

Универсальный способ превентивной разгрузки судовой электроэнергетической системы

А. В. Саушев, Н. В. Широков✉

ФГБОУ ВО «ГУМРФ им. адмирала С. О. Макарова»,
Санкт-Петербург, Россия

✉ saushev@bk.ru

Аннотация. Рассматривается метод превентивной защиты для целей безопасной работы судовой электроэнергетической системы в нештатных ситуациях, связанных с неисправностями ее элементов, возникающими в процессе эксплуатации. Показано, что существующие устройства формируют команду на разгрузку источников электроэнергии в момент перегрузки, когда аварийная ситуация уже наступила. При этом отключение групп потребителей происходит с выдержкой времени. По этой причине остановка защитой даже одного из работающих генераторных агрегатов часто приводит к обесточиванию судна вследствие перегрузки оставшихся работоспособными машин. Заметное место в статье уделено рассмотрению способа разгрузки сети, при котором в автоматическом режиме формируется команда на отключение выбранных потребителей электроэнергии в тот момент, когда хотя бы один из параллельно работающих генераторных агрегатов уже неработоспособен, но показатели качества вырабатываемой электрической энергии еще находятся в допустимых пределах. В рамках предложенного подхода прогнозируется энергетическое состояние всей судовой электроэнергетической системы в случае уменьшения ее генерирующей способности и при необходимости формируется команда на разгрузку сети. Сформулированы и представлены в виде логических выражений условия, при которых должна осуществляться разгрузка. Показано, что предложенный подход универсален, поскольку он не зависит ни от числа работающих в параллель генераторных агрегатов, ни от числа вышедших из строя машин, ни от типа возникших неисправностей. Представлены функциональная схема и описание оригинального устройства для превентивной разгрузки судовой электроэнергетической системы, реализующего предложенный подход превентивной защиты на практике.

Ключевые слова: судовая электроэнергетическая система, отключение потребителей, перегрузка генераторных агрегатов, превентивная защита, область работоспособности

Для цитирования: Саушев А. В., Широков Н. В. Универсальный способ превентивной разгрузки судовой электроэнергетической системы // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2023. Т. 16, № 1. С. 85–93. doi: 10.32603/2071-8985-2023-16-1-85-93.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Original article

Universal Method of Preventive Unloading of the Ship's Electric Power System

A. V. Saushev, N. V. Shirokov✉

Admiral S. O. Makarov GUMRF, Saint Petersburg, Russia

✉ saushev@bk.ru

Abstract. The method of preventive protection for the purposes of safe operation of the ship's electric power system in emergency situations associated with malfunctions of its elements arising during operation is consid-

ered. It is shown that existing devices form a command to unload power sources at the moment of overload, when an emergency has already occurred. At the same time, the disconnection of consumer groups occurs with a time delay. For this reason, stopping even one of the working generator sets by protection often leads to de-energization of the vessel due to overload of the remaining operational machines. A notable place in the work is given to the consideration of the method of unloading the network, in which the automatic mode is used to form a command to turn off selected electricity consumers at a time when at least one of the parallel generator sets is already inoperable, but the quality indicators of the generated electrical energy are still within acceptable limits. Within the framework of the proposed approach, the energy state of the entire ship's electric power system is predicted in the event of a decrease in its generating capacity and, if necessary, a team is formed to unload the network. The conditions under which unloading should be carried out are formulated and presented in the form of logical expressions. It is shown that the proposed approach is universal, since it does not depend on the number of generator sets operating in parallel, nor on the number of machines that have failed, nor on the type of malfunctions that have occurred. The functional diagram and description of the original device for preventive unloading of the ship's electric power system, implementing the proposed approach of preventive protection in practice, are presented.

Keywords: marine electric power system, disconnection of consumers, overload of generator sets, preventive protection, area of operability

For citation: Saushev A. V., Shirokov N. V. Universal Method of Preventive Unloading of the Ship's Electric Power System // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2023. Vol. 16, no. 1. P. 85–93. doi: 10.32603/2071-8985-2023-15-1-85-93.

