

# ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-2-390-401

## METHOD FOR ELIMINATING HOMONYMOUS AREAS IN WARNING CONTROL OF THE ELECTRICAL SYSTEM

**N. V. Shirokov**

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

*The solution of an important scientific and technical problem namely the development of methods and tools used for warning control of the electrical system is considered in the paper. Thus warning control is considered as one of the possible variants for object operation, carried out on the basis of its technical condition. The proposed approach involves the use of parametric or structural adaptation of the electrical system to emerging failures, carried out on the basis of the results of technical diagnostics. The description of the technical condition of the system by means of a mathematical model, given in the form of a field of efficiency, built in the space of parameters of its functional blocks is substantiated.*

*The homonymous areas of proper functioning characterized by a specific diagnostic parameter are defined in the paper. It has been shown that if the technical condition of the system belongs to this area, then in this mode it is operational, and diagnostic tools will identify its failure. The formal possibility of allocation of these areas from the field of efficiency is proved; a technique for their allocation is presented.*

*A method for homonymous areas exclusion, developed by the author for the purposes of warning control is proposed in the paper. This approach reduces the error of the first kind that occurs when determining the technical condition of the electrical system. According to the method, described in the paper, the modes in which the state of the electrical system belongs to the homonymous areas are excluded from the diagnosis process.*

*As an example of the practical implementation of the proposed method, its application in the case of transition of one of the generator units of the electric power system of the floating crane to the motive mode of operation is considered. The considered example of preventive management is an independent scientific and technical task. An original algorithm for its solution based on the method of the homonymous areas elimination is presented in the paper.*

*Keywords: warning control, homonymous area, segmentation of a field of efficiency, distinctive features of modes, reverse power.*

**For citation:**

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.

**УДК 621.316:658.58**

## МЕТОД ИСКЛЮЧЕНИЯ ОМОНИМИЧНЫХ ОБЛАСТЕЙ В ПРЕДУПРЕДИТЕЛЬНОМ УПРАВЛЕНИИ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМОЙ

**Н. В. Широков**

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

*Рассмотрено решение важной научно-технической проблемы — разработки методов и средств, используемых для предупредительного управления электротехнической системой. При этом предупредительное управление рассматривается как один из возможных вариантов эксплуатации объекта, осу-*

щественных исходя из его технического состояния. Предлагаемый подход предполагает использование параметрической или структурной адаптации электротехнической системы к возникающим отказам, осуществляемой на основании результатов технического диагностирования. Обосновано описание технического состояния системы посредством математической модели, заданной в виде области работоспособности, построенной в пространстве параметров ее функциональных блоков. Дано определение омонимичных областей правильного функционирования, характеризуемых конкретным диагностическим параметром. Показано, что, если техническое состояние системы принадлежит этой области, то в данном режиме она работоспособна, а средства диагностирования будут идентифицировать ее отказ. Обоснована формальная возможность выделения этих областей из области работоспособности и представлена методика их выделения. Предложен метод исключения омонимичных областей, разработанный автором в целях предупредительного управления. Данный подход обеспечивает уменьшение ошибки первого рода, возникающей при определении технического состояния электротехнической системы. Согласно описанному в статье методу, из процесса диагностирования исключают режимы, в которых состояние электротехнической системы принадлежит омонимичным областям. В качестве примера практической реализации предложенного метода рассмотрено его применение в случае перехода одного из генераторных агрегатов электроэнергетической системы плавкрана в двигательный режим работы. Рассмотренный пример предупредительного управления представляет собой самостоятельную научно-техническую задачу. В статье представлен оригинальный алгоритм решения данной задачи на основе метода исключения омонимичных областей.

*Ключевые слова:* предупредительное управление, омонимичная область, сегментация области работоспособности, отличительные признаки режимов, обратная мощность.

**Для цитирования:**

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.

## Введение (Introduction)

Предупредительное управление электротехнической системой (ЭТС), в соответствии с требованиями к ГОСТу 19176–85 от 01.05.1997 г., осуществляется в случае отклонения ее контролируемых параметров от номинальных значений. Оно предназначено для изменения состояния и режимов работы технических средств, осуществляемых с целью предотвращения наступления аварийной ситуации. В работе [1] предупредительное управление определено как процесс воздействия на систему, в результате которого после достижения контролируемыми параметрами предельного значения или срабатывания защиты ее техническое состояние будет принадлежать усеченной области правильного функционирования. При этом предполагается параметрическая или структурная адаптация ЭТС к возникшим отказам, осуществляемая на основе результатов диагностирования ее элементов и связей между ними. Таким образом, предупредительное управление представляет собой один из вариантов эксплуатации системы, реализуемых исходя из ее технического состояния, описание которого удобно осуществлять с помощью области работоспособности. Указанная модель обычно задается в виде совокупности граничных точек, как показано в статьях [2]–[4], или в виде гиперповерхности, характеризуемой допустимыми значениями первичных параметров  $\{\bar{X}\}$ , как представлено в работе [5]. Для решения задач параметрического синтеза или технической диагностики область работоспособности обычно аппроксимируют с помощью более простых геометрических фигур в соответствии с подходами, изложенными в публикациях [6], [7].

