

Научная статья

DOI: 10.15593/2224-9397/2024.2.04

УДК 621.316.658.58

Н.В. ШироковГосударственный университет морского и речного флота имени адмирала
С.О. Макарова, Санкт-Петербург, Российская Федерация**ПРЕВЕНТИВНАЯ ЗАЩИТА ОТ ОБРАТНОЙ МОЩНОСТИ
СУДОВЫХ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ
ПРИ ОТКАЗЕ ИХ ЭЛЕМЕНТОВ**

Современные средства защиты судовых электроэнергетических систем не эффективны в случае несанкционированного изменения подачи топлива в первичный двигатель хотя бы одного из работающих генераторных агрегатов, что может привести к гибели судна, его пассажиров и членов экипажа. В связи с этим особую актуальность имеют исследования, направленные на разработку подходов, обеспечивающих предотвращение нештатной работы генераторных агрегатов судовых электростанций в двигательном режиме. **Цель исследования:** развитие метода превентивной защиты от обратной мощности судовой электроэнергетической системы при несанкционированном изменении подачи топлива в первичный двигатель хотя бы одного из работающих генераторных агрегатов. **Методы:** разработан новый метод превентивной защиты судовой электроэнергетической системы от обратной мощности, обеспечивающий идентификацию неработоспособного состояния системы до перехода хотя бы одного из работающих генераторов в двигательный режим и определение агрегата, отключение которого предотвратит появление обратной мощности в системе. **Результаты:** сформулирован оригинальный диагностический признак, согласно которому система признается неработоспособной в момент, когда происходит разнонаправленное изменение нагрузки генераторных агрегатов, а разность нагрузок генераторов превысила допустимое значение и продолжает увеличиваться. Показано, что в данном случае целесообразно осуществлять превентивную разгрузку сети. При этом если в результате уменьшения нагрузки сети нагрузка одного из генераторных агрегатов будет увеличиваться, то этот агрегат, согласно предложенному методу, подлежит отключению. Если в результате разгрузки сети нагрузка всех машин уменьшится, то целесообразно отключить генераторный агрегат, нагрузка которого уменьшалась до момента уменьшения нагрузки сети. Предоставлена функциональная схема устройства, обеспечивающего практическую реализацию предложенного подхода. **Практическая значимость:** применение предложенного метода превентивной защиты позволяет предотвратить возникновение аварийной ситуации на судне в случае несанкционированного изменения подачи топлива в первичный двигатель хотя бы одного из параллельно работающих генераторных агрегатов.

Ключевые слова: генераторный агрегат, обратная мощность, двигательный режим, превентивная защита, нештатная ситуация, судовая электроэнергетическая система.

N.V. Shirokov

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

PREVENTIVE PROTECTION AGAINST REVERSE POWER OF MARINE ELECTRIC POWER SYSTEMS IN CASE OF FAILURE OF THEIR ELEMENTS

Modern means of protecting ship's electric power systems are not effective in the event of an unauthorized change in the fuel supply to the primary engine of at least one of the operating generator sets, which can lead to the death of the ship, its passengers and crew members. In this regard, research aimed at developing approaches to prevent abnormal operation of generator sets of marine power plants in propulsion mode is of particular relevance. Purpose of the study: development of a method of preventive protection against reverse power of a ship's electrical power system in the event of an unauthorized change in the fuel supply to the prime mover of at least one of the operating generating sets. Methods: a new method of preventive protection of the ship's electric power system from reverse power has been developed, which provides identification of the inoperable state of the system before at least one of the operating generator sets switches to motor mode and determines the unit, the shutdown of which will prevent the appearance of reverse power in the system. Results: the processes occurring in marine electric power systems with the appearance of reverse power and immediately preceding the transition of one of the generator sets to the propulsion mode are investigated. An original diagnostic feature has been formulated, according to which the system is recognized as inoperable at the moment when there is a multidirectional change in the load of the generator, and the load difference of the generators has exceeded the permissible value and continues to increase. In this case, it is advisable to carry out preventive network unloading. At the same time, if, as a result of reducing the network load, the load of one of the generator sets will increase, then this unit, according to the proposed method, is subject to shut down. If, as a result of unloading the network, the load of all generator sets decreases, then it is advisable to turn off the generator sets, whose load decreased until the network load decreased. A functional diagram of a device providing practical implementation of the proposed approach is presented for cases of both unauthorized increase in fuel supply to the primary engine of one of the generator sets and for cases of unauthorized unloading. Practical significance: the application of the proposed method of preventive protection against reverse power makes it possible to prevent an emergency situation on the ship in the event of an unauthorized change in the fuel supply to the primary engine of at least one of the parallel operating generator sets.

