

DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-3-430-441

PREVENTIVE PROTECTION OF SHIP'S ELECTRIC POWER SYSTEMS FROM OVERLOAD IN CASE OF ERRONEOUS ACTIONS OF THE CREW

N. V. ShirokovAdmiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
St. Petersburg, Russian Federation

Development of the method of preventive control for the purposes of safe operation of the ship's electric power system in emergency situations associated with errors of crew members when stopping generator sets during operation is considered in the paper. Special attention is paid to the development of the approach of preventive protection of equipment, which ensures the formation of a control action aimed at preventing the occurrence of an emergency situation on the ship at the time when the error has already been committed by the maintenance personnel, but the negative processes in the power system have not yet begun. It is shown that for such tasks, the decision-making time is extremely short and their solution is beyond the power of a human operator, so in this case it is advisable to use technical means that actively respond to the actions of the service personnel. For their development, a list of controlled parameters that have a significant impact on the flow of processes in the ship's power grid in the case of an illegal shutdown of a working generator set is provided in the paper. It is shown that in the case of predicting an abnormal operation mode of a ship's electric power system due to an erroneous shutdown of a functioning power source, two types of control actions are fundamentally possible, namely, blocking the signal for disconnecting the generator unit or disconnecting groups of electricity consumers and reducing the load on working machines. The results of analyzing the energy processes occurring in the ship's electric power system in the case of an operator error are shown in the paper. They are provided as logical expressions for each of the control signals. Based on the obtained equations, warning signals for the technical implementation of preventive protection that excludes the human factor influence are generated. The results of the research are written as the perfect disjunctive normal form of logical functions, and the resulting expressions are minimized. Special attention is paid to the development of a new specialized algorithm for preventive control, which provides preventive protection of the ship's electric power system from erroneous shutdowns of generator sets. A flowchart and a detailed description of this algorithm are provided. It is noted that it is necessary to take into account additional signs of the inoperable state of each of the working machines when forming the control action.

Keywords: ship electric power system, operator error, human factor, warning control, diagnostic feature, disconnecting consumers, overload of generator sets, preventive protection.

For citation:

Shirokov, Nikolaj V. "Preventive protection of ship's electric power systems from overload in case of erroneous actions of the crew." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova* 13.3 (2021): 430–441. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-3-430-441.

УДК 621.316:658.58

ПРЕВЕНТИВНАЯ ЗАЩИТА СУДОВЫХ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ОТ ПЕРЕГРУЗКИ ПРИ ОШИБОЧНЫХ ДЕЙСТВИЯХ ЭКИПАЖА

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

Статья посвящена развитию метода предупредительного управления в целях безопасной работы судовой электроэнергетической системы в нештатных ситуациях, связанных с ошибками членов экипажа при остановке генераторных агрегатов в процессе эксплуатации. Особое внимание уделено разработке подхода превентивной защиты оборудования, обеспечивающего формирование управляющего воздействия, направленного на предотвращение возникновения аварийной ситуации на судне в момент, когда ошибка обслуживающим персоналом уже совершена, но негативные процессы в энергосистеме еще не начались. Показано, что для подобного рода задач период реагирования на опасную ситуацию чрезвычайно мал и их

решение не под силу человеку-оператору, поэтому в данном случае целесообразно применять технические средства, активно реагирующие на действия обслуживающего персонала. Для разработки таких технических средств в статье рассмотрен перечень контролируемых параметров, оказывающих существенное влияние на протекание процессов в судовой электросети в случае неправомерного отключения работающего генераторного агрегата. Показано, что в случае прогнозирования нештатного режима работы судовой электроэнергетической системы вследствие ошибочного отключения функционирующего источника электроэнергии принципиально возможны два вида управляющих воздействий, а именно: блокировка сигнала отключения генераторного агрегата или отключение групп потребителей электроэнергии и снижение нагрузки на работающие машины. В работе приведены результаты анализа энергетических процессов, протекающих в судовой электроэнергетической системе в случае ошибки оператора, представленные в виде логических выражений для каждого из управляющих сигналов. На основе полученных уравнений сформированы предупредительные сигналы для технической реализации превентивной защиты, исключающей влияние человеческого фактора. Результаты исследований записаны в виде совершенной дизъюнктивной нормальной формы логических функций, а также выполнена минимизация полученных выражений. Особое внимание уделено разработке нового специализированного алгоритма предупредительного управления, обеспечивающего превентивную защиту судовой электроэнергетической системы от ошибочных отключений генераторных агрегатов. Приведена блок-схема и дано подробное описание данного алгоритма. Отмечена необходимость учета при формировании управляющего воздействия дополнительных признаков неработоспособного состояния каждой из работающих машин.

Ключевые слова: судовой электроэнергетической системы, ошибка оператора, человеческий фактор, предупредительное управление, диагностический признак, отключение потребителей, перегрузка генераторных агрегатов, превентивная защита.