Наиболее часто область работоспособности заменяют гиперпараллелепипедом или гипербрусом с гранями, параллельными осям координат. В этом случае каждая грань задает допуск на определенный параметр, который не зависит от величины других сигналов. Считается, что для идентификации работоспособного состояния ЭТС необходимо, чтобы все первичные параметры находились в пределах своих допусков, как показано в статьях [8]–[10]. В технической диагностике этот метод называют *контролем по независимым допускам*. Как следует из материалов, изложенных в работах [11]–[13], этот очень простой в практической реализации подход имеет существенный недостаток, связанный с резким снижением достоверности диагностирования

при увеличении числа первичных параметров. Согласно результатам, представленным в работе [5] для случая, когда количество контролируемых сигналов равно пяти, методическая погрешность может превышать 90 %.

Существенное снижение методической погрешности при определении технического состояния ЭТС достигается посредством аппроксимации области работоспособности линейными гиперповерхностями [14]. Последнее позволяет перейти к диагностированию по взаимозависимым допускам, частным случаем которого является *метод некомпенсированной погрешности*, описанный в работе автора [15]. Другой способ, позволяющий наиболее точно представить область работоспособности, заключается в отдельной аппроксимации всех образующих ее гиперповерхностей посредством полиномиальных зависимостей. В работах [5], [16] показано как с помощью использования математического аппарата  $R$ -функций формируют результирующую аналитическую зависимость, описывающую область работоспособности с высокой точностью. В этом случае определение технического состояния СЭТ осуществляется с максимальной достоверностью. Некоторые подходы, реализующие данный способ, описаны в работах [2], [5], [17]. При этом снижение методической погрешности диагностирования, сопровождающееся усложнением технических средств, приводит к необходимости использования относительно больших объемов памяти. Особенно критичным для целей предупредительного управления является увеличение времени диагностирования по сравнению с контролем по независимым допускам. Указанные недостатки обуславливают необходимость разработки специальных подходов к выбору контролируемых параметров и диагностических признаков для решения оперативных задач управления ЭТС с учетом их текущего технического состояния. При этом, в соответствии с материалами, изложенными в статье [18], под ЭТС будем понимать совокупность связанных между собой электротехнических устройств, объединенных процессом генерации, распределения, преобразования, потребления электрической энергии и управления этими процессами.

### Методы и материалы (Methods and Materials)

Непосредственное использование информации о границе области работоспособности, заданной в пространстве первичных параметров  $\{\bar{X}\}$ , в процессе управления ЭТС может вызывать ряд трудностей, связанных с жесткими требованиями к производительности и объему памяти используемой аппаратуры. При этом возникает необходимость в применении большого числа датчиков, измеряющих различные физические величины и средств коммуникации получаемой информации, что может на практике серьезно усложнить технические средства управления и даже привести к снижению эксплуатационной надежности. В этой связи в качестве контролируемых параметров обычно выбирают легко измеряемые и достаточно интегрированные величины, зависящие от технического состояния многих элементов. Такими сигналами являются фазовые переменные  $\{\bar{Z}\}$ , представляющие собой функционалы от первичных параметров  $\{\bar{X}\}$ . Как показано в работе [2]:

$$Z_{j\min}^v \leq Z_j^v = F_j^v(\bar{X}) \leq Z_{j\max}^v, \quad v = \bar{1}, h, \quad (1)$$

где  $Z_{j\max}^v$ ;  $Z_{j\min}^v$ ;  $Z_j^v$  — соответственно максимально допустимое, минимально допустимое и текущее значения  $j$ -го внутреннего параметра;  $F_j^v(\mathbf{X})$  — оператор связи первичных параметров ЭТС с ее параметрами  $\{\bar{Z}\}$ .

Указанное упрощение часто приводит к существенному снижению достоверности диагностирования, а следовательно, к снижению качества управления ЭТС в экстремальных ситуациях. Это объясняется тем, что в областях работоспособности таких систем имеются участки, характеризуемые контролируемым параметром  $Z_j^v$ . На практике это может привести к ошибочному признанию вышедшим из строя работоспособного блока ЭТС и неправомерным действиям системы управления. В то же время глубина диагностирования в целях предупредительного управления ЭТС определяется степенью ее адаптации к возникающим неисправностям, так как самоорганизация систем, как правило, осуществляемая в виде изменений структурных связей функциональ-

ных блоков, представляется правомерным построение области работоспособности в пространстве их параметров.

Для повышения достоверности диагностирования выполним в соответствии с работой [1] сегментацию области работоспособности  $H$ , построенной в пространстве параметров  $\{\bar{Z}\}$  таким образом, чтобы отделить усеченные области правильного функционирования  $w_j^q$ , характеризуемые параметром  $Z_j^v$ . Усеченные области правильного функционирования, характеризуемые диагностическим параметром, назовем *омонимичными областями* (от греч. *homos* — одинаковый и *опута* — имя). Если точка  $S$ , соответствующая техническому состоянию системы, принадлежит подобной области  $w_j^q$ , то в этом режиме ЭТС работоспособна, а средства, использующие для контроля данный диагностический параметр, будут идентифицировать отказ объекта диагностирования. В остальных случаях параметр  $Z_j^v$  корректно отражает техническое состояние системы. Таким образом, наличие омонимичных областей приводит к неоднозначности результатов диагностирования.

В работе [1] показано, что область работоспособности может быть представлена как сумма усеченных областей правильного функционирования:

$$\forall w_j^q \in H, \quad H = \bigcup_{j=1}^q w_j^q, \quad j = \overline{1, q} \quad (2)$$

Тогда используя аддитивные свойства области  $H$ , вытекающие из выражения (2), запишем

$$H = \bigcup_{i=1}^v w_i^v + \bigcup_{j=1}^g w_j^g; \quad i = \overline{1, v}; j = \overline{1, g}, \quad (3)$$

где  $\bigcup_{j=1}^g w_j^g$  — омонимичные области в составе области работоспособности.

