

DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-2-373-379

A STUDY OF LOAD DISTRIBUTION OF MARINE DIESEL-GENERATOR SETS IN PARALLEL OPERATION

A. A. Vinogradov

Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
Saint-Petersburg, Russian Federation

The article describes load balancing issues of diesel-generator units of ship power plant in accordance with the Russian Maritime Register of Shipping and taking into account the features of the dependence of the specific fuel consumption of the load of diesel generator set, used for ship power plants, containing in its composition of diesel generator sets of various power ratings by selection of the optimal combination of operating generating units for a given load electricity station, based on the values of the nominal power of the generator. The paper proposes the actual load on the bus of the main switchboard (MSB) to distribute between the parallel operating units so that the extent to which they meet the minimum load the specific fuel consumption, which is typically 75-85 % of the nominal power of DGA, or was close to such value while respecting the rules PMPS. In addition, the article describes the features of a single work of DGA of ship plants that contain generators of different power ratings, and recommendations are given to reduce the specific fuel consumption when a single work by transferring power backup DGA depending on the actual load on the bus of the main switchboard.

Keywords: nominal power, diesel generating set, specific fuel consumption, parallel operation, optimum load, ship power, fuel economy.

For citation:

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.

УДК 621.313.322-843.6

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НАГРУЗКИ СУДОВЫХ ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРНЫХ АГРЕГАТОВ ПРИ ИХ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ РАБОТЕ

А. А. Виноградов

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

В статье рассмотрены вопросы распределения нагрузки дизель-генераторных агрегатов судовой электростанции в соответствии с требованиями Российского морского регистра судоходства и с учетом зависимости удельного расхода топлива от нагрузки дизель-генераторного агрегата, применяемого к судовым электростанциям, содержащих в своем составе дизель-генераторные агрегаты различных номинальных мощностей, путем подбора оптимальной комбинации работающих генераторных агрегатов для заданной нагрузки электростанции, исходя из значений номинальных мощностей генераторов. Предлагается фактическую нагрузку на шинах главного распределительного щита распределять между параллельно работающими агрегатами так, чтобы степень их загрузки соответствовала минимальному удельному расходу топлива, который, как правило, составляет 75 – 85 % от номинальной мощности дизель-генераторного агрегата, или была приближена к такому значению при соблюдении правил. Кроме того, в статье рассмотрены особенности одиночной работы дизель-генераторного агрегата судовых электростанций, содержащих генераторы различных номинальных мощностей, и приведены рекомендации по уменьшению удельного расхода топлива при их одиночной работе путем перевода мощности на резервный дизель-генераторный агрегат в зависимости от фактической нагрузки на шинах главного распределительного щита. Показано, как должна распределяться электрическая нагрузка между несколькими параллельно работающими генераторами различных номиналь-

ных мощностей или перераспределяться при одиночной работе генератора, приведены примеры современных средств автоматизации судовых электроэнергетических систем, обеспечивающих выполнение таких задач.

Ключевые слова: номинальная мощность, дизель-генераторный агрегат, удельный расход топлива, параллельная работа, оптимальная нагрузка, судовая электростанция, экономия топлива.

Для цитирования:

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.

Введение

При параллельной работе генераторов переменного тока в диапазоне 20 – 100 % общей нагрузки распределение нагрузки на каждый генератор должно происходить пропорционально мощностям генераторов 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 [1]. В работе проведен анализ распределения электрической нагрузки между дизель-генераторными агрегатами (ДГА) судовой электростанции (СЭС) при их параллельной и одиночной работе с учетом требований Российского морского регистра судоходства (РМРС) и особенностей зависимости удельного расхода топлива от нагрузки.