Для цитирования:

Широков Н. В. Превентивная защита судовых электроэнергетических систем от перегрузки при ошибочных действиях экипажа / Н. В. Широков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2021. — Т. 13. — № 3. — С. 430–441. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-3-430-441.

Введение (Introduction)

Эксплуатация постоянно стареющего оборудования в сочетании с неблагоприятными факторами окружающей среды сопровождается авариями и чрезвычайными происшествиями в судовых электроэнергетических системах (СЭЭС) [1]–[3]. При этом наиболее вероятными оказываются угрозы техногенного характера. Так, для аварий, происходящих на ЭЭС, индекс вероятности возникновения угроз (ИБВУ) составляет 70,05. В то же время доля чрезвычайных ситуаций, возникающих, например, вследствие природных катаклизмов, характеризуется $ИБВУ = 41,7$ [4]. При этом стоимость ликвидации последствий различных аварий и катастроф весьма велика и может достигать в нашей стране 3 % от ВВП [5]. Данное обстоятельство предопределяет актуальность исследований, направленных на повышение безопасности функционирования СЭЭС и уменьшение вероятности возникновения аварийных ситуаций. При этом угрозы техногенного характера во многом обусловлены ошибками обслуживающего персонала, которые особенно часто происходят в период нештатного режима работы СЭЭС, связанного с выходом из строя оборудования [6]–[8]. В отдельных случаях доля таких ситуаций может достигать 70–90 % от общего числа отказов [9], [10], что вызвано прежде всего монотонным характером работы операторов, недостаточным уровнем подготовки, связанным с отсутствием практических навыков управления СЭЭС в условиях отказа ее элементов, в опасных ситуациях и условиях аварии. В этой связи в последнее время особенно интенсивно развиваются научно-технические методы, обеспечивающие активное обучение обслуживающего персонала на основе специальных программ и тренажеров, имитирующих не только нормальные, но и нештатные режимы функционирования СЭЭС [11]–[13]. Применение данных подходов позволяет существенно повысить компетентность работников, обслуживающих сложные СЭЭС и повысить безопасность их эксплуатации.

Следует отметить, что снижение аварийности, тем или иным образом связанной с человеческим фактором, невозможно без разработки нового оборудования, учитывающего процессы взаимодействия оперативного персонала и технических средств управления СЭЭС. В данной связи

следует отметить работы, рассматривающие человеко-машинный комплекс как единую систему, ведущая роль в которой принадлежит оператору. Это объясняется тем, что мозг человека способен прогнозировать события, анализируя сразу несколько видов неоднозначной информации, и обладает способностью адекватно реагировать на изменяющиеся условия функционирования оборудования. В то же время средства технического управления осуществляют свои функции с более высокой точностью и быстродействием, на их работе не сказываются эмоциональные и физические нагрузки [14], [15]. Практическая реализация синтеза достоинств человека и аппаратуры управления СЭЭС позволяет перейти к созданию технических систем, адаптивных к функциям обслуживающего персонала. Данный подход в целом позволяет существенно уменьшить число аварий техногенного характера, вызванных ошибками оператора, но не может предотвратить их полностью, так как даже хорошо подготовленный психологически, знающий и обладающий профессиональными навыками специалист время от времени допускает серьезные оплошности. По этой причине возникли и нашли применение *методы управления психическим состоянием обслуживающего персонала ЭЭС*, основанные на использовании функциональной музыки, чередовании режимов труда и отдыха, улучшении эстетических и санитарно-гигиенических условий труда [14].

Особенно отчетливо влияние человеческого фактора на аварийность проявляется при эксплуатации СЭЭС [16]–[18]. Это вызвано особыми условиями труда обслуживающего персонала, связанными с оторванностью от дома, ограниченным кругом общения, стесненностью помещений, шумами и вибрацией в рабочей зоне оборудования, высокой температурой и влажностью. При этом сокращение численности экипажей привело к тому, что на большинстве судов в штате остался только один электромеханик, а в некоторых случаях его обязанности возложены на старшего механика и матроса-электрика. В связи с этим выполняющий свои профессиональные обязанности специалист время от времени склонен совершать те или иные ошибки. При этом особенно часто возникает вопрос о некомпетентности сотрудников при работе в нештатной ситуации, отсутствии возможности совместно обсудить проблему, а также обеспечить передачу опыта эксплуатации. Кроме того, серьезное психологическое давление на операторов обусловлено высокой степенью ответственности за обеспечение электроснабжения судна, особенно во время прохождения узкостей, при маневрировании, работе в штормовых условиях, когда цена ошибки кратно возрастает. В этой связи для флота особую актуальность приобретает научно-техническая задача по разработке специальных методов и технических средств, обеспечивающих предотвращение ошибочных действий экипажа.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Современные методы, обеспечивающие предотвращение ошибочных действий экипажей судов с помощью технических средств, можно разделить на две группы. К первой группе следует отнести подходы, обеспечивающие выдачу своевременных рекомендаций обслуживаемому персоналу о целесообразности выполнения определенных операций в нештатных ситуациях. Технические средства, реализующие задачи этой группы, являются пассивными с точки зрения реагирования на действия оператора. Они не оказывают влияние на его работу, осуществляя вспомогательные функции по управлению, а также предоставляя информацию о путях решения проблемы и наиболее вероятных результатах управляющего воздействия. В этом случае обслуживающий персонал сам, на основе своего опыта и технической интуиции, с учетом полученных данных принимает решение о воздействии на объект управления, причем не обязательно совпадающее с рекомендациями, выданными аппаратурой. К такому оборудованию относятся системы предотвращения столкновений между морскими судами [19]–[21], предоставляющие судоводителю информацию о наиболее предпочтительных действиях, например, для безопасного расхождения в условиях акватории порта.