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Введение. Судовые электроэнергетические системы (СЭЭС) реализуют ответственные функции по генерации и управлению потоками электрической энергии, необходимой для обеспечения жизнедеятельности судна. В связи с этим на этапе эксплуатации важнейшая задача заключается в обеспечении безаварийной работы СЭЭС, в том числе при отказе хотя бы одного из генераторных агрегатов (ГА). Важное место при ее решении принадлежит способам идентификации технического состояния (ТС) системы, основанным на методах технической диагностики [1]–[3]. В статье рассматриваются вопросы защиты ГА от перегрузки посредством разгрузки СЭЭС. В настоящее время алгоритмы отключения различных групп потребителей при аварийных режимах работы источников электроэнергии реализуются системами управления (СУ) как береговых электроэнергетических систем [4]–[6], так и СЭЭС [7]–[9]. При этом, в случае отклонения показателей качества вырабатываемой электроэнергии, береговые сети, как правило, имеют инерционность, достаточную для осуществления целого комплекса мероприятий, направленных на их перевод в область допустимых режимов. В связи с этим ряд авторов выстраивают определенную последовательность управляющих операций СУ, имеющую иерархическую структуру, в составе которых в качестве результирующего воздействия обычно рассматривают отключение различных групп по-

требителей [10]–[12]. В автономных электроэнергетических системах, к которым относятся и СЭЭС, защита от перегрузки ГА, как правило, имеет два уровня. На первом из них СУ формируют команду на отключение второстепенных потребителей через выдержку времени после того, как загрузка любого из ГА превысит допустимое значение. В данном случае снижаются нагрузка СЭЭС и загрузка перегруженного ГА, которые могут выполняться в несколько этапов. При этом на каждом этапе через заданный интервал времени предполагается отключение заранее выбранной группы потребителей. Применение выдержки времени на срабатывание первого уровня защиты от перегрузки ГА позволяет избежать ошибок первого рода и не допустить ошибочной разгрузки сети при бросках тока во время запуска мощных электродвигателей [13]. Если отключение потребителей не приведет к снижению загрузки ГА ниже допустимого значения, то на втором уровне защиты перегруженный агрегат отключается, что позволяет сохранить машину, но может привести к перерыву электроснабжения и аварийной ситуации на судне. Рассмотренный подход пригоден для случая, когда источники электроэнергии находятся в работоспособном состоянии, а перегрузка возникает за счет быстрого увеличения нагрузки.

Существующие СУ выполняют отключение различных групп потребителей в то время, когда

внутренние или выходные параметры электроэнергетической системы превышают допустимые значения. В этом случае управляющее воздействие направлено на прекращение дальнейшего развития аварийной ситуации с целью минимизации ущерба, предотвращения более серьезных отказов техники, возможной гибели людей. При этом, например, отказ одного из двух параллельно работающих дизель-генераторов, функционирующих в составе СЭЭС с оптимальной загрузкой в 75–85 %, практически однозначно приводит к перерыву в электроснабжении и аварийной ситуации на судне [13]. Таким образом, важным направлением исследований является разработка методов предупредительного управления СЭЭС, направленных на предотвращение аварийных ситуаций.

Постановка задачи. В статье рассматривается универсальный способ превентивной разгрузки СЭЭС, основанный на ее предупредительном управлении. Идея такого управления рассмотрена в [13]–[15] и заключается в том, что СУ формирует управляющее воздействие по предупредительным сигналам до момента выхода параметров системы за пределы допуска. Цель такого управления заключается в предотвращении возникновения аварийной ситуации на судне. С учетом предупредительного управления команда на отключение различных групп потребителей для разгрузки СЭЭС должна формироваться до момента перегрузки системы или хотя бы одного из ее ГА, в связи с этим можно говорить о превентивной разгрузке электроэнергетической системы с целью предотвращения аварийной ситуации при ее переходе в частично неработоспособное состояние.

Методы и материалы. Для описания технического состояния СЭЭС воспользуемся понятием области работоспособности (G). Под этой областью понимают множество допустимых значений первичных параметров X , при которых выполняются все требования, предъявляемые к выходным параметрам системы Y и выходным параметрам ее функциональных блоков Z [16]. Первичные параметры – это параметры элементов системы, которые характеризуют ее состояние и свойства, например сопротивление обмоток электрических машин, коэффициенты усиления систем автоматики. Выходные параметры Y характеризуют свойства системы, интересующие потребителя. К ним, например, относятся частота судовой сети, напряжение, суммарная генерируемая мощность. К выходным параметрам Z , напри-

мер, относятся температура охлаждающей жидкости и давление смазочного масла дизеля, частота вращения вала и мощность, развиваемая ГА. Первичные параметры и выходные параметры функциональных блоков – это внутренние параметры СЭЭС.

