, A		144
$\cos \varphi_2$		0,8
I_2, A		240
Значения параметров $I_{a1}, I_{p1}, I_{a2}, I_{p1}, \cos \varphi_1, \cos \varphi_1$ при непропорциональном распределении нагрузки ($k_a = 2; k_p = 1,8$)		
I_{a1}, A	320	При данном распределении нагрузки отклонение по полному току от пропорционального распределения для первого ДГА составляет 9,7 %, а для второго — 14,5 %; отклонение по реактивному току для первого — 7,14 %; для второго — 10,7 %. Требования правил РМРС выполняются
I_{p1}, A	231,43	
$\cos \varphi_1$	0,810298	
I_1, A	394,9	
I_{a2}, A	160	
I_{p2}, A	128,57	
$\cos \varphi_2$	0,779509	
I_2, A	205,25	
Значения параметров $I_{a1}, I_{p1}, I_{a2}, I_{p1}, \cos \varphi_1, \cos \varphi_2$ при непропорциональном распределении нагрузки ($k_a = 2; k_p = 2$)		
I_{a1}, A	320	При данном распределении нагрузки отклонение по полному току от пропорционального распределения для первого ДГА составляет 11,1 %, а для второго — 16,7 %; отклонение по реактивному току для первого — 11,1 %; для второго — 16,7 %. Требования правил РМРС выполняются
I_{p1}, A	240	
$\cos \varphi_1$	0,8	
I_1, A	400	
I_{a2}, A	160	
I_{p2}, A	120	
$\cos \varphi_2$	0,8	
I_2, A	200	

Зная полный ток нагрузки, характер нагрузки, отношение номинальных мощностей генераторов, между которыми нагрузка делится, а также то, как планируется распределять активные и реактивные составляющие тока нагрузки (k_a, k_p), можно определить:

1) величину активного тока ΔI_a , на которую нужно изменить активные составляющие токов параллельно работающих ДГА при их распределении пропорционально мощностям ДГА (для одного уменьшить на эту величину, для другого увеличить), чтобы добиться заданного соотношения;

2) величину реактивного тока ΔI_p , на которую нужно изменить реактивные составляющие токов параллельно работающих ДГА при их распределении пропорционально мощностям ДГА (для одного уменьшить на эту величину; для другого увеличить), чтобы добиться заданного соотношения.

При пропорциональном распределении нагрузки отношение активных составляющих токов первого и второго генераторов, согласно условию задачи (4), — $\frac{I_{a1}}{I_{a2}} = k$, если активную составля-

ющую тока одного из генераторов уменьшить на величину ΔI_a , а другую, соответственно, увеличить на то же значение, получим

$$\frac{I_{a1} - \Delta I_a}{I_{a2} + \Delta I_a} = k_a. \quad (15)$$

Решив систему, состоящую из выражений (4) и (15), относительно I_{a1} и I_{a2} получим:

$$I_{a2} = \Delta I_a \cdot \frac{(1 + k_a)}{(k - k_a)}; \quad (16)$$

$$I_{a1} = \Delta I_a \cdot \frac{k \cdot (1 + k_a)}{(k - k_a)}. \quad (17)$$

Сложив выражения (16) и (17) и с учетом (9), можно выразить ΔI_a :

$$\Delta I_a = I \cdot \cos \varphi \cdot \frac{(k - k_a)}{(1 + k_a) \cdot (1 + k)}. \quad (18)$$

Аналогично определяется ΔI_p :

$$\Delta I_p = I \cdot \sin \varphi \cdot \frac{(k - k_p)}{(1 + k_p) \cdot (1 + k)}. \quad (19)$$

Из выражений (18), (19) можно выразить k_a и k_p соответственно:

$$k_a = \frac{I_a k - \Delta I_a (1 + k)}{I_a + \Delta I_a (1 + k)}; \quad (20)$$

$$k_p = \frac{I_p k - \Delta I_p (1 + k)}{I_p + \Delta I_p (1 + k)}. \quad (21)$$

Зная ток нагрузки, характер нагрузки и величину тока, на которую та или иная составляющая тока нагрузки будет изменяться, с помощью выражений (20) и (21) можно определить, как они при этом будут соотноситься. Вопросы оптимизации работы судовых электроэнергетических систем и минимизации удельного расхода топлива также рассмотрены в работах [9] – [13].