Задачи, решаемые техническими средствами, рекомендуя выполнение тех или иных операций, с одной стороны, обычно предполагают наличие интервала времени, вполне достаточного для их решения, а с другой стороны, имеют много вводных рекомендаций, отображающих параметры противоречивого характера, иногда предполагающие противоположные действия. Это

чрезвычайно сложная проблема для искусственного интеллекта и роль человеческого фактора в подобной ситуации очень велика.

Ко второй группе методов, обеспечивающих предотвращение ошибочных действий экипажей судов с помощью технических средств, можно отнести те из них, которые реализуют превентивную защиту оборудования. При этом аппаратура должна обеспечивать формирование управляющего воздействия в ситуации, когда ошибка обслуживающим персоналом уже совершена, но негативные процессы, например, в СЭЭС, еще не начались. В данном случае время принятия решения ничтожно мало и осуществить эффективное воздействие на объект управления обычно не под силу человеку-оператору. К тому же в большинстве случаев перечень контролируемых параметров, оказывающих существенное влияние на функционирование электроэнергетической системы, определен. При этом для технических средств имеется возможность заранее вполне адекватно оценить последствия возможных ошибочных действий обслуживающего персонала, принять своевременные решения и осуществить необходимые операции для их нейтрализации. Это чрезвычайно важная задача, от решения которой зависит работоспособность ЭЭС и судна в целом, а иногда и сохранение жизни членов экипажа. В то же время технические средства, выполняющие подобные функции, не разработаны и на флоте практически не применяются. Исключение составляют приборы программируемого запуска подруливающих устройств и других потребителей, создающих нагрузку на сеть, соизмеримую с мощностью генераторного агрегата (ГА). В данном случае наиболее опасным является необоснованное снижение мощности или отключение хотя бы одного из работающих источников электроэнергии. Примером может служить ошибка оператора, повлекшая за собой катастрофические последствия на крупнейшей в США аварии на атомной электростанции Три-Майл-Айленд. На водном транспорте неправомерное отключения ГА обычно приводит к перегрузке сети, обесточиванию судна, потере его управляемости и хода, что создает аварийную ситуацию, чреватую непосредственной опасностью для его экипажа, а зачастую и других судов.

Для разработки технических средств, обеспечивающих превентивную защиту СЭЭС от перегрузки, возникающей вследствие ошибочного отключения одного из работающих ГА, полезно воспользоваться *методом предупредительного управления*, описанном в работе [22]. В рамках указанного подхода осуществляется процесс формирования такого воздействия на СЭЭС, в результате которого ее техническое состояние после срабатывания защиты будет соответствовать усеченной области правильного функционирования. В этой связи при поступлении команды на отключение ГА анализируют режим работы СЭЭС, и если отключение агрегата приведет к перегрузке сети, то формируют управляющее воздействие, направленное на предотвращение аварийной ситуации [23]. В случае прогнозирования нештатного режима работы СЭЭС, характеризующегося загрузкой хотя бы одного из работающих агрегатов выше допустимого значения, принципиально возможны два вида управляющих воздействий, а именно:

- прекращение процесса отключения (остановки) ГА — блокировка сигнала отключения;
- изменение режима функционирования СЭЭС — отключение групп потребителей электроэнергии и снижение нагрузки на работающие агрегаты.

Обозначим управляющее воздействие, разрешающее отключение ГА, как Y_1 , Y_2 — блокировка сигнала отключения и Y_3 — отключение выбранных групп потребителей. При этом в случае параллельной работы двух агрегатов (ГА1 и ГА2) можно выделить три сигнала, характеризующие режим работы электроэнергетической системы: X_1 — ГА1 исправен; X_2 — ГА2 исправен, суммарная нагрузка сети P_s меньше допустимого значения — P_{lim} . Тогда, воспользовавшись функционально-логическим методом, запишем логические выражения для каждого из управляющих воздействий. Если в момент нажатия кнопки «Стоп» первого агрегата ГА1 и ГА2 исправны и нагрузка сети меньше допустимого значения ($P_s < P_{lim}$), то осуществляется функция отключения и остановки ГА1. При этом все условия отключения и останова агрегата находятся в штатном режиме эксплуатации.