В настоящее время разработаны эффективные методы построения областей работоспособности для различных электротехнических систем [16]. Область работоспособности можно представить как пересечение областей D_x , M_z и M_y :

$$G = D_x \cap M_z \cap M_y,$$

где D_x – допусковая область первичных параметров X , которая имеет форму гиперпараллелепипеда (бруса) и определяет внутреннее условие работоспособности; M_z – область, описываемая отображением допусковой области D_z выходных параметров Z функциональных блоков системы в пространство первичных параметров (определяет внутреннее условие работоспособности); M_y – область, описываемая отображением допусковой области D_y выходных параметров Y СЭЭС в пространство первичных параметров $\Phi_{yx} : D_y \rightarrow M_y$ (соответствует внешнему условию работоспособности) [16].

Для того чтобы СЭЭС была работоспособна, необходимо и достаточно, чтобы отображающая точка $S(X)$, характеризующая ее техническое состояние, принадлежала области работоспособности, т. е. выполнялось условие: $S(X) \in G$.

Использование информации о границе области работоспособности, заданной в пространстве первичных параметров СЭЭС, сопряжено с необходимостью применения большого числа датчиков, измеряющих различные физические величины, и средств коммуникации получаемой информации. В связи с этим для целей управления в качестве контролируемых параметров целесообразно использовать фазовые переменные Z – функции первичных параметров X , и рассматривать область работоспособности СЭЭС в пространстве выходных параметров ГА, представляющих собой функциональные блоки и элементы СЭЭС одновременно.

С другой стороны, в результате управляющих воздействий СЭЭС должна продолжать работать с требуемыми значениями параметров выходного напряжения. Следовательно, как показано в [13], [14], можно построить допусковую область, учи-

тывающую ограничения на управляющие воздействия, характеризуемые пространством M_u . Таковую область H назовем областью работоспособного функционирования. При этом

$$H = D_z \cap M_y \cap M_u,$$

где M_u представляет собой отображение $\Phi_{uz} : D_u \rightarrow M_u$ пространства управляющих сигналов U в пространство выходных параметров Z функциональных блоков СЭЭС.

При этом к управляющим сигналам отнесем такие константы, как заданное значение частоты и напряжения сети, переменная нагрузка СЭЭС.

Область работоспособного функционирования H характеризует множество допустимых значений внутренних и управляющих параметров СЭЭС, при котором выполняются все требования, предъявляемые к ее выходным параметрам [14], [15]. Из вышеизложенного следует, что для нахождения работоспособной системы в рабочем состоянии необходимо, чтобы выполнялось условие

$$S(\mathbf{Z}) \in H, \quad (1)$$

где $S(\mathbf{Z})$ – отображающая точка, характеризующая состояние системы в пространстве выходных параметров ее функциональных блоков.

Разделим область H на отдельные сегменты, имеющие однородные признаки, соответствующие, например, состоянию правильного функционирования СЭЭС. В [13] этот процесс назван сегментацией области работоспособного функционирования, а пространства, получаемые в результате сегментации области H , получили название усеченных областей правильного функционирования w_{jq} , где q – число таких областей. При этом

$$\forall w_{jq} \in H \text{ и } H = \bigcup_{j=1}^q w_{jq}, \quad j = \overline{1, q}. \quad (2)$$

Следовательно, с учетом выражений (1) и (2) условие безаварийного перехода СЭЭС в частично неработоспособное состояние можно представить как воздействие, в результате которого отображающая точка $S(\mathbf{Z})$ будет принадлежать области w_{jq}

$$S(\overline{\mathbf{Z}}) \in w_{jq}.$$

Превентивная разгрузка СЭЭС в рамках предупредительного управления должна обеспечивать заблаговременное снижение нагрузки судовой сети при выходе из строя хотя бы одного из

ГА или его СУ с целью исключения перегрузки и перерыва в электроснабжении ответственных потребителей. В [14] показано, что для задач подобного рода целесообразно рассматривать только один показатель качества работы СЭЭС – генерируемую мощность $N_{\text{общ}}$. При этом

$$N_{\text{общ}} = \sum_{i=1}^n N_i,$$

где N_i – мощность, которую может генерировать i -й ГА; n – число работающих ГА в составе СЭЭС в данный момент.

