

WARNING CONTROL OF SHIP'S ELECTRIC POWER SYSTEM IN CASE OF THE POWER SOURCES FAILURE

N. V. Shirokov

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

The methods aimed at solving the problem of accident-free operation of ship's electric power systems are developed in the paper. It has been shown that the modern control means do not solve this problem in most cases, associated with the failure of electric power sources. For these purposes, the methods and algorithms that provide warning control of the system, based on the prediction of the current situation development in the ship's power supply, its technical condition, as well as the technical condition of generator sets are proposed in the paper. It has been shown that in this case, it is advisable to use additional restrictions on the vectors of input parameters at describing the area of system working capacity. A control method based on the segmentation of the system working capacity area is proposed in the paper, the definition of a truncated (internal) area of its proper functioning is given. The warning control is considered as a process of forming an impact on the ship's power system, as a result of which, after the protection has been activated, its technical condition will belong to the truncated area of proper functioning. The variants of generator sets failures associated with the output beyond the maximum permissible values of the internal parameters are considered, the features of the proposed method application for each of the cases are revealed. It has been shown that the development of the warning control systems is constrained by an insufficient level of methods development and limited use of the technical diagnostics means for the ship's electric power systems. In this regard, a control method based on using the indirect signs of the inoperable system state is proposed. It is offered to launch the emergency diesel generator not only at the moment of the vessel blackout, but also proactively, upon the occurrence of events directly threatening to develop into an emergency. The assumption on the feasibility of the proposed approaches application at creating the self-adjusting and self-organizing integrated systems of ship control is made in the paper. The algorithms for the practical implementation of the method of warning control of the ship's electric power system during the transition to the inoperable state of individual generator units are presented.

Keywords: electric power system, emergency, warning control, prediction of the current situation, segmentation of working capacity area.

For citation:

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.

УДК 621.316:658.58

ПРЕДУПРЕДИТЕЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ СУДОВОЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМОЙ ПРИ ОТКАЗЕ ИСТОЧНИКОВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Н. В. Широков

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

Статья посвящена разработке методов, направленных на решение задачи безаварийной эксплуатации судовых электроэнергетических систем. Показано, что современные средства управления не решают эту проблему в большинстве случаев, связанных с отказами источников электроэнергии. Для этих целей предложены способы и алгоритмы, обеспечивающие предупредительное управление системой, исходя из прогнозирования развития текущей ситуации в электроснабжении судна, ее технического состояния, а также и технического состояния генераторных агрегатов. Показано, что в этом случае, при описании области работоспособности системы, целесообразно использовать дополнительные ограничения

по вектору входных параметров. В статье предложен метод управления, основанный на сегментации области работоспособности системы, дано определение усеченной (внутренней) области ее правильного функционирования. Рассматривается предупредительное управление как процесс формирования воздействия на судовую электроэнергетическую систему, в результате которого, после срабатывания защиты, ее техническое состояние будет принадлежать усеченной области правильного функционирования. Рассмотрены варианты отказов генераторных агрегатов, связанные с выходом за предельно допустимые величины значений внутренних параметров, раскрыты особенности применения предложенного подхода для каждого из случаев. Показано, что развитие систем предупредительного управления сдерживается недостаточным уровнем разработки методов и ограниченным использованием средств технического диагностирования судовых электроэнергетических систем. В этой связи предложен способ управления, основанный на использовании косвенных признаков неработоспособного состояния системы. Предложено осуществлять запуск аварийного дизель-генератора не только в момент обесточивания, но и превентивно, при наступлении событий, непосредственно угрожающих перерастанием в аварийную ситуацию. В работе сделано предположение о целесообразности применения рассмотренных подходов при создании самонастраивающихся и самоорганизующихся комплексных систем управления судном. Приведены алгоритмы практической реализации метода предупредительного управления судовой электроэнергетической системой при переходе в неработоспособное состояние отдельных генераторных агрегатов.

Ключевые слова: электроэнергетическая система, аварийная ситуация, предупредительное управление, прогнозирование текущей ситуации, сегментация области работоспособности.

Для цитирования:

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.

Введение (Introduction)

Средства управления (СУ) судовых электроэнергетических систем (СЭЭС) решают ответственные задачи по обеспечению генерации электроэнергии в функции нагрузки бортовой сети. Причем при эксплуатации в нормальных условиях для судов с классом автоматизации Российского морского регистра судоходства не ниже AUT3, операции, связанные с запуском и остановкой резервного генераторного агрегата (ГА), его синхронизацией с сетью, включением на параллельную работу, распределением нагрузок и поддержанием частоты сети полностью автоматизированы. Качественное обеспечение этих процессов зависит от технического состояния СЭЭС, которое в процессе функционирования отображается векторами контролируемых параметров [1], к которым относятся:

$\bar{U} = (u_1, \dots, u_c, \dots, u_e)$ — вектор входных параметров, задающий смену режимов работы, в данном случае формирует управляющее воздействие на систему. Этот вектор, определяемый параметрами нагрузки СЭЭС, может быть представлен как $\bar{P} = (p_1, \dots, p_j, \dots, p_e)$, где p_j — величина нагрузки, создаваемая при работе j -го потребителя электроэнергии в данный момент времени;

$\bar{V} = (v_1, \dots, v_g, \dots, v_f)$ — вектор внешних воздействий, характеризующий свойства окружающей среды (например, температуру, атмосферное давление и влажность), а также вибрацию и радиацию;

$\bar{X} = (x_1, \dots, x_k, \dots, x_n)$ — вектор параметров, определяющий техническое состояние элементов СЭЭС. К этим параметрам для рассматриваемой задачи можно отнести такую переменную состояния, как мощность, генерируемая соответствующим ГА в данный момент времени.

