

OPERATIONAL IDENTIFICATION OF THE SHIP'S POWER PLANT TECHNICAL CONDITION FOR SOLVING PROBLEMS OF PREVENTIVE MANAGEMENT

A. V. Saushev, N. V. Shirokov

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

Possible approaches to solving the problem of operational identification of the technical condition of ship power plants are considered. It is shown that the means of technical diagnostics used on modern ships are intended only for effective maintenance and repair of power equipment and they are not adapted for timely provision of information on the technical condition of the ship's power plant necessary to ensure preventive management in abnormal operating modes. The definition of operational identification of the technical condition as a process of technical diagnostics of a ship's power plant for the purposes of preventive and emergency management of its technical condition is given. The provision is substantiated that the means of technical diagnostics should not only identify the inoperable state of the elements of the ship's power plant, but also predict its functioning mode after the shutdown of the inoperable generator unit and provide information to the warning control equipment about the necessary adjustment of external conditions to ensure its trouble-free transition to a partially operational state. It is shown that, unlike existing diagnostic tools, the goal-setting of operational identification of the technical condition of a ship's power plant dictates the need to take into account such an important factor as the rate of the controlled parameter change, to determine the probable time for this factor to reach its maximum permissible value. The necessity of mandatory identification of inoperable elements of a ship's power plant and the implementation of control actions aimed at eliminating an emergency situation until the overload of operable units and disabling them by means of protection is substantiated. It is established that the information obtained as a result of identification will allow the decision-making preparation system to formulate recommendations to the maintenance personnel and the preventive protection system about the necessary impacts on the ship's power plant in order to exclude emergency situations. The main reasons for the overload of the ship's power supply system are analyzed, algorithms for the practical solution of the problem of operational identification of the technical condition of the ship's power plant for cases related to the overload of serviceable machines due to the shutdown of inoperable units are developed.

Keywords: ship power plant, operational identification, preventive protection, technical condition, generator set, operational area, preventive management.

For citation:

Saushev, Alexander V., and Nikolaj V. Shirokov. "Operational identification of the ship's power plant technical condition for solving problems of preventive management." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 14.2 (2022): 306–318. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-2-306-318.

УДК 621.3.05

ОПЕРАТИВНАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СУДОВОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПРЕДУПРЕДИТЕЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ

А. В. Саушев, Н. В. Широков

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

Рассмотрены возможные подходы к решению задачи оперативной идентификации технического состояния судовых электростанций. Показано, что применяемые на современных судах средства технического диагностирования предназначены только для осуществления эффективного технического обслуживания и ремонта энергетического оборудования и не приспособлены для своевременного предо-

ставления информации о техническом состоянии судовой электростанции, необходимой для обеспечения предупредительного управления в нештатных режимах работы. Дано определение операционной идентификации технического состояния как процесса технического диагностирования судовой электростанции в целях предупредительного и противоаварийного управления ее техническим состоянием. Обосновано положение о том, что средства технического диагностирования должны не только выявлять неработоспособное состояние элементов судовой электростанции, но и прогнозировать режим ее функционирования после отключения неработоспособного генераторного агрегата, предоставлять информацию аппаратуре предупредительного управления о необходимой корректировке внешних условий для обеспечения ее безаварийного перехода в частично работоспособное состояние. Показано, что в отличие от существующих средств диагностирования, целеполагание операционной идентификации технического состояния судовой электростанции обуславливает необходимость учета такого важнейшего фактора, как скорость изменения контролируемого параметра, а также позволяет определять вероятное время достижения при помощи учета данного фактора своего предельно допустимого значения. Обоснована необходимость осуществления обязательной идентификации неработоспособных элементов судовой электростанции и реализации управляющих воздействий, направленных на исключение аварийной ситуации до момента перегруза работоспособных агрегатов и отключения их средствами защиты. Установлено, что полученная в результате идентификации информация позволит системе подготовки принятия решения сформулировать рекомендации обслуживающему персоналу и системе превентивной защиты о необходимых воздействиях на судовую электростанцию с целью исключения аварийных ситуаций. Проанализированы основные причины перегруза системы электроснабжения судна, разработаны алгоритмы практического решения задачи оперативной идентификации технического состояния судовой электростанции для случаев, связанных с перегрузом исправных машин ввиду отключения неработоспособных агрегатов.

Ключевые слова: судовая электростанция, оперативная идентификация, превентивная защита, техническое состояние, генераторный агрегат, область работоспособности, предупредительное управление.

Для цитирования:

Саушев А. В. Оперативная идентификация технического состояния судовой электростанции для решения задач предупредительного управления / А. В. Саушев, Н. В. Широков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2022. — Т. 14. — № 2. — С. 306–318. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-2-306-318.

Введение (Introduction)

Одним из важнейших направлений повышения эффективности эксплуатации сложных электро-технических комплексов является внедрение методов управления их техническим состоянием (ТС) [1]. Практическая реализация данной стратегии невозможна без использования систем технического диагностирования, нашедших свое применение в различных областях техники [2]–[4], в том числе на флоте [5]–[7]. Объектом исследования в настоящей работе является судовая электростанция (СЭС), составляющая основу судовой электроэнергетической системы. Важнейшим требованием, предъявляемым к СЭС, является ее высокая надежность, обеспечиваемая в течение многих лет средствами функционального и аппаратного резервирования.

Характерной особенностью работы СЭС является режим «с обеспечением резерва мощности», при котором число работающих генераторных агрегатов (ГА) превышает количество, необходимое для эффективного электроснабжения потребителей. Данный подход приводит к сложной ситуации, возникающей на этапе эксплуатации. С одной стороны, параллельная работа дополнительного источника электрической энергии обуславливает снижение нагрузки на работающие машины, что на практике приводит к резкому повышению удельного расхода топлива и смазочного масла, закоксованности деталей двигателя остатками продуктов сгорания, повышенному износу и уменьшению остаточного ресурса оборудования. С другой стороны, в случае отказа одного из ГА СЭС будет продолжать оставаться в рабочем состоянии. При этом не наблюдается перегрузки сети и обеспечения судна. Особенно ярко указанные противоречия проявляются в процессе работы судов технического флота (например, плавучих буровых платформ в режиме бурения и динамического позиционирования). Таким образом, необходимо выбирать между большими эксплуатационными

расходами и повышением надежности функционирования СЭС за счет работы дополнительных агрегатов [8]. Одним из вариантов разрешения данного противоречия является применение специальных технических средств, существенно увеличивающих безопасность и надежность работы СЭС в нештатных режимах, вызванных отказом ГА или системы управления. В этой связи разработка методов и средств оперативной идентификации ТС СЭС представляет собой актуальную задачу, решение которой позволит повысить надежность электроснабжения судна, а также исключить эксплуатационные затраты, вызываемые наличием дополнительных (резервных) агрегатов.