В случае отказа хотя бы одного из параллельно работающих агрегатов условие (1) нарушится и СЭЭС перейдет в неработоспособное состояние. При этом, если в результате предупредительного управления точка $S(\mathbf{Z})$, характеризующая техническое состояние СЭЭС, будет принадлежать одной из усеченных областей правильного функционирования w_{jq} , то переход системы в частично неработоспособное состояние произойдет безаварийно. Тогда, как показано в [14], в результате управляющего воздействия будут выполнены условия

$$S(\overline{\mathbf{Z}}) \in w_{jq} = D_{xq} \cap M_{yq} \cap M_{uq}, \quad j = \overline{1, q},$$

где $D_{xq} \in D_x$; $M_{yq} \in M_y$; $M_{uq} \in M_u$.

Работоспособные ГА будут выполнять свои функции во всех режимах эксплуатации СЭЭС, в том числе и в режиме, который наступит после отключения неработоспособного ГА. В связи с этим для обеспечения выполнения условия (3) необходимо проверить, удовлетворяет ли заданным требованиям множество входных (управляющих) сигналов $\mathbf{Z} = \{Z_1, \dots, Z_c, \dots, Z_e\}$, $c = \overline{1, e}$, где e – общее число сигналов; c – произвольно взятый сигнал. В данном случае $e = 1$, управляющим сигналом служит активная нагрузка сети P_c [18]. При этом должно выполняться неравенство

$$P_c \leq N_{\text{общ. ном. пр}} = \bigcup_{i=1}^{n-m} N_{i \text{ ном}},$$

где $N_{\text{общ. ном. пр}}$ – прогнозируемое значение номинальной генерируемой мощности СЭЭС после отключения неработоспособных агрегатов; $N_{i \text{ ном}}$ – наибольшая (номинальная) мощность, которую может развить i -й ГА, n – количество

действующих работоспособных ГА; m – количество неработоспособных отключаемых ГА.

Сущность рассматриваемого подхода заключается в том, что до момента размыкания автоматического выключателя каждого из вышедших из строя ГА прогнозируют $N_{\text{общ. ном. пр}}$ и сравнивают ее с нагрузкой сети P_c . При этом для формирования сигнала на отключение выбранных потребителей должно выполняться условие

$$\Delta P_{c, \text{пр}} = P_c - N_{\text{общ. ном. пр}} \geq 0,$$

где $\Delta P_{c, \text{пр}}$ – превышение нагрузки СЭЭС над прогнозируемым значением генерируемой мощности.

В связи с этим условие превентивной разгрузки сети в j -м режиме (F_j) можно сформулировать следующим образом:

$$F_j = L_{m \text{ откл}} \wedge (\Delta P_{c, \text{пр}} \geq 0), \quad (3)$$

где $L_{m \text{ откл}}$ – событие, заключающееся в идентификации m неработоспособных агрегатов, подлежащих отключению. Или, учитывая, что в установившемся режиме $P_c = N_{\text{общ}} = \bigcup_{i=1}^n N_i$, формулу

(3) можно записать следующим образом:

$$F_j = L_{m \text{ откл}} \wedge \left\{ \left(\bigcup_{i=1}^n N_i - \bigcup_{i=1}^{n-m} N_{i \text{ ном}} \right) \geq 0 \right\}. \quad (4)$$

Исходя из выражения (4), для обеспечения превентивной разгрузки СЭЭС целесообразно выполнить следующие операции:

- идентифицировать неработоспособное состояние ГА (обычно выходит из строя один агрегат, но в общем случае возможна ситуация, когда неработоспособными оказываются одновременно несколько (m) ГА);

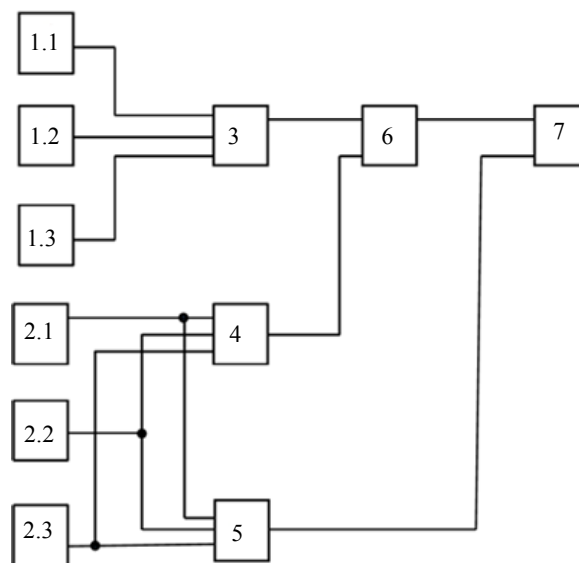
- определить, какую мощность сможет генерировать судовая электростанция после отключения неисправных агрегатов;

- измерить мощность, развиваемую каждым из работающих ГА в рассматриваемый момент времени, и рассчитать суммарную генерируемую мощность судовой электростанции для этого момента времени;

- сравнить суммарную генерируемую мощность в данный момент с прогнозируемой макси-

мально возможной мощностью, которую сможет генерировать судовая электростанция после отключения неработоспособных машин, и если последняя окажется меньше, то сформировать команду на превентивную разгрузку СЭЭС.