Основная часть

Рассмотрим параллельную работу двух ДГА на шины главного распределительного щита (ГРЩ) СЭС. Пусть $P_{1н}$ (кВт) — номинальная мощность ДГА, работающего на шины ГРЩ; $P_{2н}$ (кВт) — номинальная мощность ДГА, подключаемого к шинам ГРЩ; $k = P_{1н} / P_{2н}$ — отношение номинальных мощностей первого и второго генераторов; $P_{нагр}$ (кВт) — нагрузка на шинах ГРЩ. Для дальнейшего анализа предположим, что все рассматриваемые ДГА имеют одинаковые зависимости удельного расхода топлива (УРТ) от нагрузки. Оптимальный диапазон нагрузки ДГА, как правило, составляет 75 – 85 % от номинальной мощности и соответствует минимальному УРТ, вне этого диапазона нагрузок (при уменьшении или увеличении нагрузки) УРТ будет возрастать. На рис. 1 показана зависимость УРТ от относительной мощности нагрузки судового ДГА с синхронным генератором HF C6506-14E фирмы *Hyundai* и дизелем МАН-B&W марки 6L23/30H с частотой вращения 720 об/мин, которая была получена при заводских испытаниях. Вопросы, связанные с оптимизацией режимов работы судовых синхронных генераторов и оптимизацией удельного

расхода топлива (УРТ) ДГА в зависимости от мощности нагрузки и коэффициента мощности, рассмотрены в работах [2] – [4].

При достижении $P_{нагр}$ предельно допустимого значения, т. е. при $P_{нагр} / P_{1н} \geq k_{уст}$, где $k_{уст}$ — установка на подачу сигнала на включение резервного ДГА (как правило, $k_{уст} = 0,8$), запускается резервный ДГА, подключается к шинам ГРЩ, и вся имеющаяся нагрузка $P_{нагр}$ распределяется между ДГА пропорционально их номинальным мощностям (если не предусмотрено иное).

Обозначим P_1 (кВт) — часть общей нагрузки $P_{нагр}$ первого ДГА; P_2 (кВт) — часть общей нагрузки, принятой вторым ДГА. Отношение P_1 и P_2 должно быть, согласно требованиям РМРС, таким же, как и отношение $P_{1н}$ и $P_{2н}$, т. е.

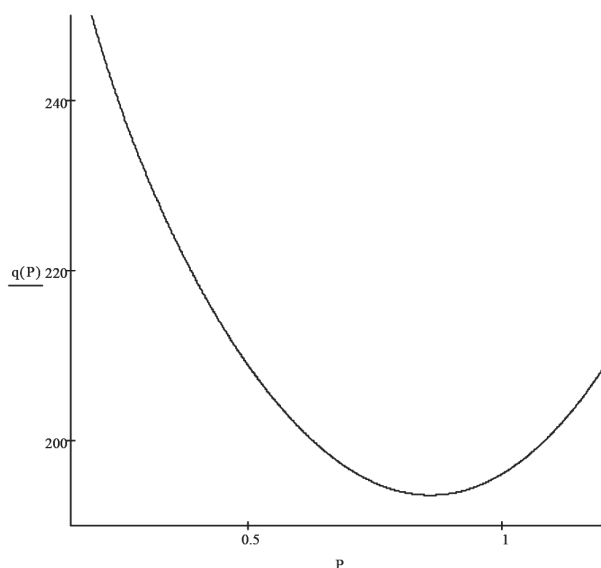


Рис. 1. Зависимость удельного расхода топлива от относительной мощности ДГА

$$P_1 / P_2 = k \quad (1)$$

при

$$P_1 + P_2 = P_{\text{нагр}}. \quad (2)$$

Из (1) и (2) следует, что нагрузка двух работающих ДГА составит:

$$P_1 = \frac{k \cdot P_{\text{нагр}}}{1 + k} = \frac{P_{\text{нагр}}}{1 + \frac{1}{k}}; \quad (3)$$

$$P_2 = \frac{P_{\text{нагр}}}{1 + k}. \quad (4)$$

При рассмотрении СЭС, состоящей из большого числа работающих на шины ГРЩ ДГА, выражения для определения принятой тем или иным ДГА нагрузки будут другими (в зависимости от числа ДГА). Так, например, для трех параллельно работающих ДГА принятая каждым из них нагрузка (мощность) при ее распределении пропорционально номинальным мощностям генераторов будет определяться следующими выражениями (a , b , c):