Из выражения (3) следует, что существует объективная возможность отделения омонимичной области от области работоспособности. При этом во всех режимах, соответствующих области  $H^v = \bigcup_{i=1}^v w_i^v$ , применение диагностического параметра приведет к достоверным результатам диагностирования. Сущность метода заключается в том, что при использовании диагностического параметра, определяющего неработоспособное состояние ЭТС, из процесса диагностирования исключают области  $\bigcup_{j=1}^g w_j^g$ . В этой связи предлагаемый подход назовем *методом исключения омонимичных областей*.

Алгоритм, реализующий настоящий метод, заключается в том, что на этапе проектирования системы предупредительного управления строят область работоспособности управляемого объекта в пространстве внутренних параметров  $\{\bar{Z}\}$ , выделяют омонимичные области  $\bigcup_{j=1}^g w_j^g$  и заносят в память блока управления. Контролируют техническое состояние ЭТС в процессе эксплуатации и при достижении параметром  $Z_j^v$  предельно допустимого значения осуществляют проверку режима работы системы. Если ЭТС не работает в режиме, соответствующем одной из омонимичных областей, то она признается неработоспособной, то выполняются необходимые воздействия на систему, обеспечивающие ее переход в режим правильного функционирования.

В случае, когда техническое состояние ЭТС принадлежит одной из областей  $w_j^g$ , несмотря на предельно допустимые значения диагностического параметра  $Z_j^v$ , она признается работоспособной, и предупредительных управляющих воздействий не требуется. Данный подход достаточно прост в реализации, обладает большим быстродействием и требует на порядок меньший объем памяти вычислительных устройств, чем при диагностировании с использованием информации о границе области работоспособности, заданной в пространстве первичных параметров.

### Результаты (Results)

Практическое применение метода исключения омонимичных областей рассмотрим на примере ситуации, возникающей при отказе одного из первичных двигателей, параллельно работающих дизель-генераторных агрегатов (ГА) судовой электроэнергетической системы (СЭЭС) плав-

крана «LUFT 1» [19], которую, несомненно, можно классифицировать как ЭТС. Тогда номинальные мощности ГА равны между собой и составляют по 900 кВт каждый ( $N_1 = N_2 = 900$  кВт), а величина потерь, и, следовательно, обратная мощность каждого агрегата равна 140 кВт ( $N_{обр1} = N_{обр2} = 140$  кВт); максимальная разность развиваемых мощностей ГА, обеспечиваемая подсистемой распределения активных нагрузок составляет 63 кВт ( $|N_1 - N_2| = 63$  кВт); максимальная нагрузка СЭЭС составляет 947 кВт ( $P_{max} = 947$  кВт). Для данного режима работы, с учетом подходов, изложенных в [1], область работоспособности  $H$  можно представить следующим образом:

$$H = B_z \cap M_y \cap M_u. \quad (4)$$

При этом допусковая область  $B_z$ , образованная пересечением области предельных значений мощностей ГА и допусковой области  $P_z$ , заданной ограничением  $|N_1 - N_2| \leq 63$  кВт, в данном случае имеет форму поверхности, задаваемой системой неравенств:

$$\begin{cases} -140 \text{ кВт} \leq N_1 \leq 900 \text{ кВт}; \\ -140 \text{ кВт} \leq N_2 \leq 900 \text{ кВт}; \\ |N_1 - N_2| \leq 63 \text{ кВт}. \end{cases} \quad (5)$$

Допусковая область  $B_z$  представлена на рис. 1. Область  $M_y$  характеризует внешние условия работоспособности рассматриваемой системы и представляет собой отображение выходных параметров СЭЭС  $\{\bar{Y}\}$  в пространстве параметров  $\{\bar{Z}\}$ :

$$\Phi_{yz} : D_y \rightarrow M_y; M_y = \bigcap_{i=1}^n M_i. \quad (6)$$

В рамках настоящего исследования рассматриваем только один показатель качества работы СЭЭС — величину генерируемой мощности  $N_{общ} = N_1 + N_2$ . Поскольку исходя из закона сохранения энергии, суммарная мощность системы, состоящей из двух ГА, не может быть отрицательной и большей, чем сумма номинальных мощностей агрегатов, область  $M_y$  может быть задана неравенством  $0 \leq N_{общ} \leq 1800$  кВт.

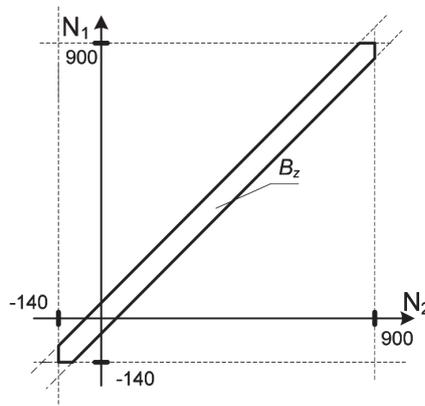


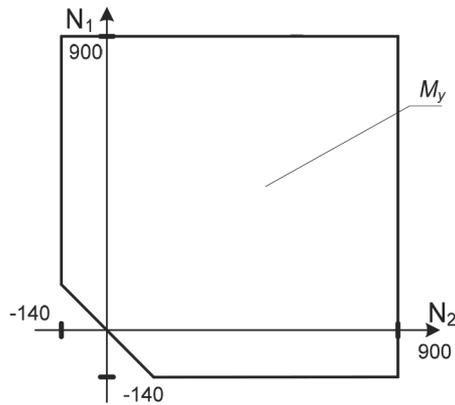
Рис. 1. Допусковая область  $B_z$  внутренних параметров  $N_1, N_2$