При этом отключение выбранных групп потребителей произойдет до отключения неработоспособных ГА и после срабатывания защиты оставшиеся исправные агрегаты будут работать без перегрузки, перерыва в электроснабжении ответственных потребителей не произойдет.



Функциональная схема устройства превентивной разгрузки СЭЭС
Functional diagram of the device for preventive unloading of the SEES

Практическая реализация предложенного способа может быть осуществлена посредством устройства превентивной разгрузки СЭЭС, функциональная схема которого для судовой электростанции, имеющей в своем составе три ГА, представлена на рисунке, где приняты следующие обозначения: 1.1, 1.2, 1.3 – датчики мощности первого, второго и третьего ГА соответственно; 2.1, 2.2, 2.3 – блоки формирования обобщенного сигнала о неисправности соответствующего ГА; 3 – суммирующий блок; 4 – блок формирования сигнала, пропорционального прогнозируемому значению максимальной мощности, которую сможет генерировать судовая электростанция после отключения неработоспособных агрегатов; 5 – логический элемент «ИЛИ»; 6 – блок сравнения; 7 – логический элемент «И».

Каждый из датчиков мощности 1.1, 1.2, 1.3 формирует на своем выходе сигнал, пропорцио-

нальный текущему значению мощности соответствующего агрегата (N_1, N_2, N_3). Полученная информация суммируется блоком 3, на его выходе генерируется сигнал, пропорциональный $N_{\text{общ}} =$

$$= N_1 + N_2 + N_3 = \bigcup_{i=1}^3 N_i, \text{ и поступает на первый}$$

вход блока сравнения 6. Предположим, что генераторы однотипные, электростанция судна работает в режиме, близком к оптимальному с точки зрения экономии топлива, и $N_1 = 0.7N_{\text{ном}}$,

$N_2 = 0.75N_{\text{ном}}$, $N_3 = 0.8N_{\text{ном}}$ ($N_{\text{ном}}$ – номинальная мощность ГА). Тогда на первый вход блока сравнения поступит сигнал, пропорциональный $N_{\text{общ}} = 2.25N_{\text{ном}}$. Предположим, что на дизеле второго ГА вышла из строя система смазки и давление смазочного масла снизилось до предупредительного значения. При этом на выходе блока 2.2 появится сигнал логической единицы, который поступит на второй вход блока 4, на вы-

ходе которого формируется сигнал $\bigcup_{i=1}^{n-m} N_{i \text{ ном}} =$

$$= \bigcup_{i=1}^2 N_{i \text{ ном}} = 2N_{i \text{ ном}}. \text{ Данная информация по-}$$

ступает на второй вход блока сравнения. Так как сигнал, поступающий на первый вход блока 6, превышает сигнал на втором его входе, на выходе блока сравнения формируется сигнал логической «1». Этот сигнал поступает на первый вход логического элемента «И»7, на второй вход которого также поступает сигнал логической «1» с выхода блока 5. При этом на выходе устройства появится управляющий сигнал на разгрузку СЭЭС, нагрузка сети снизится и после отключения защиты неисправного ГА первый и третий агрегаты будут работать без перегрузки, перерыва в электроснабжении ответственных потребителей не произойдет.

Предложенный подход универсален, поскольку его использование не зависит: от числа работающих в параллель агрегатов; количества вышедших из строя машин; от причины и характера возникшей неисправности. Как следует из (4), команда на разгрузку подается при наличии самого факта возникновения дефекта и не определяется какими бы то ни было его признаками. Это могут быть неисправности, характеризующиеся снижением давления смазочного масла, как в приведенном примере, или повышением температуры охлаждающей жидкости дизеля, которые

приводят к скачкообразному снижению генерирующей способности СЭЭС в результате отключения неработоспособного ГА. В этом случае могут учитываться только контролируемые параметры ГА [14].