$$P_1 = P_{\text{нагр}} \cdot \frac{k_{12} \cdot k_{13}}{k_{12} + k_{13} + k_{12} \cdot k_{13}}; \quad (a)$$

$$P_2 = P_{\text{нагр}} \cdot \frac{k_{23}}{1 + k_{23} + k_{12} \cdot k_{23}}; \quad (b)$$

$$P_3 = P_{\text{нагр}} \cdot \frac{1}{1 + k_{13} + k_{23}}, \quad (c)$$

где P_1 , P_2 , P_3 — мощности принятые первым, вторым и третьим ДГА соответственно; $P_{\text{нагр}}$ — общая судовая электрическая нагрузка; k_{12} — отношение номинальных мощностей первого и второго ДГА; k_{13} — отношение номинальных мощностей первого и третьего ДГА; k_{23} — отношение номинальных мощностей второго и третьего ДГА.

Если номинальные мощности первого и второго ДГА одинаковы, т. е. $P_{1н} = P_{2н}$, тогда $k = 1$ и нагрузку следует распределить между ними поровну; если $P_{1н} \neq P_{2н}$, то нагрузка распределяется пропорционально мощностям ДГА и рассчитывается согласно выражениям (3) и (4), при этом степень загрузки каждого работающего ДГА будет одна и та же (так же будет загружена и СЭС). Покажем это.

Степень загрузки ДГА определяется отношением нагрузки, приходящейся на данный ДГА, к номинальной мощности ДГА:

$$\text{— степень загрузки первого ДГА — } y_1 = \frac{P_1}{P_{1н}}; \quad (5)$$

$$\text{— степень загрузки второго ДГА — } y_2 = \frac{P_2}{P_{2н}}, \quad (6)$$

а степень загрузки СЭС определяется отношением нагрузки на шинах ГРЩ к полной мощности СЭС (сумме номинальных мощностей обоих работающих на ГРЩ генераторов):

$$y_{12} = \frac{P_{\text{нагр}}}{P_{1н} + P_{2н}}, \quad (7)$$

$$\text{так как } \frac{P_{1н}}{P_{2н}} = k, \text{ то } P_{1н} = P_{2н} \cdot k. \quad (8)$$

Подставив в выражение (5) уравнения (3) и (8) и преобразовав его, получим

$$y_1 = \frac{P_{\text{нагр}}}{P_{1н} + P_{2н}}.$$

Подставив в выражение (6) уравнения (4) и (8) и преобразовав его, получим

$$y_2 = \frac{P_{\text{нагр}}}{P_{1н} + P_{2н}}.$$

После преобразования выражений оказалось, что правые части для y_1, y_2 и y одинаковы, следовательно, $y_1 = y_2 = y$, т. е. требования РМРС удовлетворяются.

Рассмотрим СЭС, состоящую из двух ДГА (№ 1 и 2) одинаковой мощности, например, $P_{1н} = P_{2н} = 1000$ кВт и одного ДГА (№ 3) меньшей мощности, например, $P_{3н} = 500$ кВт. К шинам ГРЩ подключен ДГА № 1 и нагрузка на шинах ГРЩ $P_{\text{нагр}} = 900$ кВт, тогда $\frac{P_{\text{нагр}}}{P_1} = 0,9 \geq 0,8$ — формируется сигнал на включение резервного ДГА (следующего по очередности включения).