Методы и материалы (Methods and Materials)

В настоящем исследовании под оперативной идентификацией (ОИ) ТС СЭС будем понимать процесс технического диагностирования, результатом которого является получение информации о ее техническом состоянии, предназначенный для формирования управляющих воздействий, необходимых для безаварийной работы СЭС в случае возникновения нештатной ситуации, вызванной отказом одного из ее элементов или ошибкой обслуживающего персонала. Другими словами, при ОИ результаты диагностирования используются не для восстановления исправного ТС, а для структурной или параметрической адаптации СЭС к возникшей неисправности с целью сохранения ее правильного функционирования при помощи средств предупредительного управления [9].

При этом, согласно действующим стандартам применительно к СЭС, под техническим состоянием будем понимать состояние СЭС, характеризующее совокупностью установленных в документации параметров, описывающих ее способность выполнять требуемые функции в рассматриваемых условиях. Следует отметить, что категория «состояние» является сложным философским понятием, определение и сущность которого применительно к электротехническим комплексам и системам рассмотрена в работе [10].

Важнейшей задачей диагностирования является получение информации о работоспособном или неработоспособном состоянии СЭС. Работоспособное состояние определяется как состояние объекта, в котором он способен выполнять требуемые функции. Допускается также определение, которое раскрывает суть процесса диагностирования. При этом работоспособное состояние определяется как состояние объекта, в котором значения всех параметров, характеризующих способность выполнять заданные функции, соответствует требованиям, установленным в документации на этот объект. Такие параметры называют *диагностическими*. В качестве диагностических параметров СЭС чаще всего рассматривают первичные параметры, т. е. параметры ее комплектующих элементов или функции от этих параметров, имеющие определенный физический смысл [10]. Такой подход позволяет представить работоспособное состояние СЭС в виде множества значений первичных параметров. При этом СЭС будет являться работоспособной, если точка $S(\bar{X})$, характеризующая ее техническое состояние, принадлежит области работоспособности G , т. е. выполняется условие

$$S(\bar{X}) \in G. \quad (1)$$

Под областью работоспособности G понимают множество допустимых значений первичных параметров $\{\bar{X}\}$, при которых выполняются все требования, предъявляемые к выходным параметрам системы $\{\bar{Y}\}$ и выходным параметрам ее функциональных блоков $\{\bar{Z}\}$ [10], [11]. Множество G может быть представлено как пересечение множеств D_x , M_z и M_y :

$$G = D_x \cap M_z \cap M_y, \quad (2)$$

где D_x — допусковая область первичных параметров, которая имеет форму бруса и в евклидовом пространстве может быть представлена как $D_x = \bigcap_{k=1}^n D_k$, $D_k = D_{k \min} \cap D_{k \max}$ (соответствует внутреннему условию работоспособности); M_z — область, описываемая отображением в пространстве первичных параметров $\Phi_{zx} : D_z \rightarrow M_z$, $M_z = \bigcap_{r=1}^p M_r$ допусковой области параметров функцио-

нальных блоков системы $D_z = \bigcap_{r=1}^p D_r$, соответствующей внутреннему условию работоспособности; M_y — область, описываемая отображением в пространстве первичных параметров $\Phi_{yx} : D_y \rightarrow M_y$, $M_y = \bigcap_{i=1}^m M_i$ допусковой области выходных параметров СЭС $D_y = \bigcap_{i=1}^m D_i$, соответствующей внешнему условию работоспособности [11].

Варианты воздействия на СЭС, находящуюся в нештатном режиме работы, весьма ограничены и заключаются в возможности отключения неработоспособного агрегата (элемента СЭС) или группы потребителей электроэнергии. Это обстоятельство предопределяет глубину диагностирования на уровне ГА, который в данном случае является элементом системы. В этой связи, как показано в работе [12], для целей управления в качестве диагностических (контролируемых) параметров целесообразно использовать фазовые переменные $\{\bar{Z}\}$, представляющие собой функции от параметров $\{\bar{X}\}$. При этом в рамках настоящего исследования ГА представляют собой функциональные блоки и элементы СЭС одновременно. Поэтому в данном случае рассматривая область работоспособности СЭС в пространстве выходных параметров ГА, можно записать $\bar{X} \equiv \bar{Z}$. С другой стороны, СЭС является саморегулируемой системой. В нормальном режиме эксплуатации она реализует структурную адаптацию к величине нагрузки сети, которая в штатном режиме функционирования формирует управляющее воздействие. Поэтому в случае выхода из строя и отключения одного из агрегатов возможна ситуация перегруза и отключения работоспособных машин электростанции. В этой связи средства ОИ должны предвидеть режим работы СЭС, характеризующийся достижением контролируемыми параметрами своего предельного значения, осуществляя оперативное прогнозирование, результаты которого используются для принятия решения системой предупредительного управления (СПУ). Для этих целей необходимо учитывать текущее значение величины нагрузки сети потребителей.