Keywords: generator set, reverse power, propulsion mode, preventive protection, emergency situation, marine electric power system.

Введение

Судовые электроэнергетические системы (СЭЭС) решают важнейшие задачи генерации электроэнергии и управления ее потоками с целью обеспечения бесперебойного электроснабжения технических средств на борту судна. Данное обстоятельство предопределяет целесообразность обеспечения безаварийного функционирования СЭЭС, в том числе и в случае отказа любого из работающих генераторных агрегатов (ГА). В связи с этим на флоте особое внимание уделяется применению методов идентификации технического состояния оборудова-

ния, реализуемых на подходах технической диагностики [1–3]. Информация, полученная в результате технического диагностирования, используется при техническом обслуживании и ремонте или в системах защиты СЭЭС [4–6]. При этом одной из наиболее значимых является защита от обратной мощности, которая возникает при переходе хотя бы одного из параллельно работающих ГА в двигательный режим, что может привести к поломке приводного двигателя ГА или обесточиванию судна, потере его управляемости, хода, угрозе жизни пассажиров и членов экипажа [7–9]. Этим определяется важность разработки методов и средств, реализующих на практике безаварийный переход СЭЭС в частично неработоспособное состояние в случае отказа хотя бы одного из ее элементов. При этом ряд авторов указывают на погрешности, возникающие при измерении обратной мощности, и сосредоточили свои усилия на более точном определении момента перехода генератора в двигательный режим [10–12].

В настоящее время на судах используют аппаратуру защиты, обеспечивающую отключение ГА от сети, если создаваемая им обратная мощность превышает допустимое значение в течение заданного времени, функционирование которого может быть описано следующим логическим выражением [13]:

$$F_i = (N_{rev i} > N_{rev i \lim}) \wedge (t_{rev i} > t_{rev i \lim}), \quad (1)$$

где F_i – событие, заключающееся в отключении i -го ГА; $N_{rev i}$ (кВт) – обратная мощность, создаваемая ГА в двигательном режиме, $N_{rev i \lim}$ (кВт) – допустимое значение обратной мощности, $t_{rev i}$ (с) – время, в течение которого i -й ГА находится в двигательном режиме, а обратная мощность превышает допустимое значение, $t_{rev i \lim}$ (с) – время, в течение которого выполнение условия $N_{rev i} > N_{rev i \lim}$ принимается допустимым. При этом в соответствии с Правилами Российского морского регистра судоходства величина $t_{rev i \lim}$ (с) не должна превышать 10 с, а $N_{rev i \lim}$ (кВт) – 8–15 % от номинальной мощности ГА, если приводным двигателем является дизель, а для агрегатов, в которых приводным двигателем служит турбина – только 6 % [14]. Указанные