$\bar{Z}^v = (Z_1^v, \dots, Z_r^v, \dots, Z_p^v)$ — вектор, характеризующий переменные состояния на выходах элементов функциональных блоков СЭЭС: напряжение возбуждения генератора, давление смазочного масла и температуру охлаждающей жидкости дизеля.

Векторы параметров $\bar{X}$ и фазовых переменных $\bar{Z}$ совместно образуют множество внутренних параметров СЭЭС;

$\bar{Y} = (y_1, \dots, y_i, \dots, y_m)$ — вектор выходных параметров, характеризующий потребительские свойства системы, представляющие собой следующие показатели качества ее функционирования: величина генерируемого напряжения, мощность, частота напряжения, динамическая устойчивость и диапазон допустимых изменений этих параметров.

В процессе эксплуатации параметры СЭЭС постоянно меняются, и ее техническое состояние может принимать различные значения, важнейшим из которых является работоспособность системы. В соответствии с ГОСТ 27.002–2015, под работоспособным будем понимать такое состояние СЭЭС, при котором значения всех параметров, определяющих ее способность выполнять заданные функции, соответствуют всем требованиям, установленным в документации. При этом в указанном документе определены номинальные величины и представлены пределы отклонения контролируемых параметров для системы, находящейся в работоспособном состоянии. Если какой-либо из контролируемых параметров отклонился от заданного значения за допустимые пределы, то возникают нештатные ситуации, которые могут привести к потере работоспособности СЭЭС и к аварийной ситуации на судне. Для работы СУ в нештатных режимах дополнениями от 01.05.1997 г. к ГОСТу 19176–85 определены следующие виды управления: прогностическое, предупредительное, противоаварийное и аварийное. Так как основным приводным двигателем ГА на большинстве современных судов является дизель, для примера охарактеризуем каждый вид управления применительно к СЭЭС, оснащенной дизель-генераторными агрегатами (ДГ).

Аварийным называют управление техническими средствами корабля или судна во время аварии, т. е. относительно СЭЭС, во время исчезновения напряжения на шинах ГРЩ. При этом система не выполняет возложенных на нее функций: электроэнергия не генерируется, происходит нарушение допустимых пределов выходных параметров $\bar{Y}$, СЭЭС неработоспособна. Согласно общепринятому алгоритму, в это время запускается аварийный ДГ и один или сразу все резервные ГА, готовые к пуску.

Противоаварийным называют такое управление, при котором внутренние или выходные параметры системы достигли своих предельных величин. В этом случае действия СУ направлены на то, чтобы прекратить дальнейшее развитие аварийной ситуации и по возможности уменьшить последствия аварии, предотвратить более серьезные отказы техники, судна в целом, гибель членов экипажа. Этот вид управления часто называют *защитой*. Он характеризуется выходом параметров ГА за предельно допустимые или критические значения аварийно-предупредительной сигнализации (АПС). Примером таких событий может служить снижение ниже допустимого значения давления смазочного масла дизеля или перегрузка агрегата. В первом случае отключают неработоспособный ГА, во втором — малоответственные потребители электроэнергии (МОП), а если этого не достаточно, то и сам ГА.

Предупредительным называют управление, осуществляемое по предупредительным сигналам отклонения параметров от их номинального значения. В этом случае ТС СЭЭС опасно приблизилось к неработоспособному состоянию или система уже неработоспособна, но имеется возможность таким образом воздействовать на ее параметры, чтобы исключить возникновение аварийной ситуации. На современных судах практически единственным способом предупредительного управления СЭЭС является запуск резервного ГА при превышении нагрузки на работающие агрегаты, например, свыше 80 % от их номинального значения или в случае отклонения их первичных параметров за пределы допусков, называемых *некритическими значениями АПС*.

Прогностическое управление предполагает при принятии решений использование результатов прогнозирования развития процессов, протекающих в СЭЭС, осуществляемого по результатам диагностирования ее элементов. В современных СУ таким примером может служить запуск ГА при обесточивании сети, при котором на агрегаты, отключенные защитой от короткого замыкания, сигнал на запуск не подается.