Область  $M_y$  представлена на рис. 2, а. Область  $M_u$  характеризует пространство управляющих воздействий системы. Она представляет собой отображение пространства управляющих сигналов в пространстве параметров  $\{\bar{Z}\}$ :

$$\Phi_{uz} : D_u \rightarrow M_u; M_u = \bigcap_{c=1}^e M_c. \quad (7)$$

Величина мощности, генерируемой системой  $N_{общ}$ , задается активной нагрузкой сети  $P$ , а следовательно,  $e = 1$ , и область  $M_u$  отображает неравенство  $0 \leq P \leq 947$  кВт. Активная нагрузка сети, не имеющей дополнительного источника генерации, не может быть отрицательной, а максимальное ее значение по условию равно 947 кВт.

а)



б)

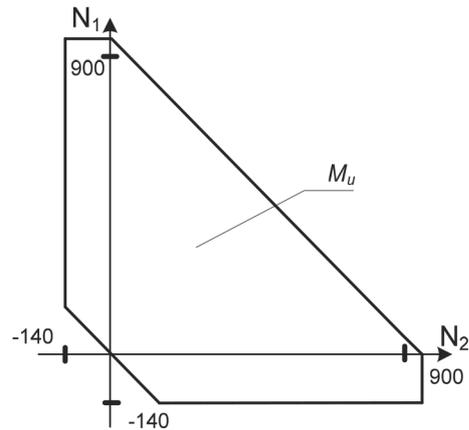


Рис. 2. Область  $M_y$  — отображение внутренних параметров  $N_1, N_2$  в пространстве выходных параметров  $N_{\text{общ}}$  (а); область  $M_u$  — отображение внутренних параметров  $N_1, N_2$  в пространстве входных параметров  $P$  (б)

Область  $M_u$  представлена на рис. 2, б. Область работоспособности  $H$ , образуемая в виде пересечения областей  $B_z, M_y, M_u$ , представлена на рис. 3. При этом полагаем, что переходные процессы, связанные с синхронизацией генераторов и включением их на параллельную работу, закончились; отсутствуют другие источники, способные генерировать электроэнергию в сеть; регуляторы первичных двигателей имеют идеальные характеристики и работают без перерегулирования и без инерции.

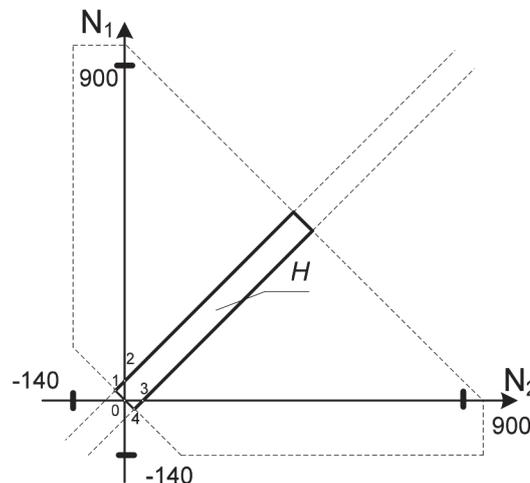


Рис. 3. Область работоспособности  $H$ , построенная в пространстве внутренних параметров  $N_1, N_2$

Главным диагностическим параметром  $Z_j^v$  отказа топливной системы приводного двигателя ГА является переход генератора в двигательный режим и появление обратной мощности  $N_{\text{обр}}$ . Это интегральная, легко контролируемая электрическая величина, зависящая от многих первичных параметров. Для фиксации момента неисправности топливной системы в пространстве параметров  $\{X\}$  пришлось бы контролировать количество поступающего топлива в единицу времени, качество топлива, его температуру и вязкость, количество и качество поступающего в систему воздуха, положение рейки топливного насоса, а также осуществлять ряд других относительно сложных и дорогих измерений. Поэтому в современных устройствах предаварийного управления СЭЭС в качестве

диагностического параметра используют величину  $N_{обр}$ , однако при этом перед разработчиками аппаратуры встает трудноразрешимая задача.

С одной стороны, при переходе ГА в двигательный режим нагрузка на второй агрегат практически удваивается и при этом сеть дополнительно нагружается обратной мощностью. Данная ситуация зачастую приводит к перегрузке работоспособного источника электроэнергии, его остановке и обесточиванию судна. В связи с этим возникает необходимость в мгновенном отключении неисправного агрегата до того момента, когда он будет перегружать сеть. С другой стороны, существуют такие режимы работы СЭЭС, при которых один из исправных генераторов начинает потреблять энергию из сети. В этом случае применение диагностического признака — появление обратной мощности — приведет к ошибочному отключению работоспособного ГА.

Попытка найти парето-оптимальное решение в данной ситуации привела к тому, что средства защиты срабатывают не в момент перехода ГА в двигательный режим, а значительно позднее. В соответствии с Правилами Российского морского регистра судоходства, предельная величина обратной мощности, при которой отключают генераторы переменного тока, составляет 15 % от номинальной мощности ГА для агрегатов, использующих в качестве приводного двигателя дизель и 6 %, если первичный двигатель — это турбина. В этом случае обычно используют задержку времени при срабатывании защиты, которая может превышать 10 с.