Как показано в работе [12], можно построить допусковую область, учитывающую ограничения на управляющие воздействия, заданные областью M_u . Назовем такую допусковую область *H* областью работоспособного функционирования. При этом

$$H = D_z \cap M_y \cap M_u, \quad (3)$$

где D_z — допусковая область выходных параметров $\bar{Z}$ функциональных блоков СЭС, которая имеет форму бруса и в евклидовом пространстве может быть описана как $D_z = \bigcap_{k=1}^n D_k$, $D_k = D_{k \min} \cap D_{k \max}$, соответствующая внутреннему условию работоспособности СЭС; M_y — область, характеризующая внешние условия работоспособности СЭС и представляющая собой отображение выходных параметров СЭС ($\bar{Y}$) в пространстве параметров ($\bar{Z}$) $\Phi_{yz} : D_y \rightarrow M_y$, $M_y = \bigcap_{y=1}^n M_y$; M_u — область, характеризующая пространство управляющих воздействий СЭС, которая представляет собой отображение пространства управляющих сигналов ($\bar{U}$) в пространство выходных параметров функциональных блоков ($\bar{Z}$) $\Phi_{uz} : D_u \rightarrow M_u$, $M_u = \bigcap_{c=1}^e M_c$ [13].

Область работоспособного функционирования H , описываемая выражением (3), характеризует множество допустимых значений внутренних и управляющих параметров СЭС, при которых выполняются все требования, предъявляемые к ее выходным параметрам [10]. Внезапный отказ СЭС и аварийная ситуация на судне, вызванная обесточиванием сети, как правило происходят в результате неисправности ГА, параметры которого изменяются постепенно. В этой связи характерной является ситуация с выходом из строя системы смазки дизеля, при которой величина давления смазочного масла может снижаться от номинального до минимально допустимого значения в течение нескольких минут, после чего срабатывает защита, и агрегат отключается от сети.

Следует отметить, что до момента отключения средствами защиты неисправного ГА он продолжает снабжать судовую сеть электроэнергией требуемого качества, при этом его отказ не оказывает влияния на выходные параметры СЭС и только после срабатывания автоматического

выключателя, защищающего данный генератор, мощность СЭС резко снижается, что может вызвать перегруз оставшихся работоспособными ГА, их отключение от сети и, как следствие, внезапный отказ электростанции, сопровождаемый обесточиванием судна.

С другой стороны, постепенный отказ СЭС может быть вызван внезапной потерей работоспособности одного из ГА. В качестве примера рассмотрим работу двух ГА, загруженных на 70 % и 75 % от номинальной мощности ($N_{\text{ном}}$) соответственно [14]. Предположим, что произошел разрыв трубопровода подачи топлива в первый агрегат (ГА1) и это привело к прекращению поступления питания в его первичный двигатель. В этом случае ГА1 в течение, например, 5 с выработает топливо, имеющееся в фильтрах и патрубках, а затем перейдет в двигательный режим работы. Данный процесс будет сопровождаться переводом нагрузки на вторую машину, через 2–3 с точность распределения нагрузок между параллельно работающими генераторами превысит допустимое значение и СЭС перейдет в неработоспособное состояние. В момент полной разгрузки вышедшей из строя машины нагрузка второго агрегата (ГА2) составит 145 % от номинального значения и будет увеличиваться за счет появления обратной мощности, значение которой может превысить 20 % от $N_{\text{ном}}$. При этом величина и динамика роста нагрузки работоспособного агрегата оказываются такими, что скорость вращения вала его первичного двигателя будет стремительно снижаться, становясь ниже критического значения, при этом частота и напряжение генератора снизятся, ГА2 отключится защитой, произойдет перерыв в электроснабжении судна.

Таким образом, имеется некоторый интервал времени от момента появления дефекта в ГА до момента отказа СЭС (t_{em}), характеризующий инерционность системы в плане ее реагирования на потерю работоспособности хотя бы одного из элементов. Этот показатель необходимо учитывать при разработке диагностического обеспечения СЭС, в том числе средств ОИ. В этой связи большой интерес представляет собой интервал времени от момента возникновения неисправности до ее обнаружения, определенный в работе [9] как *оперативная продолжительность поиска дефекта* (t_{qsd}). Очевидно, что для успешного использования результатов диагностирования необходимо выполнение следующего условия:

$$t_{\text{qsd}} + t_{\text{sp}} < t_{\text{em}}, \quad (4)$$

где t_{sp} — время, необходимое для принятия решения и реализации воздействия на СЭС в целях предотвращения аварийной ситуации.

Для СПУ, выполняющей превентивную защиту СЭС от обратной мощности, важно, чтобы идентификация неработоспособного источника электрической энергии и реализация необходимого воздействия на СЭС, во избежание их отключения средствами защиты и обесточивания судовой сети, осуществлялись быстрее перегрузки работоспособных ГА [10]. Поскольку инерционность СЭС по отношению к различным видам неисправностей ее элементов неодинакова, для организации предупредительного управления используются два принципиально разных подхода. Первый из них основан на предоставлении обслуживающему персоналу информации об отклонении контролируемых параметров от заданного значения и формировании рекомендаций о целесообразности того или иного воздействия на объект управления. Используемые для этих целей технические средства непосредственно участвуют в работе оператора или системы управления. В данном случае обслуживающий персонал самостоятельно выбирает комплекс воздействий на объект управления. Существенное влияние на качество принимаемых решений оказывают такие субъективные факторы, как психическое, эмоциональное и физиологическое состояние членов экипажа, их квалификация, опыт и техническая интуиция.

В данном случае взаимодействие оператора и технических устройств следует рассматривать как *человеко-машинный комплекс* [15]–[17], который на практике представлен в виде систем подготовки принятия решений (СППР). Характерным примером практической реализации данного подхода служит применение аппаратуры для предотвращения столкновений между морскими судами, предоставляющей судоводителю информацию о наиболее предпочтительных действиях при расхождении, проходе судна в узкостях, а также в сложной навигационной обстановке [18]–[20].

При этом зачастую возникает необходимость принятия решений на основе информации, имеющей противоречивый характер и предполагающей нестандартные действия. До настоящего времени подобного рода задачи являются весьма сложными для искусственного интеллекта и роль человеческого фактора в подобной ситуации чрезвычайно велика. Кроме того, как правило, существует запас времени для оценки ситуации и принятия оператором адекватного решения.