Логическую функцию, описывающую данный процесс, можно представить следующим образом:

$$X_1 \wedge (P_s < P_{\text{lim}}) \wedge X_2 = Y_1. \quad (1)$$

Если ГА1 и ГА2 исправны, но нагрузка сети больше допустимого значения, то выполняется блокировка отключения агрегата. В этом случае останов первой машины приведет к перегрузке и отключению защитой второго агрегата и аварийной ситуации, вызванной обесточиванием судна. Блокировка отключения позволит избежать аварии СЭЭС. Процесс управления отключением ГА1 в этом случае опишем следующим логическим уравнением:

$$X_1 \wedge (P_s \geq P_{\text{lim}}) \wedge X_2 = Y_2. \quad (2)$$

Если ГА1 исправен и условие $P_s < P_{\text{lim}}$ выполняется, но ГА2 неработоспособен, то отключение первой машины также блокируется. Это достаточно часто встречающаяся ситуация, когда при отклазе одного ГА по ошибке останавливают другой. В данном случае после отключения исправного агрегата вся нагрузка, пусть и допустимая, переводится на неработоспособный ГА, который через определенный промежуток времени отключается защитой, в результате чего происходит обесточивание судна. Соответствующая логическая функция может быть записана в виде

$$X_1 \wedge (P_s < P_{\text{lim}}) \wedge \overline{X_2} = Y_2. \quad (3)$$

Если ГА1 исправен, а ГА2 неработоспособен и нагрузка сети больше допустимого значения, то осуществляют блокировку сигнала останова первой машины. При этом отключение исправного агрегата приведет к перегрузке неработоспособного ГА, его отключению защитой и обесточиванию судна. Остановка вышедшего из строя второго агрегата в данном случае нерациональна, так как по сигналу о его неисправности запускается резервная машина и, возможно, она примет на себя нагрузку до момента срабатывания защиты. В противном случае сработает штатная система превентивного отключения выбранной группы потребителей, произойдет разгрузка сети и оставшийся работоспособным первый агрегат примет на себя оставшуюся нагрузку, продолжив работу в штатном режиме. Логическое условие блокировки отключения ГА1 можно представить следующим образом:

$$X_1 \wedge (P_s \geq P_{\text{lim}}) \wedge \overline{X_2} = Y_2. \quad (4)$$

В случае, если ГА1 вышел из строя, ГА2 работоспособен, а нагрузка сети меньше допустимой величины, то выполняют команду оператора на отключение первого агрегата. Это правильное решение обслуживающего персонала СЭЭС в условиях нештатной ситуации, вызванной отказом источника электроэнергии. Своевременное отключение отказавшей машины предотвратит дальнейшее развитие дефекта, а ГА2 примет допустимую нагрузку без перегрузки. Логическое выражение, соответствующее данному режиму работы, представим в виде следующего уравнения:

$$\overline{X_1} \wedge (P_s < P_{\text{lim}}) \wedge X_2 = Y_1 \quad (5)$$

Если оба ГА неработоспособны, а нагрузка сети меньше допустимого значения, то наиболее целесообразно отключить ГА1 по команде обслуживающего персонала. В данном случае опасно блокировать отключение отказавшего агрегата (например, при неисправной системе защиты). В то же время вторая машина в течение некоторого времени продолжит снабжать судно электроэнергией и, возможно, успеет запуститься резервный ГА. При этом, как показано в публикации [22], в данной ситуации может быть осуществлен превентивный запуск аварийного дизель-генератора, время включения на нагрузку которого существенно меньше, чем у резервного агрегата. Логическую функцию, описывающую данный процесс, можно представить в следующем виде:

$$\overline{X_1} \wedge (P_s < P_{\text{lim}}) \wedge \overline{X_2} = Y_1. \quad (6)$$

Если ГА1 неработоспособен, а ГА2 исправен, но нагрузка сети превысила допустимую величину, то осуществляют отключение выбранных групп потребителей с последующим отключением первого агрегата. В данном случае непосредственное выполнение команды оператора приведет к перегрузке исправной машины и обесточиванию судна. В этой связи до отключения ГА1 предполагается разгрузка СЭЭС, после которой неработоспособный агрегат может быть безопасно от-

ключен. Задержка в отключении составит менее одной десятой доли секунды и для данного случая является пренебрежимо малой величиной. Логическое уравнение, описывающее управление в данном режиме функционирования электроэнергетической системы, запишем в виде

$$\overline{X_1} \wedge (P_s \geq P_{\lim}) \wedge X_2 = Y_3. \quad (7)$$

В чрезвычайно сложной ситуации, при которой оба ГА вышли из строя и нагрузка сети выше допустимой величины, по команде оператора наиболее целесообразно выполнить разгрузку СЭЭС с последующим отключением первой машины. В данном случае приходится ограничиться соображениями, изложенными при обосновании вида управляющего воздействия в режиме работы СЭЭС, описанном уравнением (6), и надеждой на техническую интуицию членов экипажа, принимающих решение об остановке ГА1. При этом следует отметить, что вероятность наступления такого события чрезвычайно мала и все возможные ресурсы для исключения обесточивания в данном случае будут реализованы. Логическое выражение, соответствующее данному режиму работы, представим следующим образом:

$$\overline{X_1} \wedge (P_s \geq P_{\lim}) \wedge \overline{X_2} = Y_3. \quad (8)$$