Функциональный анализ способов управления СЭЭС судов и кораблей отечественной и зарубежной постройки, выполненный с начала 1970-х гг. до настоящего времени, показал следующее:

1. Противоаварийное управление СЭЭС в большинстве случаев не способно предупредить аварийную ситуацию на судне, а может только облегчить ее последствия. Серьезным недостатком существующего способа управления является то, что отключение МОП и самих ГА происходит после того, как перегрузка уже наступила, а также без учета режима работы самой СЭЭС в целом. При этом защита Майера практически не учитывает возможность ее эффективного применения

в случае отключения хотя бы одного из работающих ГА от сети. Это объясняется тем, что нагрузка отключаемых МОП обычно составляет около 10 % от номинальной мощности одного ГА, а в случае аварийного отключения одного из двух параллельно работающих ГА нагрузка на работоспособный агрегат увеличивается практически вдвое, что в большинстве случаев приводит к остановке первичного двигателя, обесточиванию судна и потере его управляемости. К столь же негативным результатам приводит, например, отказ топливной системы одного из ГА и переход его в двигательный режим. В этом случае не только нагрузка полностью переходит на работающий источник электроэнергии, но его еще нагружает и обратная мощность, потребляемая неработоспособным ГА в течение времени задержки на отключение, что в большинстве случаев также приводит к возникновению аварийной ситуации на судне.

2. Запуск резервного ГА требует определенного времени на реализацию ($T_{\text{зап}}$), в течение которого процесс изменения контролируемого параметра от уровня некритической АПС до его предельно допустимого значения не прекращается ($T_{\text{кр}}$), и если окажется, что выполняется условие $T_{\text{кр}} < T_{\text{зап}}$, то наступит аварийная ситуация, которая часто сопровождается обесточиванием судна.

3. Набор параметров, при которых формируется сигнал запуска резервного агрегата, крайне ограничен и не менялся в течение нескольких десятилетий.

4. Запуск аварийного дизель генератора (АДГ) производится только после обесточивания судна, что никак не способствует предупреждению развития аварийной ситуации.

5. Недостаточное развитие методов и средств технического диагностирования СЭЭС не позволяет эффективно разрабатывать методы прогностического и предупредительного управления, и только их широкое применение может позволить избежать ситуаций, при которых происходит обесточивание судна при отказе одного или нескольких работающих ГА.

В этой связи направление исследований, нацеленных на создание СУ СЭЭС, обеспечивающих бесперебойное снабжение бортовой сети электроэнергией требуемого качества даже в условиях отказа нескольких источников электроэнергии, приобретает особую актуальность. Для решения поставленной задачи целесообразно выполнить следующее:

– разработать методы и средства управления техническим состоянием СЭЭС в процессе функционирования;

– разработать методы и технические средства для осуществления предупредительного управления СЭЭС исходя из результатов прогнозирования развития текущей ситуации в электроснабжении судна, технического состояния как самой системы в целом, так и ее функциональных блоков;

– в случае отказа хотя бы одного из работающих ГА необходимо формировать управляющее воздействие на структурную или параметрическую адаптацию СЭЭС к данному событию с целью предотвращения аварийной ситуации на судне.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Ввиду большой сложности СЭЭС как объекта диагностирования и отсутствия статистических данных об отказах, применение вероятностных подходов к решению задач управления сопряжено с низкой достоверностью получаемых результатов и нецелесообразно для использования [2]. В этом случае весьма перспективным является воспользоваться информацией об условиях работоспособности СЭЭС, которые могут быть заданы в виде следующей системы неравенств:

$$\begin{cases} \bar{Y}_{i \min} \leq \bar{Y}_i = F_i(\bar{X}) \leq \bar{Y}_{i \max}, & i = \overline{1, m}; \\ \bar{Z}_{r \min}^v \leq \bar{Z}_r^v = F_r^v(\bar{X}) \leq \bar{Z}_{r \max}^v, & r = \overline{1, p}; \\ \bar{X}_{k \min} \leq \bar{X}_k = F_k(\bar{X}) \leq \bar{X}_{k \max}, & k = \overline{1, n}; \\ \bar{U}_{c \min} \leq \bar{U}_c = F_c(\bar{X}) \leq \bar{U}_{c \max}, & c = \overline{1, e}; \end{cases} \quad (1)$$

где $\bar{Y}_{i \min}$, $\bar{Y}_{i \max}$, $\bar{Z}_{r \min}$, $\bar{Z}_{r \max}$, $\bar{X}_{k \min}$, $\bar{X}_{k \max}$, $\bar{U}_{c \min}$, $\bar{U}_{c \max}$ — минимально и максимально допустимые значения соответствующих параметров в данный момент времени; $F_i(\bar{X})$, $F_r^v(\bar{X})$, $F_k(\bar{X})$ — операторы связи внутренних параметров $\{\bar{X}\}$ СЭЭС с ее выходными $\{\bar{Y}\}$, внутренними $\{\bar{Z}\}$ и входными $\{\bar{U}\}$ параметрами.