Рассмотрим два варианта:

1) нагрузка распределяется между ДГА № 1 и ДГА № 2. Тогда степень загрузки СЭС, состоящей из ДГА № 1 и № 2, $y_{12} = \frac{P_{\text{нагр}}}{P_{1н} + P_{2н}} = \frac{900}{1000 + 1000} = 0,45$. Так как $P_{1н} = P_{2н}$, нагрузку следует распределить поровну между параллельно работающими генераторами $P_1 = P_2 = 450$ кВт;

2) нагрузка распределяется между ДГА № 1 и ДГА № 3. Тогда степень загрузки СЭС, состоящей из ДГА № 1 и 3, $y_{13} = \frac{P_{\text{нагр}}}{P_{1н} + P_{3н}} = \frac{900}{1000 + 500} = 0,6$; k_{13} — отношение номинальных мощностей ДГА № 1 и 3, $k_{13} = 2$. Согласно выражению (3), $P_1 = \frac{2 \cdot 900}{1 + 2} = 600$ кВт (загрузка ДГА № 1 — 0,6); согласно выражению (4), $P_3 = \frac{900}{1 + 2} = 300$ кВт (загрузка ДГА № 3 — 0,6).

Так как $y_{13} \geq y_{12}$, второй вариант решения задачи, с точки зрения эффективности расхода топлива, более приемлем, потому что при загрузке в 60 % УРТ меньше, чем при загрузке в 45 %. Несложно показать, что при подключении к шинам ГРЩ ДГА меньшей мощности, чем мощность работающего ДГА, загрузка каждого из параллельно работающих ДГА будет больше, чем если бы мощность подключаемого ДГА была больше.

Пусть $P_{1н}, P_{2н}, P_{3н}$ — номинальные мощности ДГА № 1 – 3, $P_{\text{нагр}}$ — нагрузка на шинах ГРЩ.

К шинам ГРЩ подключен ДГА № 1. Известно, что $P_{2н} > P_{3н}$. Степень загрузки СЭС после подключения ДГА № 2 $\frac{P_{\text{нагр}}}{P_{1н} + P_{2н}}$, а степень загрузки СЭС после подключения ДГА № 3 $\frac{P_{\text{нагр}}}{P_{1н} + P_{3н}}$. Сравним эти значения:

$$\frac{P_{\text{нагр}}}{P_{1н} + P_{2н}} \vee \frac{P_{\text{нагр}}}{P_{1н} + P_{3н}};$$

$$\frac{1}{P_{1н} + P_{2н}} \vee \frac{1}{P_{1н} + P_{3н}};$$

$$P_{1н} + P_{3н} \vee P_{1н} + P_{2н};$$

$$P_{3н} \vee P_{2н}.$$

По условию $P_{3н} < P_{2н}$,

$$\frac{P_{\text{нагр}}}{P_{1н} + P_{2н}} < \frac{P_{\text{нагр}}}{P_{1н} + P_{3н}}.$$

Отсюда следует, что при достижении нагрузкой работающего ДГА предельно допустимого значения (или больше) для обеспечения наиболее оптимальной загрузки каждого из работающих в параллель ДГА (после подключения резервного ДГА) следует распределить нагрузку между работающим ДГА и ДГА меньшей мощности. При этом необходимо, чтобы был обеспечен резерв мощности (20 %).

Ранее был рассмотрен вариант, когда электрическая нагрузка на шины ГРЩ возрастала, и возникала необходимость введения в работу резервного ДГА (или замены работающего ДГА на ДГА большей мощности) и перераспределения нагрузки. Проанализируем другой случай: когда нагрузка уменьшается, предположим, по мере отключения судовых приемников электроэнергии. Здесь возможны следующие варианты:

1. Когда работает один ДГА и по мере снижения нагрузки (при наличии резервных ДГА мощностей меньших, чем у работающего), запускается ДГА меньшей мощности, подключается к шинам ГРЩ, принимая на себя всю нагрузку, а ДГА большей мощности выводится из системы (при условии обеспечения резерва мощности в 20 %). Так обеспечится большая степень загрузки СЭС. Условием формирования сигнала для осуществления такой операции должно быть снижение нагрузки до величины, составляющей 60 – 75 % от номинальной мощности ДГА меньшей мощности в течение некоторого промежутка времени.