допущения обосновываются наличием ряда штатных режимов функционирования СЭЭС, при которых работоспособные агрегаты могут потреблять энергию из сети: при параллельной работе машин с малой нагрузкой, включении резервного генератора на параллельную работу, при рекуперации энергии в сеть, например, во время опускания груза палубным краном или при работе грузовой лебедки [13]. Подобный подход позволяет предотвратить появление ошибки первого рода при диагностировании ГА, но в случае нештатного режима работы СЭЭС, связанного, например, с отказом ее элементов, процесс идентификации технического состояния системы затягивается, и эффективность защиты снижается, что может стать причиной дальнейшего развития дефекта и возникновения аварийной ситуации на судне [15–17]. В связи с этим на флоте широкое применение нашел режим работы СЭЭС «с обеспечением резерва мощности», характеризуемый тем, что в параллель работает, по крайней мере, на один агрегат больше, чем это необходимо по условиям нагрузки, особенно на плавучих буровых платформах [18]. Это крайне неэффективный режим функционирования ГА, так как ведет к дополнительному расходу ресурса первичных двигателей, а их низкая загрузка – к резкому увеличению расхода топлива и смазочного масла [19–21]. В связи с этим наиболее перспективным следует считать метод превентивной защиты, являющийся составной частью предупредительного управления СЭЭС, основные положения которого рассмотрены в работах [22, 23].

Целью работы является развитие метода превентивной защиты от обратной мощности СЭЭС посредством предотвращения нештатной работы любого из ГА в двигательном режиме.

Выбор параметра для оперативной идентификации технического состояния СЭЭС, предшествующего формированию обратной мощности

Статья посвящена развитию метода превентивной защиты от обратной мощности, являющейся составной частью предупредительного управления СЭЭС [13]. В данном случае под превентивной защитой будем понимать идентификацию технического состояния системы, предшествующего переходу ГА в двигательный режим работы вследствие нештатной ситуации и формирование управляющего воздействия, предотвращающего появление обратной мощности и перерыв в элект-

троснабжении ответственных потребителей первой категории. При этом предполагается структурная адаптация СЭЭС к возникшей неисправности и безаварийный переход в режим правильного функционирования в условиях частично неработоспособного состояния системы. В работах [13, 22, 24] рассмотрено применение данного подхода в случае отказов, связанных с возникновением неисправностей, вызывающих прекращение поступления топлива в один из работающих ГА, но случаи несанкционированного увеличения подачи топлива в работающую машину представляют собой особый интерес. В связи с этим рассмотрим происшествие, случившееся с грузопассажирским паромом «Mariella» 5 ноября 2016 г. при отплытии из порта Стокгольм. «Mariella» – финское судно водоизмещением 37 860 регистровых тонн, которое предназначено для одновременной перевозки 2500 пассажиров и 430 автомобилей, его электростанция включает в себя три дизель-генераторных агрегата типа Wärtsilä Vasa 6R32 номинальной мощностью по 1800 кВт каждый. Работа судна в районе с интенсивным движением, каким является акватория порта, предполагает режим функционирования СЭЭС «с обеспечением резерва мощности». В связи с этим при отходе произошло следующее:

1. Были запущены и включены на параллельную работу все три агрегата.
2. Через несколько минут работы третья машина начала принимать на себя нагрузку, разгружая остальные агрегаты.
3. Первый и второй ГА перешли в двигательный режим и в соответствии с условием (1) были отключены защитой от обратной мощности.
4. Третий ГА принял на себя всю нагрузку сети и начал увеличивать частоту вращения вала двигателя.
5. Частота вращения вала приводного двигателя третьего ГА превысила аварийное значение, и агрегат был отключен защитой от разноса, произошел перерыв в электроснабжении судна.

Расследование показало, что причиной аварийной ситуации стало залипание контактов реле в канале увеличения подачи топлива третьего ГА выходного каскада электронного блока системы управления СЭЭС. При этом налицо методическая ошибка первого рода в организации защиты, штатная работа которой в условиях отказа привела к перерыву в электроснабжении судна. Данная системная ошибка