Использование такого диагностического признака во многих случаях позволяет избежать ошибочного отключения работоспособного ГА. Однако, с другой стороны, в момент отказа система защиты срабатывает позже, чем следует, что существенно снижает ее эффективность, ведет к возникновению аварийной ситуации на судне. Такая проблема особенно актуальна для судов, имеющих в составе СЭЭС мощные потребители, соизмеримые по мощности с генераторами, судов, оборудованных мощными подъемно-транспортными механизмами, плавкранов. В остальных случаях защита от обратной мощности, как правило, настраивается на срабатывание при  $N_{обр} = 0,1N_{ном}$  с выдержкой времени 5–6 с. Задача предупредительного управления для подобной ситуации — обеспечить отключение неработоспособного ГА, по крайней мере, в момент перехода генератора в двигательный режим до момента появления обратной мощности.

На рис. 3 диагностический параметр, характеризуемый появлением обратной («отрицательной») мощности, отображается по осям ординат и абсцисс, поэтому рассечем область  $H$  двумя плоскостями по осям координат. При этом образуются две усеченные области правильного функционирования  $w_1^g$  и  $w_2^g$ , ограниченные точками 0–3–4 и 0–1–2 соответственно. Эти области имеют вид треугольников и так как они соответствуют переходу генератора в двигательный режим в работоспособном состоянии, являются омонимичными. Параметры  $w_1^g$  и  $w_2^g$  заносятся в память устройства предупредительного управления. При появлении обратной мощности величины  $N_1$  и  $N_2$  определяют контрольную точку  $S$ , отображающую состояние системы в текущий момент времени, осуществляют проверку на принадлежность точки  $S$  пространству  $w_1^g$  при условии, что  $N_1 < 0$  и пространству  $w_2^g$  при  $N_2 < 0$ . Если контрольная точка не принадлежит омонимичной области, то формируют сигнал на отключение генератора, перешедшего в двигательный режим, а если нет, то отключение блокируют. Для этих целей можно воспользоваться хорошо известными подходами вычислительной геометрии: методом относительности, сравнительных площадей, векторным методом, методом геометрического луча [20].

Приведенное на рис. 4 изображение представляет собой *идеальную модель* области работоспособности  $H$ , построенную в пространстве параметров  $N_1$  и  $N_2$ . При создании систем предупредительного управления необходимо учитывать принятые ранее следующие допущения.

Во-первых, в двигательный режим генератор может перейти не только при работе в параллель, но и в момент синхронизации с сетью. Одним из условий успешного подключения ГА является совпадение частот работающих агрегатов, осуществляемое с заданной точностью. При этом допустимая разница частот  $\Delta f$  обычно лежит в пределах  $0,05\text{Hz} \leq \Delta f \leq 0,5\text{Hz}$ . В момент подключения за счет явления синхронизма частоты уравниваются, а значит, один генератор начинает вра-

щаться быстрее, получая энергию от другого. Если частота напряжения подключаемой машины меньше, чем у работающей на нагрузку, то этот генератор однозначно переходит в двигательный режим, дополнительно нагружая сеть. Если нагрузка работающего агрегата близка к холостому ходу и происходит подключение ГА с более высокими оборотами, то включаемый на параллельную работу генератор может взять на себя всю нагрузку, переводя работающий в двигательный режим. Этот процесс быстротечен (обычно протекает в течение нескольких десятых долей секунды), но его следует учитывать при разработке систем предупредительного управления. Работа генератора с кратковременным переходом в двигательный режим в момент включения на параллельную работу описывается усеченной областью правильного функционирования, которая тоже является омонимичной. Обозначим ее как  $w_3^g$ .

Во-вторых, современные суда часто оснащены грузоподъемными механизмами, работающими с рекуперацией энергии в сеть. При этом, например, грузовая лебедка в режиме травления может не только взять на себя всю нагрузку, но и перевести все работающие генераторы в двигательный режим. Использование в качестве диагностического параметра величины обратной мощности приведет к отключению хотя бы одного работоспособного агрегата. Омонимичную область, характеризующую работу ГА в двигательном режиме в момент рекуперации энергии в сеть обозначим как  $w_4^g$ .

В-третьих, на многих судах имеются потребители, например, компрессоры, мощность которых сопоставима с мощностью одного из генераторов. Отключение этих потребителей приводит к резкому уменьшению нагрузки в сети. При этом мощности, развиваемые каждым агрегатом, резко снижаются. За счет инерционности регуляторов и различия в статизме скоростных характеристик первичных двигателей один из ГА может перейти в двигательный режим, хотя все его параметры соответствуют требованиям нормативно-технической документации. Омонимичную область, характеризующую работу генератора с обратной мощностью вследствие существенного и скачкообразного снижения нагрузки сети, обозначим как  $w_5^g$ . Таким образом, условие отключения ГА можно сформулировать в следующем виде:

$$\begin{cases} (N_1 < 0) \wedge \{(S \notin w_1^g) \vee (S \notin w_3^g) \vee (S \notin w_4^g) \vee (S \notin w_5^g)\}; \\ (N_2 < 0) \wedge \{(S \notin w_2^g) \vee (S \notin w_3^g) \vee (S \notin w_4^g) \vee (S \notin w_5^g)\}. \end{cases} \quad (8)$$

Так как каждая усеченная область правильного функционирования  $w_3^g, w_4^g, w_5^g$  характеризует свой режим работы СЭЭС, который можно идентифицировать по *отличительным признакам*  $x_3, x_4, x_5$ , то выражение (8) можно записать в виде:

$$\begin{cases} (N_1 < 0) \wedge \{(S \notin w_1^g) \vee \bar{x}_3 \vee \bar{x}_4 \vee \bar{x}_5\}; \\ (N_2 < 0) \wedge \{(S \notin w_2^g) \vee \bar{x}_3 \vee \bar{x}_4 \vee \bar{x}_5\}, \end{cases} \quad (9)$$

где  $x_3, x_4, x_5$  — отличительные признаки режимов работы системы.