2. Когда работают в параллель два (и более) ДГА и снижение нагрузки приводит к снижению степени загрузки ДГА, т. е. увеличению УРТ, а отключение одного из параллельно работающих ДГА невозможно, так как это приведет к нехватке мощности. При наличии среди резервных дизель-генераторных агрегатов ДГА меньшей мощности (по сравнению с работающими в параллель), запускается и вводится в параллель такой генератор, а один из ранее работающих ДГА выводится из работы (при всем этом должен быть обеспечен резерв мощности в 20 %). Тем самым величина неиспользуемой мощности СЭС уменьшится и степень загрузки ДГА возрастет. Вопросы, связанные с особенностями управления ДГА судовой электростанции по резервной мощности, рассмотрены в работе [4].

Современные средства автоматизации позволяют решить задачу оптимизации работы судовой электростанции по топливу. Программа оптимизации расхода топлива таких средств обеспечивает автоматический выбор оптимальной комбинации работающих генераторных агрегатов для любой заданной нагрузки, исходя из значений номинальных мощностей генераторов. В качестве примера таких средств автоматизации может быть рассмотрена микропроцессорная система управления DELOMATIC [6], [7], [9], [10], предназначенная для автоматического управления электростанцией, имеющей в своём составе максимально 8 ДГ, или система управления электростанцией RPM-300 [5], [7], [8], содержащая широкий набор функций, необходимый для управления электроустановками морского базирования, и ряд других. Команды на «пуск / остановку» генераторов такими системами формируются на основе расчетов необходимого количества генераторов для поддержания на шинах ГРЩ требуемой мощности. Расчет значения мощности для «пуска / остановки» генераторов основывается на заданных оператором установках запуска и отключения ДГ. В таких системах предусмотрен автоматический выбор оптимальной комбинации ДГА, обеспечивающий минимизацию расхода топлива с учетом значений номинальных мощностей генераторов и фактической электрической нагрузки на шинах ГРЩ.

Заключение

Принимая во внимание особенности зависимости УРТ от нагрузки (мощности) ДГА, следует стремиться нагружать дизель-генераторные агрегаты (при одиночной работе или работе в параллель) в пределах оптимальных нагрузок (75 – 85 %), соответствующих минимальному удельному расходу топлива. В статье рассмотрен вопрос оптимизации расхода топлива параллельно работающих ДГА за счет минимизации неиспользуемой (резервной) мощности, но в пределах допустимого (не ниже 20 %), путем подбора оптимальной комбинации ДГА, работающих на шины ГРЩ для судовых электростанций, содержащих ДГА различных номинальных мощностей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Правила классификации и постройки морских судов. — СПб.: РМРС, 2015. — 807 с.
2. Кузнецов С. Е. Потери и коэффициент полезного действия судового синхронного генератора / С. Е. Кузнецов // Эксплуатация морского транспорта. — 2009. — № 3. — С. 67–71.
3. 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.
4. 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.
5. Алексеев Н. А. Особенности выбора способа управления резервными агрегатами судовой электростанции в зависимости от нагрузки на шинах главного распределительного щита / Н. А. Алексеев, А. А. Виноградов // Сборник научных трудов профессорско-преподавательского состава Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2016. — С. 7–13.
6. Алексеев Н. А. PPM 300 — новая платформа комплектации систем автоматизации судовых электростанций / Н. А. Алексеев, А. А. Виноградов, Г. М. Ростиславин // Сборник научных трудов профессорско-преподавательского состава Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2016. — С. 14–20.
7. Алексеев Н. А. Контроллеры DEIF. Защита автономного генератора, работающего параллельно с сетью / Н. А. Алексеев, Г. М. Ростиславин // Новости электротехники. — 2006. — № 2 (38). — С. 40–42.
8. Алексеев Н. А. Некоторые аспекты обеспечения параллельной работы автономного генератора с сетью большой мощности / Н. А. Алексеев, А. Н. Дуксин, Г. М. Ростиславин // Тезисы докладов научно-технической конференции ППС, науч. сотрудников и курсантов. — СПб.: ГМА им. адм. С. О. Макарова, 2006. — С. 161–164.
9. Алексеев Н. А. Контроль, защита и управления подключением к береговой сети в системе DELOMATIC фирмы DEIF / Н. А. Алексеев, А. Н. Дуксин // Тезисы докладов научно-технической конференции ППС, научных сотрудников и курсантов. — СПб.: ГМА им. адм. С. О. Макарова, 2006. — С. 168–169.
10. Алексеев Н. А. Особенности синхронизации судовых генераторов в микропроцессорной системе DELOMATIC / Н. А. Алексеев, А. Н. Дуксин // Тезисы докладов научно-технической конференции ППС, научных сотрудников и курсантов. — СПб.: ГМА им. адм. С. О. Макарова, 2008. — С. 193–196.