Выводы (Summary)

В работе получены выражения (12) и (13) для коэффициентов мощности двух параллельно работающих ДГА при непропорциональном распределении активных и реактивных составляющих токов нагрузки, приходящихся на каждый из генераторных агрегатов. Из выражений видно, что эти коэффициенты зависят от характера общей электрической нагрузки и от того, как соотносятся между собой активные и реактивные составляющие токов каждого из ДГА. Изменение этих соотношений в пределах требований РМРС, предъявляемых к распределению мощности между параллельно работающими ДГА, позволяет получить нужную величину коэффициента мощности. В связи с тем, что УРТ напрямую зависит от нагрузки и коэффициента мощности нагрузки, и при параллельной работе ДГА, имеющих неодинаковые характерные зависимости УРТ от мощности и коэффициента мощности, пропорциональное распределение мощностей может оказаться неэффективным с точки зрения экономии топлива предложенный метод позволит осуществить поиск такого распределения нагрузки, при котором расход топлива минимальный.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Правила классификации и постройки морских судов. — СПб.: РМРС, 2017. — 807 с.
2. Пат. 2645387 Российская Федерация, МПК Н 02 Р 9/04, F 02 D 25/00. Способ распределения на-

грузки между параллельно работающими судовыми дизель-генераторными агрегатами / Н. А. Алексеев, А. А. Виноградов, С. Е. Кузнецов; заяв. и патентообл. ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова». — № 2017118845; заявл. 30.05.2017; опубл. 21.02.2018. — Бюл. № 6.

3. Кузнецов С. Е. Потери и коэффициент полезного действия судового синхронного генератора / С. Е. Кузнецов // Эксплуатация морского транспорта. — 2009. — № 3. — С. 67–71.

4. Кузнецов С. Е. Влияние нагрузки и коэффициента мощности на коэффициент полезного действия судового синхронного генератора / С. Е. Кузнецов, Ю. В. Кудрявцев // Судостроение. — 2011. — № 5. — С. 29–32.

5. Кузнецов С. Е. Влияние нагрузки и коэффициента мощности на расход топлива судового дизель-генераторного агрегата / С. Е. Кузнецов, Ю. В. Кудрявцев // Судостроение. — 2011. — № 6. — С. 30–32.

6. Кузнецов С. Е. Удельный расход топлива судового дизель-генератора / С. Е. Кузнецов, А. А. Виноградов // Тезисы докладов V МНК «Морская техника и технологии. Безопасность морской индустрии», 21 – 27 мая 2017. — Калининград: Изд-во КГТУ, 2017. — С. 141–143.

7. Виноградов А. А. Распределение нагрузки при параллельной работе судовых дизель-генераторных агрегатов с учетом расхода топлива / А. А. Виноградов, С. Е. Кузнецов // Сб. тезисов докладов национальной ежегодной научно-практической конференции профессорско-преподавательского состава ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2017. — С. 21–22.

8. Кузнецов С. Е. Удельный расход топлива и потери мощности судового дизель-генератора / С. Е. Кузнецов, О. О. Башкирев, А. А. Виноградов // Транспортное дело России. — 2017. — № 5. — С. 176–179.

9. Виноградов А. А. Исследование распределения нагрузки судовых дизель-генераторных агрегатов при их параллельной работе / А. А. Виноградов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 2. — С. 373–379. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-2-373-379.

10. Rao K. S. Optimal scheduling of diesel generators in offshore support vessels to minimize fuel consumption / K. S. Rao, P. J. Chauhan, S. K. Panda, G. Wilson, X. Liu, A. K. Gupta // Industrial Electronics Society, IECON 2015-41st Annual Conference of the IEEE. — IEEE, 2015. — Pp. 004726–004731. DOI: 10.1109/IECON.2015.7392838.

11. Chauhan P. J. Fuel efficiency improvement by optimal scheduling of diesel generators using PSO in offshore support vessel with DC power system architecture / P. J. Chauhan, K. S. Rao, S. K. Panda, G. Wilson, X. Liu, A. K. Gupta // Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 2015 IEEE PES Asia-Pacific. — IEEE, 2015. — Pp. 1–6. DOI: 10.1109/APPEEC.2015.7380963.

12. Rao S. S. Engineering optimization: theory and practice / S. S. Rao. — John Wiley & Sons, 2009. — 840 p. DOI:10.1002/9780470549124.