Для СЭЭС такими признаками могут быть следующие:

$x_3$  — логический сигнал (например, логическая единица), сформированный в момент замыкания генераторного автоматического выключателя синхронизируемого генератора, который сохраняется до момента приема нагрузки обоими агрегатами;

$x_4$  — «сухой контакт» вспомогательных контактов органов управления или контактора рекуперативного торможения;

$x_5$  — «сухой контакт» вспомогательных контактов органов управления или контактора управления потребителем электроэнергии, мощность которого соизмерима с мощностью генератора.

На рис. 4 представлена блок-схема алгоритма, реализующего метод исключения омонимичных областей в предупредительном управлении применительно к рассматриваемому примеру. По команде «Пуск» производится ввод данных, характеризующих состояние СЭЭС:  $N_1, N_2, x_3, x_4, x_5$ . Осуществляется исключение омонимичных областей из процесса диагностирования. С этой целью оценивают логические сигналы, характеризующие режим работы системы  $x_3, x_4, x_5$ , а затем

проверяют принадлежность точки  $S$ , заданной параметрами  $N_1, N_2$ , пространствам  $w_1^g, w_2^g$ . Если СЭЭС не работает в режиме, характеризующем одну из омонимичных областей функционирования, то контролируют момент перехода генератора в двигательный режим, отключая ГА в момент появления обратной мощности.

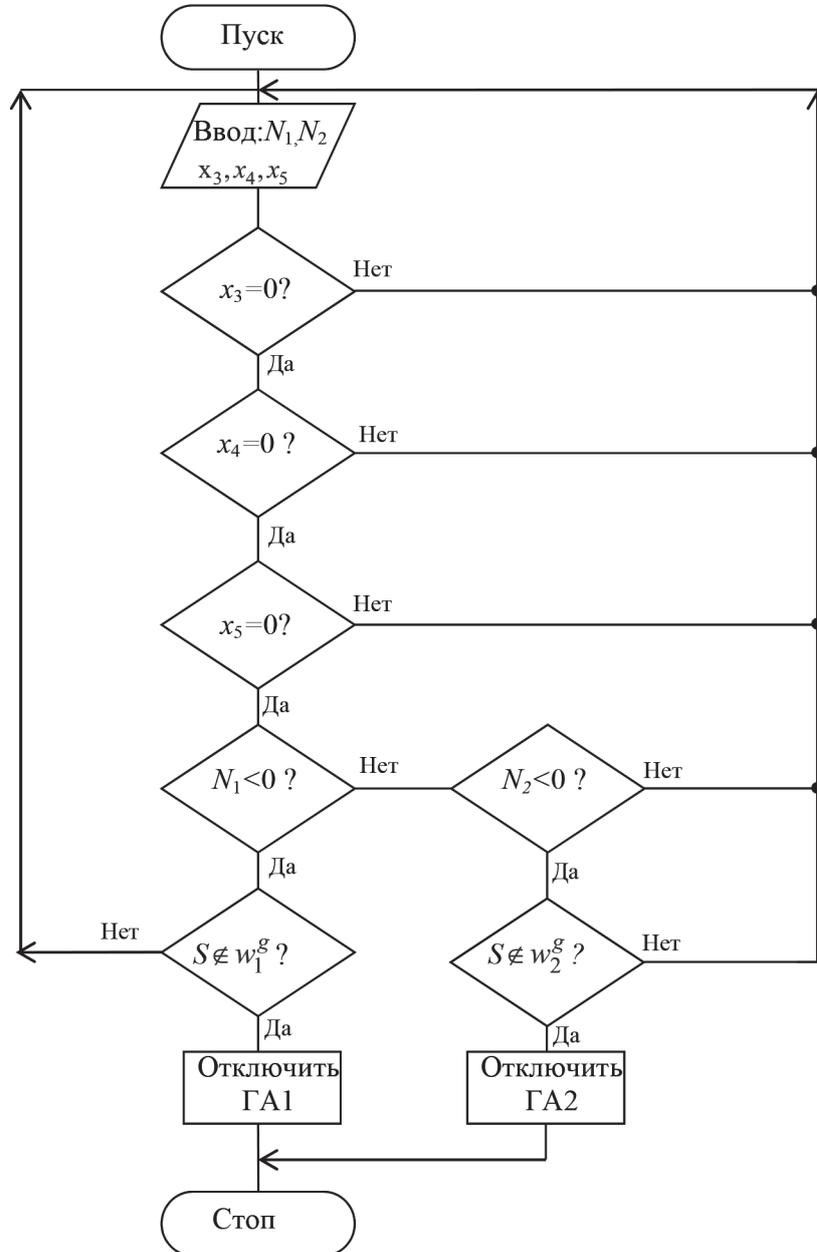


Рис. 4. Блок-схема алгоритма предупредительного управления СЭЭС при переходе ГА в двигательный режим работы

Время, необходимое для реализации предложенного алгоритма предупредительного управления, в существенной степени зависит от используемого оборудования. Однако при использовании обычных процессоров типа ATMEGA64A и векторного метода для проверки принадлежности точки  $S(N_1, N_2)$  треугольникам, заданным точками 0-1-2 и 0-3-4, оно составляет, менее 0,08 с, включая время размыкания автоматического выключателя. С учетом инерционности первичных двигателей можно считать, что отключение неработоспособного агрегата будет происходить мгновенно в момент перехода его генератора в двигательный режим, что позволит избежать перегрузки сети обратной мощностью.