В настоящее время на флоте появились первые СППР, позволяющие решать задачи идентификации ТС главных двигателей [21], [22] на базе большого набора контролируемых параметров и анализа отклонения их значений от заданной величины. При этом основным является решение задачи получения диагностической информации с целью проведения техобслуживания и ремонта, а также недопущения развития дефекта. Аналогично организованы СППР судовых электроэнергетических систем, входящие в состав комплексных систем управления технологическими процессами, призванные обеспечивать предупреждение аварийных ситуаций на ранних этапах, регистрацию и измерение диагностических параметров, включая аварийные и предаварийные режимы работы оборудования [3]. В отличие от существующих систем диагностирования целеполагание ОИ СЭС обуславливает необходимость учета такого важнейшего фактора, как скорость изменения контролируемого параметра, а также возможность определения вероятного времени достижения этим параметром своего предельно допустимого значения. Данная информация в каждом конкретном случае позволит СППР СЭС сформулировать рекомендации обслуживающему персоналу о методах необходимого воздействия на систему с целью исключения аварийной ситуации.

На практике могут потребоваться такие условия эксплуатации судна, согласно которым для его безопасной работы возникнет острая необходимость в функционировании, например, подруливающего устройства, а СППР будет рекомендовать его отключение. Исходя из опыта эксплуатации и технической интуиции, оператор может вместо рекомендованного потребителя на непродолжительное время отключить другой потребитель, создающий аналогичную нагрузку, но относящийся к ответственным устройствам первой категории. Такие действия налагают большую ответственность на работу обслуживающего персонала и предъявляют повышенные требования к его квалификации и психологической устойчивости. Для решения этой проблемы используются мероприятия психологической разгрузки, оптимизации труда и отдыха членов экипажа судна, а также специальная тренажерная подготовка [23]–[25]. Тем не менее при этом сохраняется высокая вероятность совершения ошибок обслуживающим персоналом, особенно в нештатных ситуациях [26]–[28].

С одной стороны, положение усугубляется существенным сокращением численности экипажей, которое приводит к тому, что в штате подавляющего числа судов имеется только один электромеханик, а в некоторых компаниях его функции возлагают на старшего механика и матроса-электрика. С другой стороны, достаточно часто интервал времени от момента достижения контролируемым параметром предупредительного значения до момента достижения им аварийной величины настолько мал, что человеку не под силу физически осознать произошедшее. В этой связи при всей полезности использования СППР в рамках СПУ наиболее перспективной является превентивная защита СЭС.

Система превентивной защиты (СПЗ) СЭС выполняет все функции, реализуемые СППР, выполняя при этом обязанности человека-оператора по выбору и формированию управляющего воздействия. Данное обстоятельство позволяет реализовать сценарий безаварийного перехода СЭС в частично работоспособное состояние даже в случаях, при которых величина t_{em} очень мала и не превышает 1 с. В то же время важным преимуществом СПЗ является независимость от человеческого фактора, по причине которого большинство аварий происходит в электроэнергетических системах [29]–[31]. Перечень контролируемых параметров, существенно влияющих на функционирование СЭС, изначально известен. В этой связи представляется возможным для СПЗ заранее адекватно оценить последствия возможных ошибочных действий обслуживающего персонала, принять своевременные решения и осуществить необходимые операции для их нейтрализации. В данном случае средства диагностирования, осуществляющие ОИ ТС СЭС, будут рассматривать неправомерные манипуляции оператора как неисправность системы.

Несмотря на то, что причины отказа ГА могут иметь различную природу и относиться к разным деталям агрегата и его СУ, число параметров, характеризующих его техническое состояние, невелико. При этом можно определить совокупность неисправностей, приводящих к строго определенному признаку неработоспособного состояния элемента СЭС и обуславливающих применение конкретного управляющего воздействия на систему как кластер дефектов (КД).

В этой связи рассмотрим ряд следующих неисправностей: залипание кнопки для регулировки уменьшения подачи топлива в дизель, замыкание датчика активной нагрузки на напряжение питания (при этом формируется сигнал, соответствующий максимальной загрузке агрегата), приваривание контактов контактора топливного регулятора дизеля для уменьшения подачи топлива, выход из строя топливного насоса и разрыв топливного трубопровода. Каждая из указанных неисправностей имеет свой характерный признак, используемый при поиске дефектов в целях восстановления работоспособности системы в соответствии с выражениями (1) и (2). Все эти неисправности имеют один общий признак — их наличие обуславливает неконтролируемую разгрузку машины и в этой связи они образуют соответствующий КД. В этом случае можно установить строго определенную логическую зависимость:

$$X_i \rightarrow Z_i \rightarrow F_i \wedge U_i \rightarrow Y_i, \quad (5)$$

где X_i — событие, соответствующее возникновению неисправности ГА, включенной в i -й КД; Z_i — событие, соответствующее появлению i -го признака неработоспособного состояния (фазовой переменной выражения (2)) ГА; F_i — событие, соответствующее срабатыванию защиты по i -му признаку неработоспособного состояния ГА или его отказу; U_i — событие, соответствующее наличию определенной совокупности внешних воздействий в момент совершения F_i ; Y_i — событие, соответствующее аварийной ситуации, связанной с обесточиванием судна [32].

Из выражения (5) следует, что аварийная ситуация произойдет только при наличии некоторых внешних условий U_i . Для СЭС этим условием является суммарная нагрузка сети, превышающая генерирующую мощность системы после поломки или отключения одного из агрегатов защитой. Следовательно, СПУ по сигналу Z_i должны оценить наличие U_i и до срабатывания защиты исключить это событие из логической цепочки:

$$X_i \rightarrow Z_i \rightarrow F_i \wedge \bar{U}_i \rightarrow \bar{Y}_i. \quad (6)$$

Средства ОИ ТС СЭС должны определить и предоставить СПЗ информацию о наличии диагностического признака неработоспособного состояния ГА Z_i и требуемой величины изменения внешних воздействий на систему, при которой в момент наступления события F_i произойдет событие $\bar{U}_i$. При этом ОИ ТС предоставляет информацию также средствам защиты, обеспечивающим противоаварийное управление ГА, направленное не на предотвращение аварийной ситуации, а лишь на смягчение ее последствий [13]. В этом случае результаты диагностирования обычно ограничиваются определением момента, при котором контролируемый параметр достигает своего предельно допустимого значения. Таким образом, на основании ранее изложенного, ОИ ТС можно определить как процесс технического диагностирования СЭС в целях предупредительного и противоаварийного управления ее техническим состоянием.