В источнике [1] рассмотрены условия работоспособности объекта, состоящие из трех неравенств. Это объясняется тем, что они были предложены, в первую очередь, для решения задач параметрического синтеза. В этом случае сразу предполагалось, что на систему подаются только допустимые внешние сигналы и считают, что она будет работать в заданных условиях окружающей среды [3]. Для решения задачи управления ТС СЭЭС в реальном режиме времени считаем целесообразным представление условий ее работоспособности в виде системы из четырех неравенств. Поясним сказанное на примере. Допустим, что на судне параллельно работают два ГА, и предположим, что все условия (1) выполняются, СЭЭС находится в работоспособном состоянии. Если в это время произойдет скачек нагрузки, она резко увеличится и превысит, например, 150 % от номинальной величины, то оба дизеля остановятся, произойдет обесточивание судна, хотя на момент подачи недопустимого управляющего сигнала три первых неравенства системы (1) выполнялись.

Как показано в источнике [1], первое неравенство системы (1) задает допусковую область $D_y = \bigcap_{i=1}^m D_i$ и соответствует внешнему условию работоспособности. В пространстве параметров $\{\bar{X}\}$ она может быть описана как отображение $\Phi_{yx} : D_y \rightarrow M_y, M_y = \bigcap_{i=1}^m M_i$.

Второе неравенство в системе неравенств (1) задает допусковую область $D_z = \bigcap_{r=1}^p D_r$ и соответствует внутреннему условию работоспособности. В пространстве параметров $\{\bar{X}\}$ она может быть определена в виде отображения $\Phi_{zx} : D_z \rightarrow M_z$, причем $M_z = \bigcap_{r=1}^p M_r$.

В соответствии с Правилами РМРС, мощности, вырабатываемые каждым из ГА при параллельной работе, не должны отличаться более чем на 15 % от номинальной мощности наибольшего из работающих ГА, т. е. на внутренние параметры накладывается ограничение: $|x_k - x_g| \leq 0,15x_{\text{ном}}$. Это неравенство задает допусковую область P_x . Множество внутренних параметров, образованное пересечением области P_x и области D_x , которая, как показано в источнике [1], в евклидовом пространстве имеет форму бруса, определяет допусковую область B_x , задающую ограничения на параметры $\{\bar{X}\}$ в системе неравенств (1).

В выражении (1) четвертое неравенство определяет допусковую область $D_u = \bigcap_{c=1}^e D_c$ пространства управляющих воздействий. Допусковая область имеет вид e -мерного многогранника евклидова пространства R^e . При этом с каждым ограничением $D_c = D_{c \min} \bigcap D_{c \max}$, определяемым четвертым неравенством при $c = \overline{1, e}$ в n -мерном евклидовом пространстве R^n параметров $\{\bar{X}\}$, соотносится область M_c . Это соответствие можно записать в виде отображения $\Phi_{ux} : D_u \rightarrow M_u$. При этом $M_u = \bigcap_{c=1}^e M_c$.

Физический смысл четвертого неравенства состоит в том, что СЭЭС может выполнять свои функции только при том условии, что область M_u принадлежит области M_y . При этом мощность, генерируемая системой в установившемся режиме, будет равна нагрузке, т. е. можно записать в виде $M_u \subseteq M_y \Rightarrow \bar{Y} = \bar{U}$.

Множество H , определяемое как пересечение областей B_x, M_y, M_z, M_u , образует область работоспособности СЭЭС:

$$H = B_x \bigcap M_y \bigcap M_z \bigcap M_u. \quad (2)$$

Это более узкое, чем в источниках [1], [3], представление области работоспособности, которое характеризует нахождение системы в работоспособном и рабочем состоянии одновременно, что особенно важно для решения задач предупредительного управления СЭЭС.

Учитывая определения работоспособного состояния системы и состояния ее правильного функционирования в соответствии с ГОСТом 27.002–89, область работоспособности можно представить как пересечение областей правильного функционирования системы $H = \bigcap_{j=1}^q w_j$ где w_j — об-

ласть правильного функционирования СЭЭС; q — количество областей правильного функционирования. Для описания области работоспособности разработаны подходы, подробно описанные в научной литературе. К ним относятся: метод последовательного перебора граничных точек [1], [4], метод матричного поиска [5], [6], метод сужающихся областей [7], метод отсекающих моделей [8]. Эти методы напрямую или с некоторой модернизацией можно использовать и для построения областей w_j . Представим процесс работы СЭЭС как совокупность всех возможных режимов производства электроэнергии, определяемых, например, количеством и составом работающих ГА, и каждому режиму поставим в соответствие область w_j . Тогда количество областей правильного функционирования, образующих область работоспособности, окажется конечным. Так, для СЭЭС с тремя ГА число $q = 7$. В этом случае можно говорить о разбиении области H на несколько сегментов, каждому из которых будет соответствовать своя область w_j . Процесс разбиения области H на отдельные сегменты, имеющие однородные признаки, соответствующие, например, состоянию правильного функционирования системы, назовем *сегментацией области работоспособности*. Области w_j^q , получаемые в результате процесса сегментации, назовем *усеченными*, или *внутренними областями правильного функционирования*.