в случае несанкционированного изменения подачи топлива в одну из машин присуща всем устройствам защиты от обратной мощности, реализующим управление в соответствии с выражением (1). В связи с этим в работах [13, 22, 23] в рамках предупредительного управления был предложен ряд методов, позволяющих заблаговременно определить агрегат с несанкционированным уменьшением подачи топлива, например, вследствие разрыва трубы подачи топлива в дизель. Подход предполагает своевременное, до перехода в двигательный режим, отключение неисправного агрегата, что предотвращает возникновение аварийной ситуации при отказах подобного рода. В целом обоснование применения методов превентивной защиты от обратной мощности представлено в статье [13], но в проведенных исследованиях возможность несанкционированного увеличения подачи топлива в приводной двигатель ГА не учитывалась, что на практике также приводит к появлению ошибки первого рода и обесточиванию судна. В связи с этим обратимся, к примеру, с параллельной работой двух дизель-генераторов, загруженных на 70 и 75 % от номинальной мощности, для случая несанкционированного уменьшения подачи топлива в первый ГА, приведенному в монографии [23]. В работе показано следующее:

1. При отказе системы питания первой машины ее нагрузка в течение 2–5 с перейдет на второй агрегат.

2. Загрузка второго ГА превысит аварийное значение еще до полной разгрузки первой машины и появления обратной мощности.

3. Штатные устройства разгрузки имеют выдержку времени при срабатывании, которая, как правило, составляет 15–30 с и существенно превышает время перераспределения нагрузок, поэтому отключение малоответственных потребителей и уменьшение нагрузки сети не произойдут.

4. Вследствие перегрузки скорость вращения вала дизеля первого агрегата снизится до аварийного значения, и автоматический выключатель его генератора будет отключен защитой по частоте, произойдет перерыв в электроснабжении судна.

5. Применяемые в настоящее время реле обратной мощности (в том числе выполненные на базе программируемых микроконтроллеров) реализуют противоаварийное управление в соответствии с выражением (1) и не сработают, а использование любого из устройств, описанных в [23], обеспечит безаварийный переход СЭЭС в режим правильного функционирования.

При этом функциональный анализ работы СЭЭС в режиме несанкционированного увеличения и уменьшения подачи топлива в приводной двигатель хотя бы одного из ГА показывает, что хотя бы в одной из пар работающих машин происходят следующие события [22]:

1. Увеличение нагрузки одного из агрегатов при уменьшении нагрузки другого (L_1);

2. Абсолютная величина разности нагрузок ГА ($|\Delta P|$) превышает заданное значение (L_2);

3. Величина $|\Delta P|$ увеличивается (L_3).

Вследствие того, что одновременное совпадение всех трех событий (L_1, L_2, L_3) невозможно ни в одном из штатных режимов работы СЭЭС, то его можно определить как новый диагностический признак неработоспособного состояния системы (I_0), предшествующий переходу хотя бы одного из ГА в двигательный режим, и записать:

$$I_0 = L_1 \wedge L_2 \wedge L_3. \quad (2)$$

В рамках предупредительного управления при наступлении события I_0 целесообразно осуществить превентивную разгрузку СЭЭС. При этом в случае выхода из строя одного из двух параллельно работающих ГА, как показано в [24], рассчитывают общую нагрузку сети и, если она превышает допустимую нагрузку одной машины, то до момента отключения неработоспособного и перегрузки исправного ГА формируют команду на разгрузку СЭЭС. При этом осуществляют размыкание автоматических выключателей тех потребителей, отключение которых обеспечит работу одного агрегата без перегрузки. Если на момент возникновения неисправности в параллель работают более двух генераторов, то можно использовать один из более сложных способов, описанных в [23].

Метод идентификации отключаемого генераторного агрегата для целей превентивной защиты СЭЭС от обратной мощности

Как следует из анализа процессов, непосредственно предшествующих появлению обратной мощности в СЭЭС для случаев возникновения любой из неисправностей, вызывающих несанкционированное уменьшение подачи топлива, загрузка всех ГА будет уменьшаться, как