На основании логических выражений, описывающих взаимосвязь режимов работы СЭЭС и управляющих воздействий, направленных на предотвращение аварийной ситуации (1)–(8), составим систему уравнений, характеризующих указанную зависимость в виде совершенной дизъюнктивной нормальной формы:

$$\begin{cases} (X_1 \wedge (P_s < P_{\lim}) \wedge X_2) \vee (\overline{X_1} \wedge (P_s < P_{\lim}) \wedge X_2) \vee (\overline{X_1} \wedge (P_s < P_{\lim}) \wedge \overline{X_2}) = Y_1; \\ (X_1 \wedge (P_s < P_{\lim}) \wedge \overline{X_2}) \vee (X_1 \wedge (P_s \geq P_{\lim}) \wedge \overline{X_2}) \vee (X_1 \wedge (P_s \geq P_{\lim}) \wedge X_2) = Y_2; \\ (\overline{X_1} \wedge (P_s \geq P_{\lim}) \wedge X_2) \vee (\overline{X_1} \wedge (P_s \geq P_{\lim}) \wedge \overline{X_2}) = Y_3. \end{cases} \quad (9)$$

После минимизации полученных выражений, запишем:

$$\begin{cases} (X_1 \wedge (P_s < P_{\lim}) \wedge X_2) \vee (\overline{X_1} \wedge (P_s < P_{\lim})) = Y_1; \\ (X_1 \wedge (P_s < P_{\lim}) \wedge \overline{X_2}) \vee (X_1 \wedge (P_s \geq P_{\lim})) = Y_2; \\ \overline{X_1} \wedge (P_s \geq P_{\lim}) = Y_3. \end{cases} \quad (10)$$

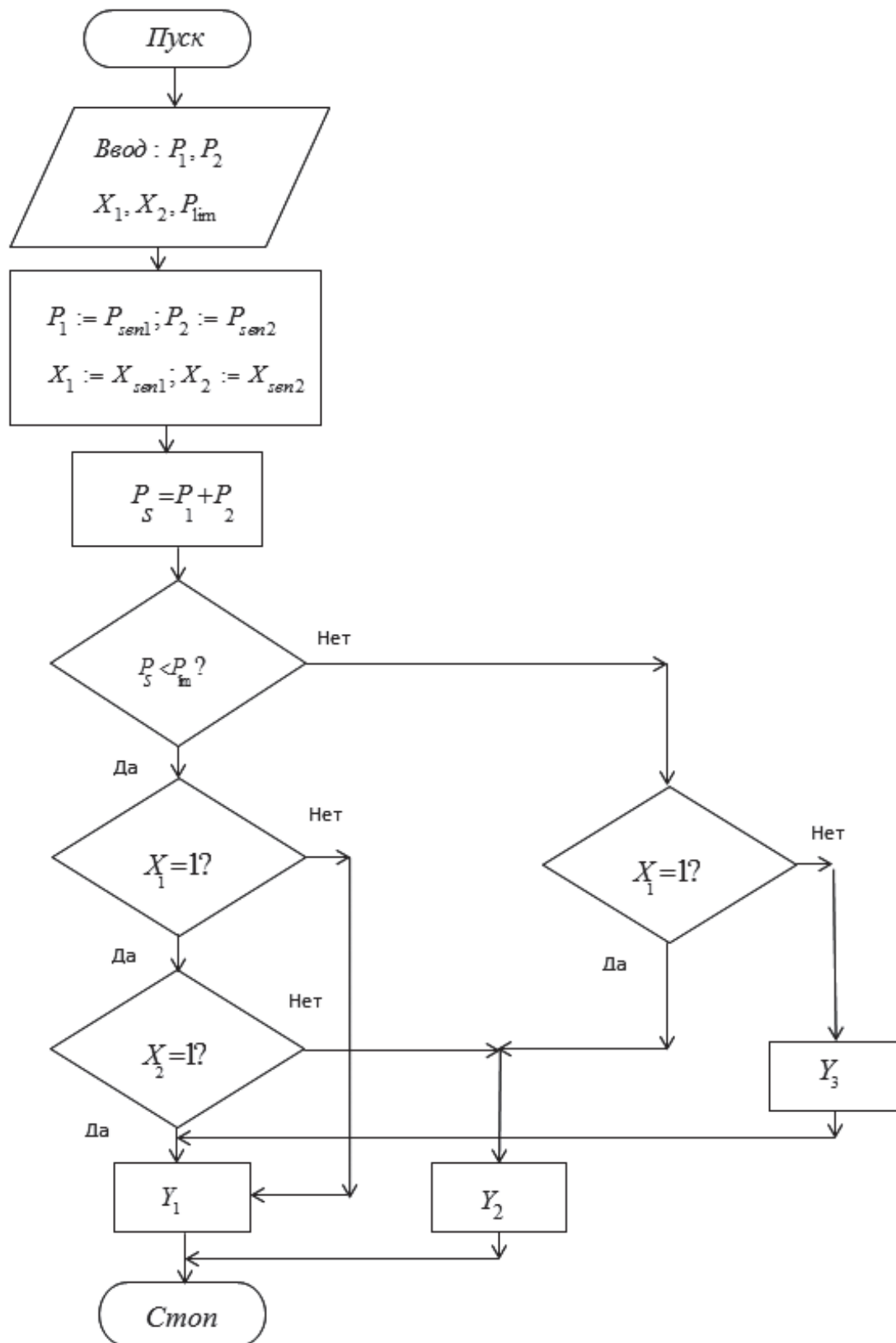
Данные логические выражения позволяют разработать специализированные технические средства, обеспечивающие превентивную защиту СЭЭС от ошибочных действий членов экипажа при отключении ГА.