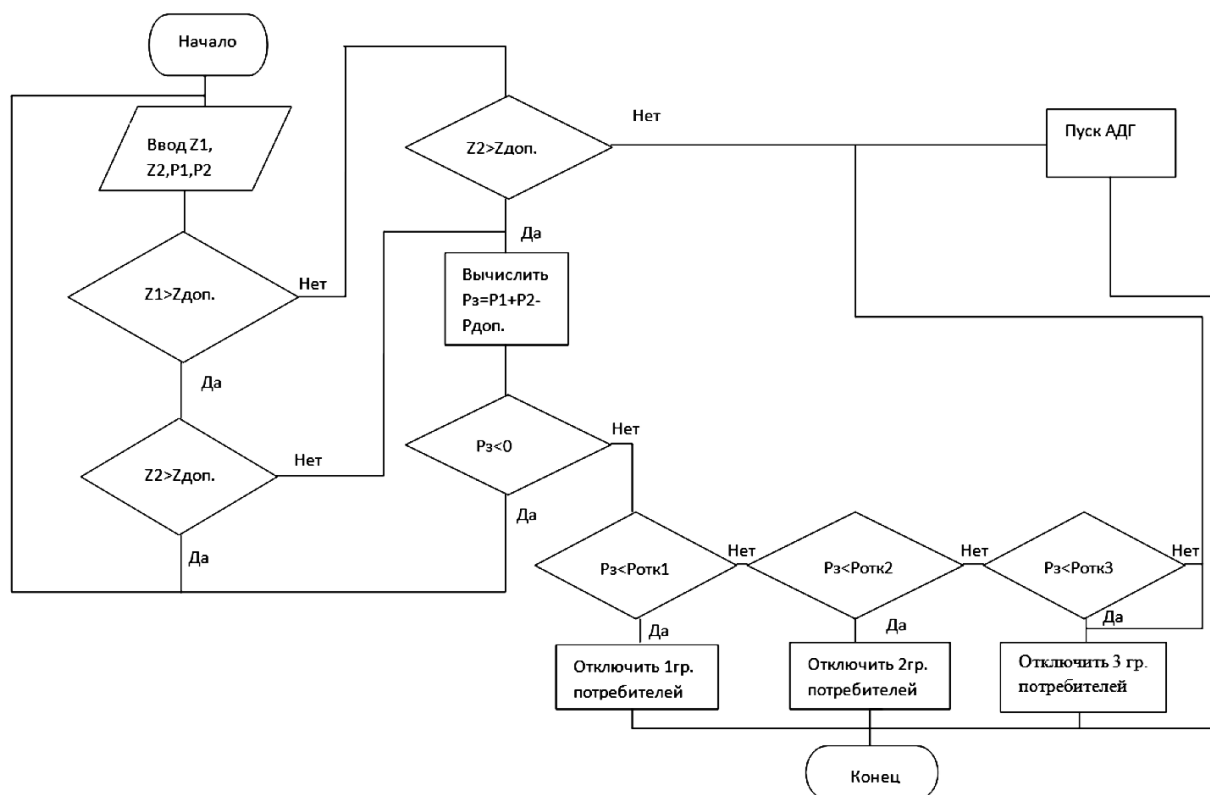
В настоящее время в рамках теории распознавания образов активно развиваются методы сегментации различных пространств в медицине [9], [10], экономике [11], [12], [13], а также при анализе видеоинформации [14], [15], [16], но методы сегментации области работоспособности в данном контексте до сих пор нигде не описаны. Разработки в этом направлении в рамках настоящей работы не рассматриваются. При этом $\forall w_j^q \in H$, $H = \bigcup_{j=1}^q w_j^q$, $j = \overline{1, q}$. Тогда можно дать следующее определение предупредительного управления системы. *Предупредительное управление* — это процесс формирования такого воздействия на СЭЭС, в результате которого ТС системы после срабатывания защиты будет принадлежать усеченной области правильного функционирования $w_j^q \in H$. Задача технического прогнозирования в этом случае сводится к необходимости определения режима, в котором будет работать СЭЭС после срабатывания устройств защиты, и к идентификации данного управляющего воздействия. Практическая реализация предложенного подхода в отдельных случаях приводит к простым и эффективным решениям.

Результаты (Results)

Рассмотрим режим работы СЭЭС в составе двух одинаковых дизель-генераторов: ГА1 и ГА2, загруженных на 70 и 80 % от номинальной мощности: $P_1 = 0,7P_{\text{ном}}$, $P_2 = 0,8P_{\text{ном}}$. Предположим, что в процессе эксплуатации на ГА2 один из внутренних параметров — z_r , например, давление смазочного масла, вышел за пределы допуска некритической АПС. В этом случае представляется возможным прогнозировать режим работы, в котором окажется СЭЭС в случае превышения сигналом z_r значения критической АПС и аварийного отключения ГА2. Так как останется включенным на шины только ГА1, то следует проанализировать его ТС на принадлежность усеченной области правильного функционирования w_1^3 . Если эта область не построена и ее нет в памяти СУ, то обратим внимание на то, что все внутренние и выходные параметры ГА1 — в заданных пределах и при заданных внешних условиях. Для выполнения условия (2) необходимо проверить его ТС на принадлежность только области управляющих воздействий M_u , которая в случае одного агрегата вырождается в отрезок прямой, ограниченный допустимым значением мощности $P_{\text{доп1}}$ для случая работы ГА1. На рисунке представлена блок-схема алгоритма, реализующего данный способ, описанный в источнике [17].