и в случае с исправными машинами. С другой стороны, при несанкционированном увеличении подачи топлива в дизель одного из ГА снижение нагрузки сети не вызовет уменьшения его загрузки, и это можно принять за диагностический признак для оперативной идентификацией технического состояния СЭС. В данном случае, в соответствии со статьей [24], под оперативной идентификацией будем понимать процесс технического диагностирования системы, результатом которого является получение информации о ее техническом состоянии, предназначенный для формирования управляющих воздействий, необходимых для ее безаварийной работы в случае возникновения нештатной ситуации, вызванной отказом одного из структурных элементов или ошибкой обслуживающего персонала. Тогда условие отключения i -го ГА для целей превентивной защиты при несанкционированном увеличении подачи топлива запишем следующим образом:

$$F_i = L_0 \wedge L_4 \wedge L_5^i, \quad (3)$$

где F_i – отключение i -го ГА; L_0 – идентификация неработоспособного состояния СЭС в соответствии с (2); L_4 – уменьшение нагрузки сети; L_5^i – увеличение нагрузки i -го ГА.

В этом случае для приведенного в качестве примера инцидента с судном «*Mariella*» условие своевременного отключения третьего агрегата можно записать в виде:

$$F_3 = (L_1^{(1,2)} \vee L_1^{(1,3)} \vee L_1^{(2,3)}) \wedge (L_2^{(1,2)} \vee L_2^{(1,3)} \vee L_2^{(2,3)}) \wedge (L_3^{(1,2)} \vee L_3^{(1,3)} \vee L_3^{(2,3)}) \wedge L_4 \wedge L_5^3, \quad (4)$$

где $L_1^{(1,2)}$, $L_1^{(1,3)}$, $L_1^{(2,3)}$ – события, заключающиеся в том, что изменение нагрузки первого и второго, первого и третьего, второго и третьего агрегатов соответственно направлены в противоположные стороны; $L_2^{(1,2)}$, $L_2^{(1,3)}$, $L_2^{(2,3)}$ – модуль разности нагрузок первого и второго, первого и третьего, второго и третьего агрегатов соответственно превысил заданное значение; $L_3^{(1,2)}$, $L_3^{(1,3)}$, $L_3^{(2,3)}$ – модуль разности нагрузок первого и второго, первого и третьего, второго и третьего агрегатов соответственно увеличивается; L_4 – уменьшение нагрузки сети; L_5^3 – увеличение нагрузки третьего ГА.

Выполненное в рамках превентивной защиты отключение третьего ГА произойдет до момента перехода первого и второго агрегатов в двигательный режим и появления обратной мощности, возникшая неисправность не приведет к перерыву электроснабжения судна. При этом сам по себе третий ГА работоспособен, но его отключение обеспечит безаварийный переход СЭЭС в режим правильного функционирования в состоянии частичной работоспособности. В отличие от [1–3], где результаты диагностирования используют для восстановления работоспособности неисправного объекта посредством замены элемента, вышедшего из строя, или настройки его параметров, результаты оперативной идентификации обеспечивают структурную или параметрическую адаптацию СЭЭС к возникшей неисправности с целью предотвращения аварийной ситуации [25]. При этом могут отключаться не только неработоспособные, но и вполне исправные элементы.

В то же время, если в момент уменьшения нагрузки сети при выполнении условий I_0 не произойдет увеличение нагрузки ни одного ГА, а, наоборот, нагрузка всех машин уменьшится, то это будет свидетельствовать о наличии неисправности, вызывающей несанкционированное уменьшение подачи топлива в первичный двигатель хотя бы одного агрегата. В данном случае ГА, загрузка которых согласно L_1 до отключения потребителей увеличивалась, а после уменьшения нагрузки сети стала уменьшаться, можно исключить из рассмотрения, а тех, загрузка которых уменьшалась, – отключить от сети. Тогда условие отключения i -го ГА для целей превентивной защиты при несанкционированном уменьшении подачи топлива можно записать следующим образом:

$$F_i = L_0 \wedge L_4 \wedge L_6 \wedge L_7^i, \quad (5)$$

где L_6 – уменьшение нагрузки всех ГА после снижения нагрузки сети; L_7^i – уменьшение нагрузки i -го ГА до уменьшения нагрузки сети.