Результаты (Results)

В отличие от задачи идентификации ТС СЭС с целью проведения эффективного менеджмента в области ТО и ремонта, ОИ ТС оперирует небольшим числом параметров, определяемых, как правило, средствами защиты электроэнергетической системы. Рассмотрим процесс перегрузки ГА СЭС вследствие уменьшения давления смазочного масла дизеля. Величина перегрузки в этом случае, как правило, невелика и обычно не превышает 5–10 % от номинальной мощности генератора. При этом защита от превышения нагрузки ГА не срабатывает, происходит отключение второстепенных потребителей, что не нарушает функционирование ответственных устройств, обеспечивающих безопасную работу судна. В остальных случаях, при которых работоспособная

машина принимает на себя нагрузку вышедшего из строя или отключенного по ошибке агрегата, ее перегруз может оказаться весьма существенным, что приведет к останову первичного двигателя и обесточиванию сети. Так, например, если при параллельной работе двух генераторов, нагруженных на 75 % от их номинальной мощности, произойдет отключение защиты одного из них, то нагрузка второго удвоится, составив 150 % от номинала. При этом ни один из современных дизелей не сможет выдержать такой экстремальный режим и заглохнет сам или будет остановлен защитой. В данном случае отключение второстепенных потребителей не произойдет из-за выдержки в срабатывании, необходимой для демпфирования бросков тока при пуске мощных электродвигателей [14].

В этой связи, в соответствии с выражением (5), разрабатываемые средства ОИ ТС СЭС должны зафиксировать наличие признака неработоспособного состояния Z_i , оценить наличие напряжения U_i и передать полученную информацию СПУ. Для КД, приводящих к самопроизвольной разгрузке агрегата, можно воспользоваться диагностическим признаком, представленным в работе [33]. При этом

$$I_i = l_i \wedge L_1 \wedge (L_2 > L_{\lim}) \wedge (\overline{w_1^q} \vee \overline{w_3^q}), \quad (7)$$

где I_i — диагностический признак, характеризующий неработоспособное состояние агрегата до перехода его в двигательный режим ($i = 1, 2, \dots, n$, где n — количество работающих в данный момент ГА); l_i — событие, заключающееся в уменьшении нагрузки i -го агрегата; L_1 — событие заключающееся в том, что нагрузка i -го ГА уменьшается, а другого увеличивается; $L_2 > L_{\lim}$ — событие, заключающееся в том, что в момент идентификации ТС СЭС разность нагрузок между параллельно работающими ГА (L_2) больше заданного значения $L_{\lim}$; w_1^q и w_3^q — усеченные области правильного функционирования, получаемые путем сегментации области работоспособности H .

Усеченные области правильного функционирования соответствуют работе СЭС в режиме включения одного из агрегатов на параллельную работу и в режиме переключения системы с ручного режима функционирования на автоматический соответственно [33].

Оценка наличия напряжения U_i осуществляется посредством вычисления нагрузки сети (P_{net}) в момент фиксации признака I_i и сравнения ее величины с допустимой нагрузкой, которую может принять оставшийся работоспособным агрегат ($P_{\lim}$). В случае, если выполняется условие

$$P_{\text{net}} > P_{\lim}, \quad (8)$$

то ОИ ТС СЭС должна определить минимальную мощность потребителей (ΔP), которые необходимо отключить до отключения неработоспособного агрегата ($\Delta P > P_{\text{net}} - P_{\lim}$) и передать информацию в СПУ для осуществления превентивной разгрузки сети. Если условие (8) не выполняется, то никаких действий не требуется, СЭС перейдет в частично работоспособное состояние без аварийной ситуации и, следовательно, условие (6) будет выполнено.

Обсуждение (Discussion)

По мере развития высокоинтегрированных систем управления технологическими процессами судна будет возрастать достоверность результатов, получаемых ОИ ТС СЭС. В этой связи представляет большой интерес использование информации, передаваемой от средств судовождения и других технологических систем, определяющих режим функционирования СЭС. Данное обстоятельство позволит более эффективно использовать СПУ в нештатных ситуациях работы электроэнергетической системы судна, особенно на судах технического флота, плавучих буровых платформах и кораблях Военно-морского флота.

Практическая реализация изложенных подходов позволит существенно повысить живучесть судна, обеспечить бесперебойное электроснабжение ответственных устройств первой категории в аварийных ситуациях, сократить необходимость применения аппаратного резервирования элементов СЭС. При этом предполагается получение серьезного кумулятивного эффекта в плане

экономии горюче-смазочных материалов, увеличения межремонтного обслуживания первичных двигателей ГА, а также сокращения капитальных затрат при строительстве флота.

Выводы (Summary)

В результате проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Применяемые на современных судах средства технического диагностирования предназначены только для осуществления эффективного ТО и ремонта энергетического оборудования и практически не приспособлены для предоставления оперативной информации о техническом состоянии СЭС, пригодной для обеспечения предупредительного управления в нештатных режимах работы.

2. Средства оперативной идентификации ТС СЭС должны не только выявлять неработоспособное состояние элементов системы, но и прогнозировать режим ее функционирования после отключения неработоспособного ГА, а также предоставлять информацию СПУ о необходимой корректировке внешних условий для обеспечения безаварийного перехода электроэнергетической системы в частично работоспособное состояние.

3. Предложенный алгоритм оперативной идентификации технического состояния позволяет обеспечить предупредительное управление СЭС в случае отказа ее элементов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Saushev A. V.* System approach to ensure performance of marine and coastal electrical systems during operation / A. V. Saushev, S. E. Kuznetsov, A. B. Karakayev // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. — IOP Publishing, 2018. — Vol. 194. — Is. 8. — Pp. 082037. DOI: 10.1088/1755-1315/194/8/082037.

2. *Саушев А. В.* Анализ методов диагностики аппаратов высокого напряжения / А. В. Саушев, Д. А. Шерстнев, Н. В. Широков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 5. — С. 1073–1085. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-5-1073-1085.

3. *Kolodenkova A.* Integrated approach to processing diagnostic data based on heterogeneous cognitive models / A. Kolodenkova, S. Vereshchagina, V. Vereshchagin // 2020 Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies (MWENT). — IEEE, 2020. — Pp. 1–5. DOI: 10.1109/MWENT47943.2020.9067433.