По команде *Начало* осуществляют ввод текущих данных, а именно величин давления смазочного масла первого и второго ГА (z_1 , z_2) и нагрузки каждого из агрегатов (P_1 , P_2). Затем показатели давления сравниваются с минимально допустимыми величинами. Если z_1 или z_2 выходят за пределы допуска, то сравнивают суммарную нагрузку ($P_{\text{сум}}$) с допустимым ее значением на один ГА ($P_{\text{доп}}$). Если окажется, что $P_{\text{сум}} \geq P_{\text{доп}}$, выбирают группу потребителей, отключение которых позволит СЭЭС выполнять свои функции с требуемыми показателями качества после аварийного

отключения одного из ГА, и отключают этих потребителей от сети. Таким образом, используя результаты технического диагностирования ГА и прогнозируя развитие ситуации, на этапе предупредительного управления было принято решение, реализация которого позволила избежать аварии СЭЭС путем перевода ее в состояние правильного функционирования. При этом была осуществлена прогностическая структурная адаптация системы к отказу одного из ГА. Классические способы управления СЭЭС в нештатных режимах работы, применяемые до настоящего времени, приводят к обесточиванию и аварийной ситуации, которая может явиться причиной гибели судна и членов экипажа. Конечно, такое простое решение проблемы обусловлено характером неисправности, связанным с постепенным, по крайней мере, в течение 1–2 с изменением контролируемого параметра ГА от допустимого до его предельного значения. При этом не только СЭЭС, но и сам неработоспособный ГА работает с заданными показателями качества, т. е. первое и второе неравенства в системе (1) в это время остаются верными.



Блок-схема алгоритма отключения групп потребителей

При наступлении неисправности, связанной с отказом системы наддува или топливной системы дизеля, выполнение предложенной процедуры управления ТС осложняется отсутствием хорошо проработанных и апробированных высокоэффективных диагностических признаков. При этом следует отметить, что нарушения в подаче воздуха в дизель приводят к его остановке и могут явиться причиной возникновения аварийной ситуации на судне в течение десятых долей секунды. Современные системы управления диагностируют такого рода отказы посредством контроля момента перехода агрегата в двигательный режим работы с нахождением в этом состоянии в течение сравнительно длительного периода времени, который обычно колеблется в течение 2–6 с. В этом случае сеть дополнительно нагружается обратной мощностью, которую потребляет неработоспособный ГА, что дополнительно ухудшает ситуацию, и в случае даже относительно низкой, примерно 50 % от номинальной, величины первоначальной нагрузки может привести к аварии в СЭЭС. Данный подход характеризуется недопустимой для управления продолжительностью диагностирования. Это определяется тем, что в каждой СЭЭС протекают энергетические процессы, при которых не только отказавший, но также и хотя бы один из работающих

и работоспособных ГА на некоторое время переходит в двигательный режим работы. Именно поэтому такого рода отказы крайне редко купируются защитой. В данном случае целесообразным является применение косвенных методов суть которых состоит в следующем:

- в области работоспособности системы H выделяют сегменты, которые характеризуются наличием подобных энергетических процессов, т. е. определяют соответствующие усеченные области правильного функционирования: $W_j^n = \bigcup_{j=1}^n w_j^n$, $j = \overline{1, n}$ где n — количество таких сегментов;

- определяют момент перехода ГА в двигательный режим;
- в пространстве параметров (1) определяют точку S , соответствующую ТС СЭЭС в данный момент времени;

- проверяют выполнение условия $S \notin W_j^n$, и если оно выполняется, отключают ГА от сети без выдержки времени.

В источниках [18] и [19] предложена практическая реализация данного подхода для несамостоятельного кранового судна, где таковыми выступают области правильного функционирования w_1^n и w_2^n , характеризующиеся наличием процессов включения дополнительного ГА на параллельную работу и рекуперативного торможения в момент опускания груза. Для более сложных СЭЭС таких усеченных областей правильного функционирования будет существенно больше.

На блок-схеме алгоритма, представленного на рисунке (с. 402), показано, что при одновременном отклонении внутренних параметров ГА1 и ГА2 за пределы допуска и в случае, если отключение групп потребителей окажется неэффективным, формируют сигнал на запуск АДГ. Это тоже предупредительное управление, только аварийным источником электроэнергии. В отличие от традиционных решений, когда обычно стремятся сократить время запуска АДГ, предлагается формировать команду управления не при обесточивании судна, а несколько раньше, по особым предупредительным сигналам. В случае, если СУ не обеспечит корректную работу СЭЭС в штатных режимах эксплуатации и средства защиты не предотвратят наступление обесточивания, превентивный запуск АДГ обеспечит питанием всех аварийных потребителей электроэнергии. При этом переход на аварийное электроснабжение происходит мгновенно при исчезновении напряжения на шинах ГРЩ, т. е. судно не теряет ход и управление. Устройство, реализующее данный подход, испытано в натурных условиях и в течение времени подконтрольной эксплуатации показало свою высокую эффективность.