С учетом выражений (3) и (5) условие отключения i -го ГА для превентивной защиты СЭЭС от обратной мощности запишем в виде логического выражения:

$$F_i = (L_0 \wedge L_4 \wedge L_5^i) \vee (L_0 \wedge L_4 \wedge L_6 \wedge L_7^i) = (L_0 \wedge L_4)(L_5^i \vee L_6 \wedge L_7^i). \quad (6)$$

Выражение (6) можно применить при разработке специальных устройств, обеспечивающих превентивную защиту СЭЭС от обратной мощности в случае несанкционированного изменения подачи топлива в первичный двигатель ГА.

Разработанный подход предупредительного управления может быть использован не только для судовых, но и для любых других автономных электроэнергетических систем, включая системы с распределенной генерацией, работающие в островном режиме, в которых решение задачи организации защиты от обратной мощности является актуальным [26–28].

Практическая реализация разработанных подходов

Рассмотрим практическую реализацию предложенного подхода на примере устройства для превентивной защиты СЭЭС от обратной мощности, функциональная схема которого представлена на рис. 1, 2. При этом на рис. 1 изображена схема блока, формирующего предупредительный сигнал о потере работоспособности СЭЭС в соответствии с выражением (2), а на рис. 2 – функциональная схема блока идентификации ГА, отключение которого позволит избежать появления обратной мощности и аварийной ситуации на судне.

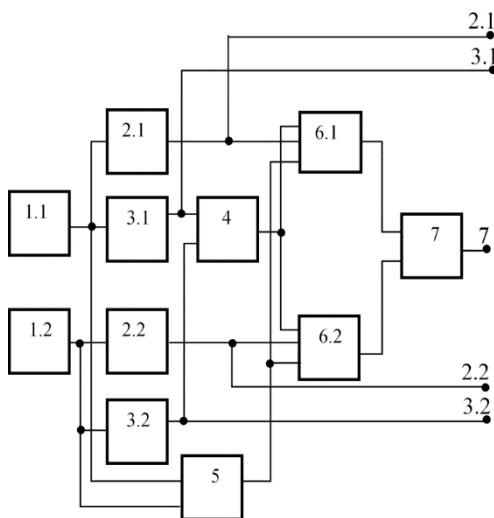


Рис. 1. Функциональная схема блока, формирующего предупредительный сигнал о потере работоспособности СЭЭС: 1.1, 1.2 – датчики активной нагрузки первого и второго ГА соответственно; 2.1, 2.2 – блоки контроля увеличения нагрузки; 3.1, 3.2 – блоки контроля уменьшения нагрузки; 4 – логический элемент «ИЛИ»; 5 – блок контроля увеличения разности нагрузок; 6.1, 6.2 – логические элементы «И»; 7 – логический элемент «ИЛИ»

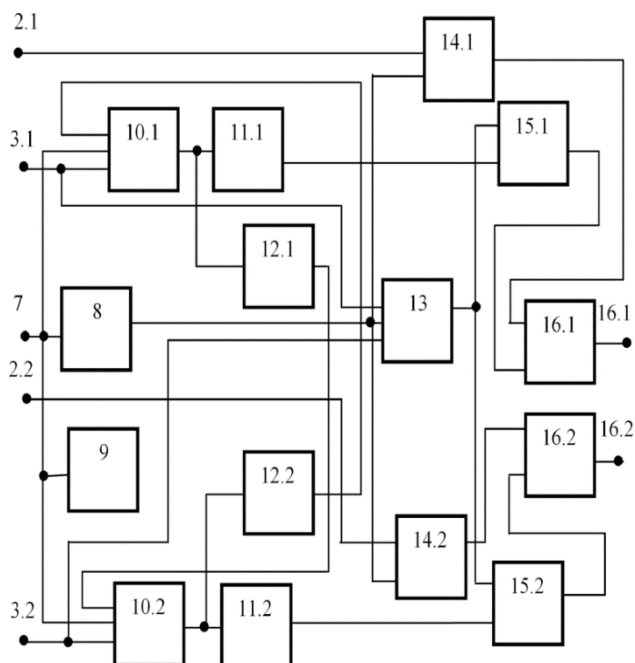


Рис. 2. Функциональная схема блока идентификации отключаемого ГА: 8 – одновибратор с задержкой формирования импульса; 9 – блок превентивной разгрузки СЭЭС; 10.1, 10.2 – логические элементы «И»; 11.1, 11.2 – одновибраторы; 12.1, 12.2 – логические элементы «НЕ»; 13 – логический элемент «И»; 14.1, 14.2 – логические элементы «И»; 15.1, 15.2 – логические элементы «И»; 16.1, 16.2 – логические элементы «ИЛИ»