4. *Wu Y.* Incipient winding fault detection and diagnosis for squirrel-cage induction motors equipped on CRH trains / Y. Wu, B. Jiang, Y. Wang // ISA transactions. — 2020. — Vol. 99. — Pp. 488–495. DOI: 10.1016/j.isatra.2019.09.020.

5. *Lazakis I.* Increasing ship operational reliability through the implementation of a holistic maintenance management strategy / I. Lazakis, O. Turan, S. Aksu // Ships and Offshore Structures. — 2010. — Vol. 5. — Is. 4. — Pp. 337–357. DOI: 10.1080/17445302.2010.480899.

6. *Yang Y.* Fault and safety protection of ship power station / Y. Yang, Z. Jin // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. — IOP Publishing, 2020. — Vol. 446. — Is. 4. — Pp. 042056. DOI: 10.1088/1755-1315/446/4/042056.

7. *Ивлев М. Л.* Технология применения виртуальных приборов для комплексной диагностики судового электрооборудования / М. Л. Ивлев, И. В. Кузнецов, Д. Н. Семёнов, А. В. Чирцов // Вестник МГТУ. Труды Мурманского государственного технического университета. — 2017. — Т. 20. — № 4. — С. 723–728. DOI: 10.21443/1560-9278-2017-20-4-723-728.

8. *Ignatenko A. V.* Electric-Energy Systems of Dynamic-Positioning Drilling Vessels / A. V. Ignatenko, S. E. Kuznetsov // Russian Electrical Engineering. — 2018. — Vol. 89. — Is. 2. — Pp. 85–92. DOI: 10.3103/S1068371218020074.

9. *Saushev A.* Preventive protection of marine electrical power system from the transition of generating sets to motoring mode / A. Saushev, N. Shirokov // E3S Web of Conferences. — EDP Sciences, 2021. — Vol. 244. — Pp. 08007. DOI: 10.1051/e3sconf/202124408007.

10. *Саушев А. В.* Основы управления состоянием электротехнических систем объектов водного транспорта: моногр. / А. В. Саушев. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2015. — 215 с.

11. *Саушев А. В.* Диагностирование состояния электротехнических систем в пространстве параметров их элементов / А. В. Саушев, Н. В. Широков // Вестник государственного университета морского

и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2016. — № 2 (36). — С. 143–156. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-2-143-156.

12. Широков Н. В. Метод исключения омонимичных областей в предупредительном управлении электротехнической системой / Н. В. Широков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 2. — С. 390–401. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-2-390-401.

13. Широков Н. В. Предупредительное управление судовой электроэнергетической системой при отказе источников электроэнергии / Н. В. Широков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 2. — С. 396–405. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-2-396-405.

14. Широков Н. В. Превентивная защита судовой электроэнергетической системы с параллельно работающими генераторными агрегатами / Н. В. Широков // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2021. — № 62–63. — С. 121–130.15.

15. Захаров Н. А. Место и роль оператора в эргатической системе / Н. А. Захаров // Автоматизация в промышленности. — 2020. — № 1. — С. 20–23. DOI: 10.25728/avtprom.2020.01.03.

16. Tyrva V. O. Anthropomorphic Control over Electromechanical System Motion: Simulation and Implementation / V. O. Tyrva, A. V. Saushev, O. V. Shergina // 2020 International Russian Automation Conference (Rus-AutoCon). — IEEE, 2020. — Pp. 374–379. DOI: 10.1109/RusAutoCon49822.2020.9208070.

17. Benderius O. The Best Rated Human-Machine Interface Design for Autonomous Vehicles in the 2016 Grand Cooperative Driving Challenge / O. Benderius, C. Berger, V. M. Lundgren // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. — 2017. — Vol. 19. — Is. 4. — Pp. 1302–1307. DOI: 10.1109/TITS.2017.2749970.

18. Alizadeh D. Vessel trajectory prediction using historical automatic identification system data / D. Alizadeh, A. A. Alesheikh, M. Sharif // Journal of Navigation. — 2021. — Vol. 74. — Is. 1. — Pp. 156–174. DOI: 10.1017/S0373463320000442.

19. Wang T. Autonomous decision-making scheme for multi-ship collision avoidance with iterative observation and inference / T. Wang, Q. Wu, J. Zhang, B. Wu, Y. Wang // Ocean Engineering. — 2020. — Vol. 197. — Pp. 106873. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2019.106873.

20. Tu E. Exploiting AIS Data for Intelligent Maritime Navigation: A Comprehensive Survey From Data to Methodology / E. Tu, G. Zhang, L. Rachmawati, E. Rajabally, G. B. Huang // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. — 2017. — Vol. 19. — Is. 5. — Pp. 1559–1582. DOI: 10.1109/TITS.2017.2724551.

21. Епихин А. И. Модуль диагностики двигателя внутреннего сгорания в системе поддержки принятия решений экипажем танкера-газовоза / А. И. Епихин // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2017. — № 4. — С. 31–39. DOI: 10.24143/2073-1574-2017-4-31-39.

22. Полковникова Н. А. Алгоритмы системы поддержки принятия решений для идентификации неисправностей главного судового двигателя / Н. А. Полковникова, А. К. Полковников // Эксплуатация морского транспорта. — 2019. — № 1 (90). — С. 110–128. DOI: 10.34046/aumsuomt90-17.

23. Григорьев А. В. Разработка научно-образовательного лабораторно-тренажерного комплекса судовых систем электродвижения и гребных электрических установок нового поколения / А. В. Григорьев, Р. Р. Зайнуллин, С. М. Малышев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2016. — № 4 (38). — С. 203–210. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-84-203-210.

24. Magid S. I. Topical issues of simulation construction development in modern electric power engineering / S. I. Magid, E. N. Arkhipova, I. S. Zagretidinov // Thermal Engineering. — 2015. — Vol. 62. — Is. 14. — Pp. 1017–1027. DOI: 10.1134/S0040601515140086.