13. Wu W. Optimal power generation scheduling of a shipboard power system / W. Wu, D. Wang, A. Arapostathis, K. Davey // Electric Ship Technologies Symposium, 2007. ESTS'07. IEEE. — IEEE, 2007. — Pp. 519–522. DOI: 10.1109/ESTS.2007.372135.

REFERENCES

1. *Pravila klassifikatsii i postroiki morskikh sudov*. SPb.: RMRS, 2017.
2. Alekseev, N.A., A.A. Vinogradov, and S.E. Kuznetsov. RU 2 645 387 C1, IPC H 02 P 9/04, F 02 D 25/00. Sposob raspredeleniya nagruzki mezhdu parallel'no rabotayushchimi sudovymi dizel'-generatornymi agregatami. Russian Federation, assignee. Publ. 21 Feb. 2018.
3. Kuznetsov, S. E. "Poteri i koeffitsient poleznogo deistviya sudovogo sinkhronnogo generator." *Ekspluatatsiya morskogo transporta* 3 (2009): 67–71.
4. Kuznetsov, S. E., and Yu. V. Kudryavtsev. "Influence of load and power factor on marine synchronous generator efficiency." *Shipbuilding* 5 (2011): 29–32.
5. Kuznetsov, S. E., and Yu. V. Kudryavtsev. "Effect of load and power factor on fuel consumption of marine diesel generator set." *Shipbuilding* 6 (2011): 30–32.
6. Kuznetsov, S.E., and A.A. Vinogradov. "Udel'nyi raskhod topliva sudovogo dizel'-generatora." *Tezisy dokladov v MNK «Morskaya tekhnika i tekhnologii. Bezopasnost' mor-skoi industrii», 21-27 maya 2017*. Kaliningrad: KGTU, 2017. 141–143.
7. Vinogradov, A.A., and S.E. Kuznetsov. "Raspredelenie nagruzki pri parallel'noi rabote sudovykh dizel'-

generatorykh agregatov s uchetom raskhoda topliva.” *Sbornik tezisov dokladov natsional’noi ezhegodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii professorsko-prepodavatel’skogo sostava GUMRF imeni admirala S.O. Makarova*. SPb.: Izd-vo GUMRF im. adm. S.O. Makarova, 2017. 21–22.

8. Kuznetsov, S., O. Bashkirev, and A. Vinogradov. “Specific fuel consumption and ship diesel generator losses.” *Transport business of Russia* 5 (2017): 176–179.

9. Vinogradov, Andrey A. “A study of load distribution of marine diesel-generator sets in parallel operation.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 9.2 (2017): 373–379. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-2-373-379.

10. Rao, K. Srinivasa, P. J. Chauhan, S. K. Panda, G. Wilson, X. Liu, and A. K. Gupta. “Optimal scheduling of diesel generators in offshore support vessels to minimize fuel consumption.” *Industrial Electronics Society, IECON 2015-41st Annual Conference of the IEEE*. IEEE, 2015. 004726–004731. DOI: 10.1109/IECON.2015.7392838.

11. Chauhan, Priyesh J., K. S. Rao, S. K. Panda, G. Wilson, X. Liu, and A. K. Gupta. “Fuel efficiency improvement by optimal scheduling of diesel generators using PSO in offshore support vessel with DC power system architecture.” *Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 2015 IEEE PES Asia-Pacific*. IEEE, 2015. 1–6. DOI: 10.1109/APPEEC.2015.7380963.

12. Rao, Singiresu S., and Singiresu S. Rao. *Engineering optimization: theory and practice*. John Wiley & Sons, 2009. DOI:10.1002/9780470549124.

13. Wu, Wei, D. Wang, A. Arapostathis, and K. Davey. “Optimal power generation scheduling of a shipboard power system.” *Electric Ship Technologies Symposium, 2007. ESTS’07. IEEE*. IEEE, 2007. 519–522. DOI: 10.1109/ESTS.2007.372135.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Виноградов Андрей Александрович —
доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: Eric_esseker@mail.ru, kaf_saees@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Vinogradov, Andrey A. —
associate professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: Eric_esseker@mail.ru, kaf_saees@gumrf.ru

*Статья поступила в редакцию 15 марта 2018 г.
Received: March 15, 2018.*