REFERENCES

1. *Pravila klassifikatsii i postroiki morskikh sudov*. SPb.: RMRS, 2015.
2. Kuznetsov, S. E. "Poteri i koeffitsient poleznogo deistviya sudovogo sinkhronnogo generator." *Ekspluatatsiya morskogo transporta* 3 (2009): 67–71.
3. Kuznetsov, S. E., and Yu. V. Kudryavtsev. "Influence of load and power factor on marine synchronous generator efficiency." *Shipbuilding* 5 (2011): 29–32.
4. 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.
5. Alekseev, N. A., and A. A. Vinogradov. "Features choice of control method of backup power units ship depending on the load on the tires main switchboard." *Sbornik nauchnykh trudov professorsko-prepodavatel'skogo sostava Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova*. SPb.: Federal'noe gosudarstvennoe byudzhethoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego obrazovaniya Gosudarstvennyi universitet morskogo i rechnogo flota im. admirala S.O. Makarova, 2016. 7–13.
6. Alekseev, N. A., A. A. Vinogradov, and G. M. Rostislavin. "PPM 300 — a new platform of complectation of ship power systems automation." *Sbornik nauchnykh trudov professorsko-prepodavatel'skogo sostava Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova*. SPb.: Federal'noe gosudarstvennoe byudzhethoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego obrazovaniya Gosudarstvennyi universitet morskogo i rechnogo flota im. admirala S.O. Makarova, 2016. 14–20.
7. Alekseev, N. A., and G.M. Rostislavin. "Kontrollery DEIF. Zashchita avtonomnogo generatora, rabotayushchego paral-lel'no s set'yu." *Novosti elektrotehniki* 2(38) (2006): 40–42.

8. Alekseev, N. A., A. N. Duksin, and G. M. Rostislavin. "Nekotorye aspekty obespecheniya parallel'noi raboty avtonomnogo gene-ratora s set'yu bol'shoi moshchnosti." *Tezisy dokladov. Nauchno-tehnicheskaya konferentsiya PPS, nauchnykh sotrudnikov i kursantov*. SPb.: GMA im. adm. S.O. Makarova, 2006. 161–164.

9. Alekseev, N. A., and A. N. Duksin. "Kontrol', zashchita i upravleniya podklyucheniem k beregovoi seti v sisteme DELOMATIC firmy DEIF." *Tezisy dokladov. Nauchno-tehnicheskaya konferentsiya PPS, nauchnykh sotrudnikov i kursantov*. SPb.: GMA im. adm. S.O. Makarova, 2006. 168–169.

10. Alekseev, N. A., and A. N. Duksin. "Osobennosti sinkhronizatsii sudovykh generatorov v mikroptsessornoi sisteme DELOMATIC." *Tezisy dokladov. Nauchno-tehnicheskaya konferentsiya PPS, nauchnykh sotrudnikov i kursantov*. SPb.: GMA im. adm. S.O. Makarova, 2008. 193–196.

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

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

Статья поступила в редакцию 1 марта 2017 г.

Received: March 1, 2017.