25. Никоноров А. Н. Разработка учебно-исследовательской АСУТП энергоблока с парогазовой установкой / А. Н. Никоноров, И. К. Муравьев, Е. Д. Маршалов, Т. Е. Муравьева // Автоматизация в промышленности. — 2021. — № 2. — С. 38–43. DOI: 10.25728/avtprom.2021.02.07.

26. Navas de Maya B. Application of card-sorting approach to classify human factors of past maritime accidents / B. Navas de Maya, H. Khalid, R. E. Kurt // Maritime Policy & Management. — 2021. — Vol. 48. — Is. 1. — Pp. 75–90. DOI: 10.1080/03088839.2020.1754481.

27. Белов О. В. Методология анализа и контроля безопасности судна как сложной организационно-технической системы / О. В. Белов // Вестник Камчатского государственного технического университета. — 2015. — № 34. — С. 12–18. DOI: 10.17217/2079-0333-2015-34-12-18.

28. Coraddu A. Determining the most influential human factors in maritime accidents: A data-driven approach / A. Coraddu, L. Oneto, B. N. de Maya, R. Kurt // *Ocean Engineering*. — 2020. — Vol. 211. — Pp. 107588. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2020.107588.
29. Ivanova M. Analysis of Power Outages and Human errors in the Operation of Equipment in Power Grids / M. Ivanova, R. Dimitrova, A. Filipov // 2020 12th Electrical Engineering Faculty Conference (Bulef). — IEEE, 2020. — Pp. 1–5. DOI: 10.1109/Bulef51036.2020.9326058.
30. Kondrateva O. E. Analysis of the Applicability of Key Risk Assessment Methods for Solving Problems of Reducing Accidents at Energy Facilities / O. E. Kondrateva, M. K. Romashov, O. A. Loktionov // 2021 3rd International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE). — IEEE, 2021. — Pp. 1–5. DOI: 10.1109/REEPE51337.2021.9388031.
31. Bao Y. Impact analysis of human factors on power system operation reliability / Y. Bao, C. Guo, J. Zhang, J. Wu, S. Pang, Z. Zhang // *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*. — 2018. — Vol. 6. — Is. 1. — Pp. 27–39. DOI: 10.1007/s40565-016-0231-6.
32. Saushev A. Rapid identification of the technical condition of a marine electric power system / A. Saushev, N. Shirokov A. Butsanets // *Journal of Physics: Conference Series*. — IOP Publishing, 2021. — Vol. 2061. — Is. 1. — Pp. 012032. DOI: 10.1088/1742-6596/2061/1/012032.
33. Saushev A. Preventive Protection of Ship's Electric Power System from Reverse Power / A. Saushev, N. Shirokov, S. Kuznetsov // *International Scientific Conference Energy Management of Municipal Facilities and Sustainable Energy Technologies EMMFT 2019*. EMMFT 2019. Advances in Intelligent Systems and Computing. — Springer, Cham, 2021. — Vol. 1258. DOI: 10.1007/978-3-030-57450-5_33.

REFERENCES

1. Saushev, Aleksandr V., Sergey E. Kuznetsov, and Aleksandr B. Karakayev. "System approach to ensure performance of marine and coastal electrical systems during operation." *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. Vol. 194. No. 8. IOP Publishing, 2018. DOI: 10.1088/1755-1315/194/8/082037.
2. Saushev, Alexander V., Denis A. Sherstnev, and Nikolaj V. Shirokov. "Analysis of methods of diagnostics of high voltage apparatus." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 9.5 (2017): 1073–1085. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-5-1073-1085.
3. Kolodenkova, Anna, Svetlana Vereshchagina, and Vladislav Vereshchagin. "Integrated approach to processing diagnostic data based on heterogeneous cognitive models." *2020 Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies (MWENT)*. IEEE, 2020. DOI: 10.1109/MWENT47943.2020.9067433.
4. Wu, Yunkai, Bin Jiang, and Yulong Wang. "Incipient winding fault detection and diagnosis for squirrel-cage induction motors equipped on CRH trains." *ISA transactions* 99 (2020): 488–495. DOI: 10.1016/j.isatra.2019.09.020.
5. Lazakis, Iraklis, Osman Turan, and Seref Aksu. "Increasing ship operational reliability through the implementation of a holistic maintenance management strategy." *Ships and Offshore Structures* 5.4 (2010): 337–357. DOI: 10.1080/17445302.2010.480899.
6. Yang, Yuxin, and Zhemin Jin. "Fault and safety protection of ship power station." *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. Vol. 446. No. 4. IOP Publishing, 2020. DOI: 10.1088/1755-1315/446/4/042056.
7. Ivlev, M. L., I. V. Kuznetsov, D. N. Semyonov, and A. V. Chirtsov. "Use of the virtual instrument technology in complex diagnostics of marine electrical equipment." *MSTU Vestnik* 20.4 (2017): 723–728. DOI: 10.21443/1560-9278-2017-20-4-723-728.
8. Ignatenko, A. V., and S. E. Kuznetsov. "Electric-Energy Systems of Dynamic-Positioning Drilling Vessels." *Russian Electrical Engineering* 89.2 (2018): 85–92. DOI: 10.3103/S1068371218020074.
9. Saushev, Alecsandr, and Nikolai Shirokov. "Preventive protection of marine electrical power system from the transition of generating sets to motoring mode." *E3S Web of Conferences*. Vol. 244. EDP Sciences, 2021. DOI: 10.1051/e3sconf/202124408007.
10. Saushev, A. V. *Osnovy upravleniya sostoyaniem elektrotekhnicheskikh sistem ob'ektov vodnogo transporta: monografiya*. SPb.: GUMRF imeni admirala S. O. Makarova, 2015.
11. Saushev, Aleksandr Vasil'evich, and Nikolaj Viktorovich Shirokov. "Diagnosing of the condition of electrotechnical systems in space of parameters of their elements." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 2 (36) (2016): 143–156. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-2-143-156.