В случае наступления события I_0 на выходе 7 блока (см. рис. 1), формируется сигнал логической «1», информирующий о том, что СЭЭС не работоспособна.

При этом:

1. Если увеличивается нагрузка первого ГА, то сигнал логической «1» появляется на выходе 2.1 и 3.2, а на выходах 2.2 и 3.1 – сигнал логического «0».

2. Если увеличивается нагрузка второго ГА, то сигнал логической «1» появляется на выходе 2.2 и 3.1, а на выходах 2.1 и 3.2 – сигнал логического «0».

Сигналы с выходов блока контроля работоспособного состояния СЭЭС (2.1, 3.1, 7, 2.2, 3.2) поступают на одноименные входы блока идентификации отключаемого ГА, функциональная схема которого представлена на рис. 2. При этом в случае неконтролируемого увеличения подачи топлива в первый ГА произойдет следующее:

1. Отключение выбранных групп приемников электроэнергии через время Δt_1 и произойдет снижение нагрузки сети.

2. Нагрузка первого ГА через время Δt_1 продолжит увеличиваться, сигнал логической «1» на входе 2.1 сохранится.

3. Через время Δt_1 на выходе одновибратора с задержкой формирования импульса сформируется короткий, длительностью 0,5 с, сигнал логической «1» и поступит на второй выход логического элемента «И» 14.1.

4. На выходе логического элемента «И» 14.1 появится сигнал логической «1», информирующий о том, что условие (3) выполнено относительно первого ГА, имеется несанкционированное увеличение подачи топлива в его первичный двигатель, для предотвращения аварийной ситуации следует отключить этот агрегат от сети.

5. Сигнал логической «1» поступит на первый вход логического элемента «ИЛИ» 16.1, на его выходе и выходе блока 16.1 сформируется сигнал логической «1» – команда исполнительному механизму на отключение первого ГА.

В случае неконтролируемого снижения подачи топлива в первый ГА произойдет следующее:

1. На выходе логического элемента «И» 10.1 появится сигнал логической «1», инвертируется логическим элементом «НЕ» 12.1, и на первый вход логического элемента «И» 10.2 поступит сигнал логического «0», блокируя формирование сигнала логической «1» на его выходе.

2. Одновибратор 11.1 сформирует сигнал логической «1» с длительностью, превышающей на 0,5 с длительность Δt_1 , информирующий о том, что до момента разгрузки сети нагрузка первого ГА уменьшалась.

3. Произойдет отключение выбранных групп приемников электроэнергии, через время Δt_1 произойдет снижение нагрузки сети.

4. Через время Δt_1 нагрузка обоих агрегатов будет уменьшаться, и на входе 3.2 появится сигнал логической «1».

5. Через время Δt_1 на выходе одновибратора с задержкой формирования импульса сформируется короткий, длительностью 0,5 с, сигнал логической «1».

6. На выходе логического элемента «И» 13 появится сигнал логической «1», информирующий о том, что после разгрузки сети нагрузка всех ГА уменьшилась.

7. На выходе логического элемента «И» 15.1 сформируется сигнал логической «1», информирующий о том, что условие (5) для первого ГА выполнено, имеется несанкционированное уменьшение подачи топлива в первичный двигатель этого ГА, для предотвращения аварийной ситуации следует отключить первый агрегат от сети.