Результаты (Results)

На основании полученных результатов, записанных в виде выражений (10), для случая параллельной работы двух агрегатов в составе СЭЭС разработан алгоритм предупредительного отключения ГА, блок-схема которого представлена на рисунке (с. 436).

При нажатии кнопки «Стоп» системы дистанционного автоматического управления первого агрегата формируется команда «Пуск» программы, по которой вводятся контролируемые параметры, получаемые от датчиков активной нагрузки P_{sen1}, P_{sen2} , а также системы определения технического состояния генераторных агрегатов X_1, X_2 и вычисляется величина суммарной нагрузки сети в данный момент времени P_s . Затем выполняется сравнение P_s с максимально допустимой величиной нагрузки, которую сможет принять ГА2 после отключения первой машины $P_{\lim}$. Если условие $P_s < P_{\lim}$ выполняется, то проверяют сигналы, характеризующие техническое состояние ГА1 и ГА2 и если они работоспособны или вышел из строя только ГА1, то отключают первую машину. Если оказался неработоспособным второй агрегат, то блокируют отключение ГА1. В ситуации, при которой нагрузка сети превышает допустимое значение и условие $P_s < P_{\lim}$ не выполняется,

проверяют ТС первого агрегата и если он вышел из строя, то отключают выбранную группу потребителей, а затем отключают ГА1. В момент времени, когда оператор подает команду на останов первой машины при условии, что неравенство $P_s < P_{lim}$ не выполняется и отключаемый агрегат работоспособен, действия обслуживающего персонала блокируются.



Блок-схема алгоритма предупредительного отключения ГА

В данном случае для оценки ТС агрегатов можно воспользоваться информацией, получаемой от датчиков минимального давления смазочного масла или температуры охлаждающей воды дизеля. На сигналы с подобных датчиков настроены аварийно-предупредительная сигнализация и система защиты СЭЭС, однако этого недостаточно. В случае отказа, например, топливной системы первичного двигателя ГА он перейдет в двигательный режим и будет отключен защитой от обратной мощности. При этом интервал времени от момента возникновения дефекта до перехода неработоспособного агрегата в двигательный режим может составить до 20 с. В течение этого времени члены экипажа и система защиты будут определять вышедший из строя агрегат как работоспособный. Данное обстоятельство может привести к ошибочному отключению оператором агрегата, работающего параллельно с вышедшей из строя машиной, и к обесточиванию сети.

В связи с ранее изложенным, в целях своевременной идентификации ТС работающих ГА целесообразно воспользоваться методом, основанном на анализе перераспределения нагрузок в СЭЭС, описанном в работе [24]. В рамках данного подхода измеряют величину неравномерности загрузки ГА и определяют момент отклонения последней за пределы уставки, соответствующей $\Delta P_{\text{пл}}$, затем определяют момент, когда загрузка одного ГА уменьшается, а загрузка другого ГА увеличивается и при совпадении этих моментов ГА признают неработоспособным тот, загрузка которого уменьшается. При этом идентификация неработоспособного состояния машины осуществляется в течение нескольких секунд после возникновения отказа, что существенно повышает безопасность выполнения команды на отключение агрегата.