12. Shirokov, Nikolaj V. "Method for eliminating homonymous areas in warning control of the electrical system." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.2 (2020): 390–401. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-2-390-401.
13. Shirokov, Nikolaj V. "Warning control of ship's electric power system in case of the power sources failure." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.2 (2019): 396–405. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-2-396-405.
14. Shirokov, N. V. "Preventive protection of the ship's electric power system with parallel generators sets." *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping* 62–63 (2021): 121–130.
15. Zacharov, N. A. "Mesto i rol operatora v ergaticheskoi sisteme." *Automation in industry* 1 (2020): 20–23. DOI: 10.25728/avtprom.2020.01.03.
16. Tyrva, Vladimir O., Aleksandr V. Saushev, and Olga V. Shergina. "Anthropomorphic Control over Electromechanical System Motion: Simulation and Implementation." *2020 International Russian Automation Conference (RusAutoCon)*. IEEE, 2020. 374–379. DOI: 10.1109/RusAutoCon49822.2020.9208070.
17. Benderius, Ola, Christian Berger, and Victor Malmsten Lundgren. "The best rated human–machine interface design for autonomous vehicles in the 2016 grand cooperative driving challenge." *IEEE Transactions on intelligent transportation systems* 19.4 (2017): 1302–1307. DOI: 10.1109/TITS.2017.2749970.
18. Alizadeh, Danial, Ali Asghar Alesheikh, and Mohammad Sharif. "Vessel trajectory prediction using historical automatic identification system data." *The Journal of Navigation* 74.1 (2021): 156–174. DOI: 10.1017/S0373463320000442.
19. Wang, Tengfei, Qing Wu, Jinfen Zhang, Bing Wu, and Yang Wang. "Autonomous decision-making scheme for multi-ship collision avoidance with iterative observation and inference." *Ocean Engineering* 197 (2020): 106873. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2019.106873.
20. Tu, Enmei, Guanghao Zhang, Lily Rachmawati, Eshan Rajabally, and Guang-Bin Huang. "Exploiting AIS data for intelligent maritime navigation: A comprehensive survey from data to methodology." *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* 19.5 (2017): 1559–1582. DOI: 10.1109/TITS.2017.2724551.
21. Epikhin, Alexey Ivanovich. "Module for diagnosis of the internal combustion engine in the decision support system by the crew of the tanker-gas carrier." *Vestnik of Astrakhan state technical university. Series: marine engineering and technologies* 4 (2017): 31–39. DOI: 10.24143/2073-1574-2017-4-31-39.
22. Polkovnikova, N. A., and A. K. Polkovnikov. "Decision support system algorithms for main marine diesel engine failure identification." *Ekspluatatsiya morskogo transporta* 1(90) (2019): 110–128.
23. Grigoryev, Andrey Vladimirovich, Ruslan Rinatovich Zaynullin, and Sergey Mihaylovich Malyshev. "Designing of scientific-educational laboratory-training complex of ship electric propulsion systems and electric propulsion plants of new generation." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 4(38) (2016): 203–210. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-4-203-210.
24. Magid, S. I., E. N. Arkhipova, and I. Sh Zagretidinov. "Topical issues of simulation construction development in Modern Electric Power Engineering." *Thermal Engineering* 62.14 (2015): 1017–1027. DOI: 10.1134/S0040601515140086.
25. Nikonorov, A. N., I. K. Muravyov, E. D. Marshalov, and T. E. Muravyova. "Razrabotka uchebnoissledovatel'skoj ASUTP energobloka s parogazovoj ustanovkoj." *Automation in industry* 2 (2021): 38–43. DOI: 10.25728/avtprom.2021.02.07.
26. Navas de Maya, Beatriz, Hassan Khalid, and Rafet Emek Kurt. "Application of card-sorting approach to classify human factors of past maritime accidents." *Maritime Policy & Management* 48.1 (2021): 75–90. DOI: 10.1080/03088839.2020.1754481.
27. Belov, O. A. "The methodology of analysis and monitoring of ship safety as difficult technical-organizational system." *Bulletin of Kamchatka State Technical University* 34 (2015): 12–18. DOI: 10.17217/2079-0333-2015-34-12-18.
28. Coraddu, Andrea, Luca Oneto, Beatriz Navas de Maya, and Rafet Kurt. "Determining the most influential human factors in maritime accidents: A data-driven approach." *Ocean Engineering* 211 (2020): 107588. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2020.107588.
29. Ivanova, Milena, Rositsa Dimitrova, and Anton Filipov. "Analysis of Power Outages and Human errors in the Operation of Equipment in Power Grids." *2020 12th Electrical Engineering Faculty Conference (BulEF)*. IEEE, 2020. DOI: 10.1109/BulEF51036.2020.932605.
30. Kondrateva, Olga E., Mikhail K. Romashov, and Oleg A. Loktionov. "Analysis of the Applicability of Key Risk Assessment Methods for Solving Problems of Reducing Accidents at Energy Facilities." *2021 3rd International*

Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE). IEEE, 2021. DOI: 10.1109/REEPE51337.2021.9388031.

31. Bao, Yingkai, Chuangxin Guo, Jinjiang Zhang, Jiaxin Wu, Suhong Pang, and Zhiping Zhang. "Impact analysis of human factors on power system operation reliability." *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy* 6.1 (2018): 27–39. DOI: 10.1007/s40565-016-0231-6.

32. Saushev, A., N. Shirokov, and A. Butsanets. "Rapid identification of the technical condition of a marine electric power system." *Journal of Physics: Conference Series*. Vol. 2061. No. 1. IOP Publishing, 2021. DOI: 10.1088/1742-6596/2061/1/012032.

33. Saushev, Aleksandr, Nikolai Shirokov, and Sergey Kuznetsov. "Preventive Protection of Ship's Electric Power System from Reverse Power." *International Scientific Conference Energy Management of Municipal Facilities and Sustainable Energy Technologies EMMFT 2019*. EMMFT 2019. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. Vol 1258. Springer, Cham, 2021. DOI: 10.1007/978-3-030-57450-5_33.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Саушев Александр Васильевич —
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: saushev@bk.ru, saushevAV@gumrf.ru
Широков Николай Викторович —
кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: shirokovn@inbox.ru,
kaf_electroprivod@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Saushev, Alexander 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: saushev@bk.ru, saushevAV@gumrf.ru
Shirokov, Nikolaj V. —
PhD, associate professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: shirokovn@inbox.ru,
kaf_electroprivod@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 22 марта 2022 г.
Received: March 22, 2022.