Следует отметить, что возможны и неисправности, связанные, например, с выходом из строя системы питания двигателя, когда мощность электростанции снижается в течение относительно длительного времени, по крайней мере в течение нескольких секунд. В этом случае идентификация неисправности может осуществляться с учетом изменения нагрузки работающих ГА. При этом можно записать следующее условие:

$$F_i = L_1 \wedge (L_2 > L_{\text{лим}}) \wedge L_3,$$

где F_i – неработоспособное состояние ГА, нагрузка которого уменьшается; L_1 – условие снижения нагрузки i -го ГА при увеличении нагрузки остальных работающих ГА; $L_2 < L_{\text{лим}}$ – событие, заключающееся в том, что разность активных нагрузок генераторов больше допустимого значения; L_3 – событие, соответствующее увеличению разности нагрузок ГА.

Универсальный характер предложенного подхода предопределяет широкие возможности его использования в рамках предупредительного управления СЭЭС, которое оказывает существенное влияние на повышение ее живучести.

Обсуждение результатов. Современные системы защиты СЭЭС не в полной мере удовлетворяют условиям эксплуатации. В связи с этим при работе судов в узкостях, районах с интенсивным движением, а также при неблагоприятных погодных условиях принято использовать режим функционирования электростанции с обеспечением резерва мощности. На практике это приводит к работе ГА с малой загрузкой и крайне неэффективной эксплуатации оборудования [17], что особенно заметно при работе плавучих буровых установок [18].

Применение предложенного подхода одновременно с другими способами превентивной защиты, рассмотренными в [13]–[15], позволит избежать обесточивания СЭЭС при отказах ее элементов и постепенно исключить работу судна с избыточным числом ГА. Данное обстоятельство приведет к существенному снижению эксплуатационных расходов судоходных компаний.

Выводы и заключение. Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы:

1. Предложенный способ защиты СЭЭС обеспечивает снижение нагрузки сети судовой электростанции до отключения защитой вышедшего из строя ГА, обеспечивает переход неработоспособной СЭЭС в режим правильного функционирования без обесточивания судна. В связи с этим данный подход реализует метод превентивной защиты предупредительного управления СЭЭС.

2. Рассмотренное устройство позволяет достаточно просто реализовать сформулированный

в статье признак (4), идентифицирующий целесообразность формирования управляющего воздействия на разгрузку СЭЭС.

3. Разработанный подход носит универсальный характер как с точки зрения количества работающих и вышедших из строя ГА, так и с точки зрения характера и вида возникших неисправностей в СЭЭС.

Список литературы

1. Панкин А. М., Коровкин Н. В. Алгоритм систем диагностирования новых энергетических объектов // Науч.-техн. ведомости Санкт-Петербургского гос. ун-та. 2016. № 4 (254). С. 98–105. doi: 10.5862/JEST.254.11.

2. Стеклов А. С., Серебряков А. В., Титов В. Г. Разработка модели экспертной системы диагностирования и прогнозирования технического состояния судовых электроэнергетических систем // Электротехника: сетевой электрон. науч. журн. 2016. Т. 3. № 2. С. 24–26. doi: 10.24892/RIJEE/20160202.

3. Дрыгин М. Ю. Разработка алгоритма технического диагностирования основного горного оборудования // Горное оборудование и электромеханика. 2020. № 2. С. 44–50. doi: 10.26730/1816-4528-2020-2-44-50.

4. Совершенствование системы мониторинга и управления электрическими сетями мегаполисов / Н. И. Воропай, В. Г. Курбацкий, Н. В. Томин, Д. А. Панасецкий // Энергетик. 2016. № 8. С. 3–9.

5. Булатов Ю. Н., Крюков А. В. Противоаварийное управление установками распределенной генерации // Электричество. 2019. № 2. С. 18–25. doi: 10.24160/0013-5380-2019-2-18-255.

6. Continuity of supply and voltage quality in the electricity network of the future / M. H. J. Bollen, N. Etherden, K. Yang, G. W. Chang // 2012 IEEE 15th Intern. Conf. on Harmonics and Quality of Power. IEEE, 2012. P. 375–377. doi: 10.1109/ICHQP.2012.6381161.

7. Захарченко В. Н., Шевченко В. А. Решение задач управления судовой электроэнергетической установкой при изменении нагрузки // Судовые энергетические установки. 2015. № 36. С. 74–82.

8. Шилов М. П., Коробко Г. И. Разработка и моделирование систем управления генераторным агрегатом в автономных сетях // Тр. НГТУ им. П. Е. Алексеева. 2017. № 4 (119). С. 119–125.