Обсуждение (Discussion)

Наиболее часто обесточивание судов связано с перегрузкой их ДГ. Предложенные подходы позволяют таким образом изменить входные параметры системы, что в случае отказа даже нескольких агрегатов она окажется в состоянии правильного функционирования. На практике это должно привести к сокращению числа аварийных ситуаций в СЭЭС. Разработанные методы предупредительного управления могут быть использованы при создании комплексных СУ техническими средствами судна, самонастраивающихся и самоорганизующихся систем.

Выводы (Summary)

На основании проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. СУ современных судов не обеспечивают в полной мере безаварийную эксплуатацию СЭЭС в штатных режимах работы, вызванных отказом хотя бы одного из ГА.
2. Для решения задачи безаварийной эксплуатации СЭЭС обосновано использование методов предупредительного управления, осуществляемого посредством перевода ТС системы в момент отказа ее источников электроэнергии в режим правильного функционирования.
3. Разработанные алгоритмы предупредительного управления позволяют сравнительно просто избежать аварии в СЭЭС при переходе в неработоспособное состояние одного или нескольких ГА.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.
2. Абрамов О. В. Мониторинг и прогнозирование технического состояния систем ответственного назначения / О. В. Абрамов // Информатика и системы управления. — 2011. — № 2 (28). — С. 4–15.
3. Saushev A. V. Solution of problems of parametric optimization and control of electric drives state based on information about operability area boundary / A. V. Saushev, E. V. Bova // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. — IOP Publishing, 2018. — Vol. 327. — Is. 5. — Pp. 052029. DOI: 10.1088/1757-899X/327/5/052029.
4. Катыева Я. В. Методы параметрического синтеза на основе сеточного представления области работоспособности / Я. В. Катыева, Д. А. Назаров // Информационные технологии. — 2015. — Т. 21. — № 9. — С. 651–656.
5. Саушев А. В. Области работоспособности электротехнических систем / А. В. Саушев. — СПб.: Политехника, 2013. — 412 с.
6. Саушев А. В. Основы управления состоянием электротехнических систем объектов водного транспорта / А. В. Саушев. — СПб.: Изд-во ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова, 2015. — 215 с.
7. Саушев А. В. Алгоритмы синтеза номиналов и допусков многопараметрических систем / А. В. Саушев // Информационные технологии и вычислительные системы. — 2015. — № 3. — С. 65–73.
8. Павлюк Г. П. Построение областей заданного качества управления на основе статистического подхода: метод отсекающих моделей / Г. П. Павлюк, В. А. Шихин // Мехатроника, автоматизация, управление. — 2010. — № 10. — С. 39–45.
9. Ерусланов Р. В. Сегментация изображений органов брюшинного пространства по компьютерным томографическим изображениям на основе функции уровня / Р. В. Ерусланов, М. Н. Орехова, В. Н. Дубровин // Компьютерная оптика. — 2015. — Т. 39. — № 4. — С. 592–599. DOI: 10.18287/0134-2452-2015-39-4-592-599.
10. Rahim M. S. M. 3D bones segmentation based on CT images visualization / M. S. M. Rahim, A. Norouzi, A. Rehman, T. Saba // Biomedical Research. — 2017. — Vol. 28. — Is. 8. — Pp. 3641–3644.
11. Цой М. Е. Построение сегментации на основе модифицированного RFM анализа для повышения лояльности потребителей / М. Е. Цой, В. Ю. Щекотин, М. Н. Лежнина // Российское предпринимательство. — 2017. — Т. 18. — № 21. — С. 3113–3134. DOI: 10.18334/rp.18.21.38506.
12. Жук Е. С. Позиционирование компаний на заре эпохи маркетинговой кастомизации / Е. С. Жук // Российское предпринимательство. — 2014. — № 18 (264). — С. 184–196.
13. Guadros A. J. Customer segmentation model based on value generation for marketing strategies formulation / A. J. Guadros, V. E. Domingues // Estudios Gerenciales. — 2014. — Vol. 30. — Is. 130. — Pp. 25–30. DOI: 10.1016/j.estger.2014.02.005.
14. Чочиа П. А. Сегментация изображений на основе анализа расстояний в пространстве / П. А. Чочиа // Автометрия. — 2014. — Т. 50. — № 6. — С. 97–110.
15. Khan M. W. A Survey: Image Segmentation Techniques / M.W. Khan // International Journal of Future Computer and Communication. — 2014. — Vol. 3. — No. 2. — Pp. 89–93. DOI: 10.7763/IJFCC.2014.V3.274.
16. Hu X. Improved fuzzy c-means algorithm of the image segmentation / X. Hu, L. Li // Journal of Electrical and Electronic Engineering. — 2015. — Vol. 3. — Is. 1. — Pp. 1–5. DOI: 10.11648/j.jeee.20150301.11.
17. Пат. 2623106 Российская Федерация, МПК H02J 3/24, H02H 7/85. Способ автоматической разгрузки параллельно работающих генераторных агрегатов / Н.В. Широков; заяв. и патентобл. ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова. — № 2016118975; заявл. 16.05.2016; опубл. 22.06.2017, Бюл. № 18. — 8 с.
18. Пат. 2666792 Российская Федерация, МПК H02H 3/08. Способ и устройство защиты сети автономной электростанции / Н. В. Широков; заяв. и патентобл. ООО «Форпик Стандарт Сервис». — № 2017126361; заявл. 21.07.2017; опубл. 12.09.2018, Бюл. № 26. — 12 с.
19. Пат. 2653706 Российская Федерация, МПК H02H 3/12, H02J 3/38. Способ защиты сети автономной электростанции. / Н. В. Широков; заяв. и патентобл. ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова. — № 2017117363; заявл. 18.05.2017; опубл. 14.05.2018, Бюл. № 14. — 10 с.