К недостаткам данного базового способа определения неработоспособного агрегата можно отнести возможность появления ошибки второго рода при синхронизации генераторов и в случае перехода с ручного на автоматический режим управления. Для повышения достоверности диагностирования в публикации [25] был применен способ исключения омонимичных областей, заключающийся в том, что при использовании диагностического параметра, определяющего неработоспособное состояние ГА, из процесса диагностирования исключают режимы функционирования СЭЭС, соответствующие данным областям. В этих режимах средства диагностирования будут определять техническое состояние исправного ГА как неработоспособное [26]. При этом в статье [25] сформулирован диагностический признак (I_i , $i = 1, 2, \dots, n$, где n — количество работающих в данный момент ГА), позволяющий идентифицировать ГА со снижающейся нагрузкой как неработоспособный, а именно:

$$I_i = L_1 \wedge (L_2 > L_{\text{lim}}) \wedge (\overline{w_1^g} \wedge \overline{w_5^g}), \quad (11)$$

где L_1 — событие, заключающееся в том, что нагрузка одного агрегата увеличивается, а другого уменьшается; L_2 — величина разности нагрузок параллельно работающих генераторов; L_{lim} — допустимая (заданная) разность нагрузок параллельно работающих генераторов; w_1^g — усеченная область правильного функционирования СЭЭС, соответствующая режиму включения ГА на параллельную работу; w_5^g — усеченная область правильного функционирования СЭЭС, соответствующая переключению с ручного на автоматический режима работы ГА.

Обсуждение (Discussion)

Предложенный подход превентивной защиты СЭЭС от перегрузки в случае ошибочных действий экипажа позволяет существенным образом сократить влияние человеческого фактора при выполнении операций остановки генераторных агрегатов. При этом применение подобных технических средств на судах никак не регламентировано «Правилами классификации и постройки морских судов РМРС», что не совсем верно, так как их использование способно повысить безопасность работы СЭЭС. В рамках данной статьи не исследовалась возможность реализации предложенного подхода для остановки ГА посредством кнопки «Аварийный стоп», при использовании которой разработанные логические выражения для определения управляющих воздействий могут быть несколько скорректированы.

Выводы (Summary)

На основании проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Современные средства управления не обеспечивают защиту электроэнергетических систем, в том числе и судовых, от ошибочных действий обслуживающего персонала при остановках генераторных агрегатов, что может привести к тяжелым авариям.

2. Для решения задачи безаварийной эксплуатации СЭЭС при остановке ГА обосновано использование метода предупредительного управления, осуществляемого в нештатных режимах работы электроэнергетической системы посредством блокировки команды на останов источника электроэнергии или отключения выбранной группы потребителей с последующим выполнением команды на останов агрегата. При этом СЭЭС переходит в режим правильного функционирования после отключения ГА, минуя перегрузку.

3. Разработанный алгоритм предупредительного управления позволяют сравнительно просто избежать аварии в СЭЭС, вызванной ошибкой членов экипажа в процессе остановки ГА, и может использоваться в других автономных электроэнергетических системах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гвоздев Е. В. Методология анализа показателей влияния человеческого фактора на комплексную безопасность электроэнергетических предприятий / Е. В. Гвоздев, Е. Б. Грибанова, Ю. Г. Матвиенко // Безопасность труда в промышленности. — 2020. — № 12. — С. 38–43. DOI: 10.24000/0409-2961-2020-12-38-43.

2. Кузнецов П. А. Комплексная система защиты потребителей электроэнергии от аварийных режимов работы / П. А. Кузнецов, О. А. Степанов // Вестник Московского авиационного института. — 2016. — Т. 23. — № 4. — С. 145–154.

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

4. Зубок Ю. А. Угрозы в трансформирующейся среде обитания как фактор социальных рисков: прогнозирование и регулирование / Ю. А. Зубок, В. И. Чупров // Социологические исследования. — 2017. — № 5 (397). — С. 57–67.

5. Магид С. И. Человеческий фактор и энергобезопасность на современном этапе развития электроэнергетики / С. И. Магид // Энергосбережение и водоподготовка. — 2006. — № 3 (41). — С. 55–62.

6. 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.

7. 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.

8. Kondratyeva O. E. Analysis of the Applicability of Key Risk Assessment Methods for Solving Problems of Reducing Accidents at Energy Facilities / O. E. Kondratyeva, 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.

9. Магид С. И. Надежность электроэнергетики и нормирование тренажерной подготовки персонала / С. И. Магид, Е. Н. Архипова // Надежность и безопасность энергетики. — 2011. — № 1 (12). — С. 24–33.

10. Коновалов Ю. В. Повышение безопасности эксплуатации электротехнических комплексов систем электроснабжения при их интеллектуализации / Ю. В. Коновалов, Н. В. Кузнецова // Вестник Иркутского государственного технического университета. — 2017. — Т. 21. — № 1 (120). — С. 103–112. DOI: 10.21285/1814-3520-2017-1-103-112.

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

12. Никоноров А. Н. Разработка учебно-исследовательской АСУТП энергоблока с парогазовой установкой / А. Н. Никоноров [и др.] // Автоматизация в промышленности. — 2021. — № 2. — С. 38–43. DOI: 10.25728/avtprom.2021.02.07.

13. Бойко Е. А. Формирование профессиональных цифровых компетенций при реализации многоуровневой модели проектно-ориентированной подготовки теплоэнергетиков / Е. А. Бойко // Энергобезопасность и энергосбережение. — 2021. — № 1. — С. 61–71. DOI: 10.18635/2071-2219-2021-1-61-71.