9. Кротенко Д. С., Белов О. А. Моделирование процессов оптимизации режимов судовой электроэнергетической системы при электропитании от береговой сети // Техническая эксплуатация водного транспорта: проблемы и пути развития. 2020. № 1. С. 77–80.

10. Илюшин П. В. Применение алгоритма введения режима распределительной сети с распределен-

ной генерацией в допустимую область // Релейная защита и автоматизация. 2016. № 1. С. 37–42.

11. Адаптивные алгоритмы автоматики распределенного отключения нагрузки / Н. И. Воропай, Д. Н. Ефимов, Б. Н. Каратаев, Е. А. Новиков, А. Б. Осак, Д. А. Панасецкий // Электрические станции. 2016. № 11. С. 27–35.

12. Гнатюк В. И., Кивчун О. Р., Луценко Д. В. Динамическая модель управления электропотреблением объектов припортового электротехнического комплекса // Морские интеллектуальные технологии. 2017. № 2-4. С. 112–116.

13. Широков Н. В. Превентивная защита судовой электроэнергетической системы с параллельно работающими генераторными агрегатами // Науч.-техн. сб. Российского морского регистра судоходства. 2021. № 62-63. С. 121–130.

14. Широков Н. В. Метод исключения омонимичных областей в предупредительном управлении электротехнической системой // Вестн. Гос. ун-та морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. 2020. Т. 12, № 2. С. 390–401. doi: 10.21821/2309-5180-2020-12-2-390-401.

15. Saushev A., Shirokov N. Preventive protection of marine electrical power system from the transition of generating sets to motoring mode // E3S Web of Conferences, 2021. Vol. 244. P. 08007. doi: 10.1051/e3sconf/202124408007.

16. Саушев А. В. Области работоспособности электротехнических систем. СПб.: Политехника, 2013. 412 с.

17. Лукин С. А., Недялков К. В., Тихонович Е. Б. Автоматическое управление электроэнергетической установкой природоохранного судна «РОССИЯ» // Судостроение. 2000. № 2. С. 42–46.

18. Игнатенко А. В. Особенности электроэнергетических систем современных динамически позиционируемых буровых судов // V Междунар. балтийский форум. Калининград: Калининградский техн. ун-т, 2017. С. 262–269.

Информация об авторах

Саушев Александр Васильевич – д-р техн. наук, зав. кафедрой, профессор ФГБОУ ВО «ГУМРФ им. адмирала С. О. Макарова». 198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7.
E-mail: saushev@bk.ru
<http://orcid.org/0000-0003-2657-9500>

Широков Николай Викторович – канд. техн. наук, доцент ФГБОУ ВО «ГУМРФ им. адмирала С. О. Макарова». 198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7.
E-mail: Shirokovn@inbox.ru
<https://orcid.org/0000-0001-7170-0678>