### Обсуждение (Discussion)

Предлагаемый подход предполагает использование в целях экстренного диагностирования информации о границе области работоспособности ЭТС, заданной в пространстве параметров фазовых переменных  $\{\bar{Z}\}$ , что позволяет сократить время принятия решения и существенно упростить техническую реализацию средств предупредительного управления. Метод исключения омонимичных областей позволяет повысить достоверность результатов функционального диагностирования и исключить ложные отключения работоспособных элементов системы.

### Выводы (Summary)

В результате проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Применение первичных параметров  $\{\bar{X}\}$  при определении технического состояния ЭТС в ряде случаев приводит к недопустимой величине времени диагностирования в целях предупредительного управления. В этой связи наиболее предпочтительно использовать в качестве контролируемых параметров фазовые переменные  $\{\bar{Z}\}$ .
2. Сегментация области работоспособности ЭТС, построенной в пространстве внутренних параметров  $\{\bar{Z}\}$ , позволяет выделить омонимичные области, в которых применение контролируемого параметра  $Z_j^y$  приводит к появлению ошибок первого рода.
3. Предложенный метод исключения омонимичных областей позволяет повысить достоверность диагностирования ЭТС по сравнению с применяемым в управлении методом контроля ТС по независимым допускам за счет существенного сокращения ошибок первого рода.
4. Для предупредительного управления СЭЭС в случае перехода одного из ГА в двигательный режим работы может быть применен алгоритм, реализующий метод исключения омонимичных областей, обеспечивающий отключение неработоспособного агрегата непосредственно в момент появления обратной мощности.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.
2. 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.
3. Катусева Я. В. Методы параметрического синтеза на основе сеточного представления области работоспособности / Я. В. Катусева, Д. А. Назаров // Информационные технологии. — 2015. — Т. 21. — № 9. — С. 651–656.
4. Саушев А. В. Определение области работоспособности на основе алгоритма непрерывного поиска / А. В. Саушев [и др.] // Международный научно-исследовательский журнал. — 2017. — № 9-3 (63). — С. 68–71. DOI: 10.23670/IRJ.2017.63.087.
5. Саушев А. В. Области работоспособности электротехнических систем / А. В. Саушев. — СПб.: Политехника, 2013. — 412 с.
6. Назаров Д. А. Алгоритм построения гиперпараллелепипедов, вписанных в область работоспособности аналоговых технических систем / Д. А. Назаров // Труды международного симпозиума Надежность и качество. — 2015. — Т.1.— С. 88–90.
7. Винограденко А. М. Эллипсоидальная адаптация области допусков многопараметрических систем / А. М. Винограденко, А. В. Пасхальный // Известия ЮФУ. Технические науки. — 2019. — №1(203). — С. 118–129. DOI: 10.23683/2311-3103-2019-1-118-129.
8. Абрамов О. В. Проектирование технических систем с элементами настройки / О. В. Абрамов // Надежность и качество сложных систем. — 2014. — № 2 (6). — С. 51–55.

9. Овсянников А. С. Расчет контрольных допусков на параметры динамического объекта / А. С. Овсянников, М. А. Бурова // Инфокоммуникационные технологии. — 2015. — Т.13. — №3. — С. 345–350. DOI: 10.18469/ikt.2015.13.3.17.

10. Писарев В. И. Техническое обслуживание и ремонт металлообрабатывающих станков с ЧПУ на основе безразборной диагностики технического состояния / В. И. Писарев, В. А. Ваганов, А. Ф. Денисенко, И. О. Тютюрев // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. — 2014. — Т.16. — №1-2. — С. 508–514.

11. Миронов А. Н. Исследование вопросов моделирования границ области работоспособности элементов бортовой аппаратуры космических аппаратов на стадиях создания и эксплуатации / А. Н. Миронов [и др.] // Фундаментальные исследования. — 2015. — №2-13. — С. 2815–2818.

12. Печаткин А. В. Изменение подхода к использованию коррелированных и некоррелированных допусков номиналов электрорадиокомпонентов в поведенческих моделях электронных средств в процессах автоматизированного схемотехнического проектирования / А. В. Печаткин, А. Г. Кизимов, А. Н. Смирнов // Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П. А. Соловьева. — 2015. — №1(32). — С. 158–165.

13. Назаров Д. А. Подход к анализу параметрической чувствительности систем на основе дискретного представления областей работоспособности / Д. А. Назаров // Информатика и системы управления. — 2017. — №4 (54). — С. 94–104. DOI: 10.22250/isu.2017.54.94-104.

14. Саушев А. В. Методы назначения допусков на параметры технических систем путем линейной аппроксимации граничных точек / А. В. Саушев // Надежность и качество: тр. междунар. симп. — 2015. — Т. 1. — С. 144–147.

15. Широков Н. В. Диагностирование сложных судовых электротехнических устройств с учетом некомпенсированной погрешности / Н. В. Широков // Электрооборудование и автоматизация объектов водного транспорта: сб. науч. тр. — Л.: ЛИВТ, 1985. — С.132–138.