14. Окорочков Р. В. Роль человеческого фактора в управлении энергетическими объектами в условиях цифровой трансформации / Р. В. Окорочков, А. А. Тимофеева // Фундаментальные и прикладные исследования в области управления, экономики и торговли: сб. трудов всероссийской научной и учебно-практической конференции. В 3 ч. — СПб.: ИПЦ СПбПУ «ПОЛИТЕХ-ПРЕСС», 2020. — С. 96–101.

15. 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 (RusAutoCon). — IEEE, 2020. — Pp. 374–379. DOI: 10.1109/RusAutoCon49822.2020.9208070.

16. 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.

17. 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.

18. 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.

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

22. 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.

23. Пат. 2731756 Российская Федерация, МПК H02H 3/08. Способ предупредительного управления отключением генераторного агрегата / Н. В. Широков; заяв. и патентообл. Н. В. Широков. — № 2020105350; заявл. 04.02.2020; опубл. 08.09.2020, Бюл. № 25. — 13 с.

24. Пат. 2715555 Российская Федерация, МПК H02H 3/08. Способ определения неработоспособного генераторного агрегата / Н. В. Широков; заяв. и патентообл. ООО «Форпик стандарт сервис». — № 2019137276; заявл. 19.11.2019; опубл. 02.03.2020, Бюл. № 7. — 9 с.

25. 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.

26. 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.

REFERENCES

1. Gvozdev, E. V., E. B. Gribanova, and Yu. G. Matvienko. "Methodology for analysis of the indicators of the human factor effect on the integrated safety and security of electric power enterprises." *Occupational safety in industry* 12 (2020): 38–43. DOI: 10.24000/0409-2961-2020-12-38-43.
2. Kuznetsov, Pavel, and Oleg Stepanov. "Combined system for electric power consumers protection against emergency states." *Aerospace MAI Journal* 23.4 (2016): 145–154.

3. Bulatov, Yury N., and Andrey V. Kryukov. "Emergency control of distributed generation plants." *Electrical Technology Russia* 2 (2019): 18–25. DOI: 10.24160/0013-5380-2019-2-18-25.
4. Zubok, Yulia A., and Vladimir I. Chuprov. "Threats in a transforming living environment as a factor of social risks: forecasting and regulation." *Sociological Research* 5(397) (2017): 57–67.
5. Magid, S. I. "Chelovecheskii faktor i energobezопасnost' na sovremennom etape razvitiya elektroenergetiki." *Energobezопасnost i vodopodgotovka* 3(41) (2006): 55–62.
6. 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/BulEF51036.2020.9326058.
7. 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.
8. 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.
9. Magid, S. I., and E. N. Arkhipova. "Nadegnost elektroenergetiki i normirovaniye trenagernoy podgonovki personala." *Nadegnost i bezопасnost energetiki* 1(12) (2011): 24–33.
10. Konovalov, Yuriy V., and Natalia V. Kuznetsova. "Improving operation safety of electrical complexes of power supply systems under their intellectualization." *Proceedings of Irkutsk State Technical University* 21.1(120) (2017): 103–112. DOI: 10.21285/1814-3520-2017-1-103-112.
11. 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.
12. Nikonorov, A. N., I. K. Muravyov, E. D. Marshalov, and T. E. Muravyova. "Razrabotka uchebno-issledovatel'skoy ASUTP energobloka s parogazovoy ustanovkoj." *Avtomatizatsiya v promyshlennosti* 2 (2021): 38–43. DOI: 10.25728/avtprom.2021.02.07.
13. Boiko, Evgeny. "Digital skill development in project-based learning of heat power engineering students." *Energy Safety and Energy Economy* 1 (2021): 61–71. DOI: 10.18635/2071-2219-2021-1-61-71.
14. Okorokov, R. V., and A. A. Timofeeva. "The role of the human factor in the energy objects management in the context of digital transformation." *Fundamentalnye i prikladnye issledovaniya v oblasti upravleniya, ekonomiki i torgovli: sb. Nauch. Tr.* SPb: POLITEH-PRESS, 2020. 96–101.
15. 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.
16. Belov, O. A. "The methodology of analysis and monitoring of ship safety as difficult technical-organizational system." *Vestnik Kamchatskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* 34 (2015): 12–18. DOI: 10.17217/2079-0333-2015-34-12-18.
17. 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.
18. 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.
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. 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.

22. 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.

23. Shirokov, N. V. RU 2 731 756 C1, IPC H02H 3/08. Method for preventive control of generator unit switching off. Russian Federation, assignee. Publ. 8 Sept. 2020.

24. Shirokov, N. V. RU 2 715 555 C1, IPC H02H 3/08. Sposob opredeleniya nerabotosposobnogo generatornogo agregata. Russian Federation, assignee. Publ. 2 June 2020.

25. Saushev, Alecsandr, 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.

26. 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.

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 5 мая 2021 г.
Received: May 5, 2021.