References

1. Pankin A. M., Korovkin N. V. Algoritm sistem diagnostirovaniya novyh jenergeticheskikh ob'ektov // Nauch.-tehn. vedomosti Sankt-Peterburgskogo gos. un-ta. 2016. № 4 (254). S. 98–105. doi: 10.586.2/JEST.254.11. (In Russ.).
2. Steklov A. S., Serebrjakov A. V., Titov V. G. Razrabotka modeli jekspertnoj sistemy diagnostirovaniya i prognozirovaniya tehničeskogo sostojanija sudovyh jelektrojenergetičeskikh sistem // Jelektrotehnika: setevoj jelektron. nauch. zhurn. 2016. T. 3, № 2. S. 24–26. doi: 10.24892/RJEE/20160202. (In Russ.).
3. Drygin M. Ju. Razrabotka algoritma tehničeskogo diagnostirovaniya osnovnogo gornogo oborudovanija // Gornoe oborudovanie i jelektromehanika. 2020. № 2. S. 44–50. doi: 10.26730/1816-4528-2020-2-44-50. (In Russ.).
4. Sovershenstvovanie sistemy monitoringa i upravlenija jelektricheskimi setjami megapolisov / N. I. Voropaj, V. G. Kurbackij, N. V. Tomin, D. A. Panaseckij // Jenergetik. 2016. № 8. S. 3–9. (In Russ.).
5. Bulatov Ju. N., Krjukov A. V. Protivoavarijnoe upravlenie ustanovkami raspredelennoj generacii // Jelektričestvo. 2019. № 2. S. 18–25. doi: 10.24160/0013-5380-2019-2-18-255. (In Russ.).
6. Continuity of supply and voltage quality in the electricity network of the future / M. H. J. Bollen, N. Etherden, K. Yang, G. W. Chang // 2012 IEEE 15th Intern. Conf. on Harmonics and Quality of Power. IEEE, 2012. P. 375–377. doi: 10.1109/ICHQP.2012.6381161.
7. Zaharchenko V. N., Shevchenko V. A. Reshenie zadach upravlenija sudovoj jelektrojenergetičeskoi ustanovkoj pri izmenenii nagruzki // Sudovye jenergetičeskie ustanovki. 2015. № 36. S. 74–82. (In Russ.).
8. Shilov M. P., Korobko G. I. Razrabotka i modelirovanie sistem upravlenija generatornym agregatom v avtonomnyh setjah // Tr. NGTU im. R. E. Alekseeva. 2017. № 4 (119). S. 119–125. (In Russ.).
9. Krotenko D. S., Belov O. A. Modelirovanie processov optimizacii rezhimov sudovoj jelektrojenergetičeskoi sistemy pri jelektropitanii ot beregovoj seti // Tehničeskaja jekspluatacija vodnogo transporta: problema i puti razvitija. 2020. № 1. S. 77–80. (In Russ.).
10. Iljushin P. V. Primenenie algoritma vvedenija rezhima raspredelitel'noj seti s raspredelennoj generaciej v dopustimuju oblast' // Relejnaja zashhita i avtomatizacija. 2016. № 1. S. 37–42. (In Russ.).
11. Adaptivnye algoritmy avtomatiki raspredelenno-go otključenija nagruzki / N. I. Voropaj, D. N. Efimov, B. N. Karataev, E. A. Novikov, A. B. Osak, D. A. Panaseckij // Jelektričeskie stancii. 2016. № 11. S. 27–35.
12. Gnatjuk V. I., Kivchun O. R., Lucenko D. V. Dinamicheskaja model' upravlenija jelektropotrebleniem ob'ektov priportovogo jelektrotehničeskogo kompleksa // Morskie intellektual'nye tehnologii. 2017. № 2-4. S. 112–116. (In Russ.).
13. Широков Н. В. Preventivnaja zashhita sudovoj jelektrojenergetičeskoi sistemy s parallel'no rabotajushhimi generatornymi agregatami // Nauch.-tehn. sb. Rossijskogo morskogo registra sudohodstva. 2021. № 62-63. S. 121–130. (In Russ.).
14. Широков Н. В. Metod isključenija omonimichnyh oblastej v predupreditel'nom upravlenii jelektrotehničeskoi sistemoj // Vestn. Gos. un-ta morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova. 2020. T. 12, № 2. S. 390–401. doi: 10.21821/2309-5180-2020-12-2-390-401. (In Russ.).
15. Saushev A., Широков N. Preventive protection of marine electrical power system from the transition of generating sets to motoring mode // E3S Web of Conf., 2021. Vol. 244. P. 08007. doi: 10.1051/e3sconf/202124408007.
16. Saushev A. V. Oblasti rabotosposobnosti jelektrotehničeskikh sistem. SPb.: Politehnika, 2013. 412 s. (In Russ.).
17. Lukin S. A., Nedjalkov K. V., Tihonovich E. B. Avtomatičeskoe upravlenie jelektrojenergetičeskoi ustanovkoj prirodoohrannogo sudna «ROSSIJa» // Sudostroenie. 2000. № 2. S. 42–46. (In Russ.).
18. Ignatenko A. V. Osobennosti jelektrojenergetičeskikh sistem sovremennyh dinamicheski pozicioniruemyh burovnyh sudov // V Mezhdunar. baltijskij forum. Kaliningrad: Kaliningradskij tehn. un-t, 2017. S. 262–269. (In Russ.).

Information about the authors

Alexander V. Saushev – Dr Sci. (Eng.), Head of the Department, professor of Admiral S. O. Makarov GUMRF 198035, 5/7 Dvinskaya Str., Saint Petersburg, Russian Federation.

E-mail: saushev@bk.ru

<http://orcid.org/0000-0003-2657-9500>

Nikolay V. Shirokov – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor Admiral S. O. Makarov GUMRF 198035, Saint Petersburg, Dvinskaya str., 5/7, Russian Federation

E-mail: Shirokovn@inbox.ru

<https://orcid.org/0000-0001-7170-0678>

Статья поступила в редакцию 12.11.2022; принята к публикации после рецензирования 28.11.2022; опубликована онлайн 30.01.2023.

Submitted 12.11.2022; accepted 28.11.2022; published online 30.01.2023.