16. Саушев А. В. Алгоритмы синтеза номиналов и допусков многопараметрических систем / А. В. Саушев // Информационные технологии и вычислительные системы. — 2015. — № 3. — С. 65–73.

17. 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.

18. Саушев А. В. Морфологический анализ категории «электротехническая система» / А. В. Саушев // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова. — 2015. — № 1 (29). — С. 193–201. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-1-193-201.

19. Верфь Бешикташ спустила на воду головной рейдовый перевалочный комплекс Luft 1 // PortNews [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://portnews.ru/news/258414/> (дата обращения: 20.05.2018).

20. Берг М. Вычислительная геометрия. Алгоритмы и приложения / М. Берг [и др.]. — М.: ДМК-Пресс, 2016. — 438 с.

## REFERENCES

1. 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.

2. 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 admirala S. O. Makarova* 2 (36) (2016): 143–156. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-2-143-156.

3. 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.

4. Saushev, A. V., N. V. Shyrokov, V. S. Davydov, and D. A. Sherstnev. “Definition of the field of working capacity on the basis of algorithm of continuous searching of its border points.” *International Research Journal* 9-3(63) (2017): 68–71. DOI: 10.23670/IRJ.2017.63.087.

5. Saushev, A. V. *Oblasti rabotosposobnosti jelektrotehnicheskikh sistem*. SPb.:Politechnica, 2013.

6. Nazarov, D. A. “Alghoritm postroeniya giperparallelepipedov vpisannih v oblast rabotosposobnosti analogov ih tehnicheskikh sistem.” *Trudi mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost i kachestvo* 1 (2015): 88–90.

7. Vinogradenko, Aleksey Mihaylovich, and Aleksey Vladimirovich Pashal'niy. "Ellipsoidal adaptation of the field of tolerances in multivariable systems." *Izvestiya SFedU. Engineering Sciences* 1(203) (2019): 118–129. DOI: 10.23683/2311-3103-2019-1-118-129.

8. Abramov, O. V. "Proektirovanie tehniceskikh sistem s elementamy nastroyki." *Reliability and quality of complex systems* 2(6) (2014): 51–55.

9. Ovsyannikov, Aleksandr Sergeevich, and Maria AleksandrovnaBurova. "Computing of acceptance tolerance for dynamic object parameters." *Infokommunikacionnye tehnologii* 13.3 (2015): 345–350. DOI: 10.18469/ikt.2015.13.3.17.

10. Pisarev, Vladimir, Anton Vaganov, Alexander Denisenko, and Igor Tyuterev. "Maintenance and repair the metalworking tools with CNC on the basis of CIP diagnostics of the technical condition." *Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences* 16.1-2 (2014): 508–514.

11. Mironov, A. N., E. A. Mironov, O. L. Shestopalova, and S. A. Platonov. "Research of questions modeling of border areas functioning elements of onboard equipment spacecraft at the stage of creation and operation." *Fundamental research* 2-13 (2015): 2815–2818.

12. Pechatkin, A. V., A. G. Kizimov, and A. N. Smirnov. "Izmenenie podhoda k ispolzovaniyu korrelirovannih i nekorrelirovannih dopuskov nominalov elektroradiokomponentov v povedencheskikh modelyah elektronnykh sredstv v protsessah avtomatizirovannogo shemotehnicheskogo proektirovaniya." *Vestnik Rybinskoi gosudarstvennoi aviat-sionnoi tekhnologicheskoi akademii im. P. A. Solov'eva* 1(32) (2015): 158–165.

13. Nazarov, D. A. "Approach to system's parametric sensitivity analysis based on the discrete representation of efficiency areas." *Information Science and Control Systems* 4(54) (2017): 94–104. DOI: 10.22250/isu.2017.54/94-104.

14. Saushev, A. V. "Metody naznacheniya dopuskov na parametry tekhnicheskikh sistem putem lineinoi ap-proksimatsii granichnykh toчек." *Trudy mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* 1 (2015): 144–147.

15. Shirokov, N. V. "Diagnostirovanie slozhnykh sudovykh elektrotekhnicheskikh ustroystv s uchetom ne-kompensirovannoi pogreshnosti." *Elektrooborudovanie i avtomatizatsiya ob'ektov vodnogo transporta: sb. nauch. tr. L.: LIVT, 1985. 132–138.*

16. Saushev, A. V. "Synthesis algorithms of face values and admission of multiple parameter systems." *Information technologies and computing systems* 3 (2015): 65–73.

17. 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.

18. Saushev, A. V. "Morphological analysis of category electrotechnical system." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 1(29) (2015): 193–201. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-1-193-201.

19. "Verf" Beshiktash spustila na vodu glavnoi reidovyi perevalochnyi kompleks Luft 1." *Port News*. Web. 20 May 2018 <<http://portnews.ru/news/258414/>>.

20. Berg, M., O. Cheong, M. Krevel'd, and M. Overmars. *Vychislitel'naya geometriya. Algoritmy i prilozheniya*. M.: DMK–Press, 2016.

#### 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](mailto:Shirokovn@inbox.ru),  
[kaf\\_electroprivod@gumrf.ru](mailto: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](mailto:Shirokovn@inbox.ru),  
[kaf\\_electroprivod@gumrf.ru](mailto:kaf_electroprivod@gumrf.ru)

Статья поступила в редакцию 25 октября 2019 г.  
 Received: October 25, 2019.