REFERENCES

1. Saushev, A. V., and N. V. Shirokov. "Diagnosing of the condition of electro-technical systems in space of parameters of their elements." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S.O. Makarova* 2 (36) (2016): 143–156. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-2-143-156.

2. Abramov, O. V. "Monitoring i prognozirovaniye tekhnicheskogo sostoyaniya sistem otvetstvennogo naznacheniya." *Informatika i sistemy upravleniya* 2(28) (2011): 4–15.
3. Saushev, A. V., and E. V. Bova. "Solution of problems of parametric optimization and control of electric drives state based on information about operability area boundary." *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Vol. 327. No. 5. IOP Publishing, 2018. 052029. DOI: 10.1088/1757-899X/327/5/052029.
4. Katueva, Ya. V., and D. A. Nazarov. "The Methods of Parametric Synthesis Based on Grid Representation of a Region of Acceptability." *Information Technologies* 21.9 (2015): 651–656.
5. Saushev, A. V. *Oblasti rabotosposobnosti elektrotekhnicheskikh sistem*. SPb.: Politekhnik, 2013.
6. Saushev, A. V. *Osnovy upravleniya sostoyaniem elektrotekhnicheskikh sistem ob»ektov vodnogo transporta*. SPb.: GUMRF imeni admirala S. O. Makarova, 2015.
7. Saushev, A. V. "Synthesis algorithms of face values and admission of multiple parameter systems." *Information technologies and computing systems* 3 (2015): 65–73.
8. Pavljuk, G. P., and V. A. Shikhin. "Statistical Approach for the Regions of Required Control Quality Construction: the Cut-off Models Method." *Mechatronics, automation, control* 10 (2010): 39–45.
9. Eruslanov, R. V., M. N. Orehova, and V. N. Dubrovin. "Retroperitoneal space organ segmentation from CT images based on the level set function." *Computer Optics* 39.4 (2015): 592–599. DOI: 10.18287/0134-2452-2015-39-4-592-599.
10. Rahim, M. S. M., A. Norouzi, A. Rehman, and T. Saba. "3D bones segmentation based on CT images visualization." *Biomedical Research* 28.8 (2017): 3641–3644.
11. Tsoy, M. E., V. Yu. Shchekoldin, and M. N. Lezhnina. "Building segmentation on the basis of modified RFM analysis to increase customer loyalty." *Russian journal of Entrepreneurship* 18.21 (2017): 3113–3134. DOI: 10.18334/rp.18.21.38506.
12. Zhuk, Ye. S. "Positioning of companies at the dawn of the era of marketing customization." *Russian journal of Entrepreneurship* 18(264) (2014): 184–196.
13. Cuadros, Alvaro Julio, and Victoria Eugenia Domínguez. "Customer segmentation model based on value generation for marketing strategies formulation." *Estudios Gerenciales* 30.130 (2014): 25–30. DOI: 10.1016./j.est.2014.02.005.
14. Chochia, P. A. "Image segmentation based on the analysis of distances in an attribute space." *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing* 50.6 (2014): 613–624. DOI: 10.3103/S8756699014060107.
15. Khan, Muhammad Waseem. "A survey: Image segmentation techniques." *International Journal of Future Computer and Communication* 3.2 (2014): 89–93. DOI: 10.7763/IJFCC.2014.V3.274.
16. Hu, Xuegang, and Lei Li. "Improved fuzzy c-means algorithm for image segmentation." *Journal of Electrical and Electronic Engineering* 3.1 (2015): 1–5. DOI: 10.11648/j.jeee.20150301.11.
17. Shirokov, N. V. RU 2 623 106 C1, IPC H 02 J 3/24, H 02 H 7/85. Sposob avtomaticheskoy razgruzki jelektrotekhnicheskoy sistemi s parallelno rabotajushimi generatormi agregatami. Russian Federation, assignee. Publ. 22 June 2017.
18. Shirokov, N. V. RU 2 666 792 C1, IPC H 02 H 3/08. Sposob i ustroystvo zashiti seti avtonomnoy jelektrostantsii. Russian Federation, assignee. Publ. 12 Sep. 2018.
19. Shirokov, N. V. RU 2 653 706 C1, IPC H 02 H 3/12, H 02J 3/38. Sposob zashiti seti avtonomnoy jelektrostantsii. Russian Federation, assignee. Publ. 14 May 2018.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

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

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 25 февраля 2019 г.
Received: February 25, 2019.