8. Сигнал логической «1» поступит на первый вход логического элемента «ИЛИ» 16.1, на его выходе и выходе блока 16.1 сформируется сигнал логической «1» – команда исполнительному механизму на отключение первого ГА.

Схема симметрична и при несанкционированном изменении подачи топлива во второй ГА работает аналогичным образом, отключая вторую машину в соответствии с представленным методом превентивной защиты СЭЭС от обратной мощности и выражением (6).

Заключение

1. Метод защиты ГА от обратной мощности в соответствии с формулой (1), широко применяемый на флоте, позволяет защитить агрегат от перехода генератора в двигательный режим только в условиях малой загрузки СЭЭС. В остальных случаях велика вероятность возникновения аварийной ситуации, связанной с обесточиванием судна.

2. В статье представлен подход, позволяющий заранее, до появления обратной мощности, на основании логического уравнения (2) идентифицировать неработоспособное состояние СЭЭС, вызванное несанкционированным изменением подачи топлива в первичный двигатель хотя бы одного из работающих параллельно ГА. Полученную информацию целесообразно использовать для превентивной разгрузки сети.

3. Предложенный в работе метод, описываемый логическим выражением (6), позволяет в случае несанкционированного изменения подачи топлива в первичный двигатель хотя бы одного из параллельно работающих ГА идентифицировать и отключить этот агрегат до его перехода в двигательный режим. Данный подход в сочетании с превентивной разгрузкой сети обеспечивает переход СЭЭС в частично неработоспособное состояние без перерыва в электроснабжении ответственных потребителей электроэнергии. Разработана и предоставлена схема устройства, реализующего предложенный метод.

4. Предоставленные результаты могут применяться не только на судах, но и для превентивной защиты автономных электроэнергетиче-

ских систем портов, предприятий горнодобывающей, нефтяной и газовой промышленности, использующих в качестве источников электроэнергии ГА, работающие параллельно. Дальнейшие исследования предполагается сосредоточить на разработке альтернативных методов превентивной защиты СЭЭС от обратной мощности, в которых идентификация отключаемого ГА не будет связана с необходимостью разгрузки сети. При этом автором ведутся работы по созданию микропроцессорной системы предупредительного управления СЭЭС, которая, кроме прочего, позволит на практике реализовать и подходы к превентивной защите, изложенные в настоящей статье.

Библиографический список

1. Кондратьев, Д.А. Интеллектуальные системы диагностирования судового электрооборудования / Д.А. Кондратьев, А.Г. Юрескул // Морской вестник. – 2020. – № 1. – С. 92–96.

2. Епихин, А.И. Применение нейронных сетей на базе многослойного перцептрона с использованием нечеткой логики для технической диагностики судовых технических средств / А.И. Епихин, С.И. Кондратьев, Е.В. Хекерт // Эксплуатация морского транспорта. – 2020. – № 3. – С. 111–119. DOI: 10.34046/aumsuomt96/15

3. Zhang, L. Diagnostic method for short circuit faults at the generator end of ship power systems based on mwdn and deep-gated RNN-FCN / L. Zhang, Z. Zhang, H. Peng // Journal of Marine Science and Engineering. – 2023. – Vol. 11, № 9. – P. 1806. DOI: 10.3390/jmse11091806

4. Стеклов, А.С. Разработка базы знаний для оперативной диагностики судовых синхронных генераторов / А.С. Стеклов, А.В. Серебряков // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2020. – Т. 63, № 1. – С. 85–89. DOI: 10.17213/0136-3360-2020-1-85-89

5. Логинов, О.Г. Проблемы оценки остаточного ресурса корабельных радиоэлектронных средств при ремонте и модернизации, пути их решения / О.Г. Логинов, А.Б. Химаныч, А.И. Лычаков // Судостроение. – 2021. – № 4. – С. 61–64. DOI: 10.54068/00394580_2021_4_61

6. Мосейко, Е.С. Задачи оценки рисков и предупреждения отказов судовых механических систем / Е.С. Мосейко, Е.О. Ольховик // Вестник Гос. ун-та морского и речного флота им. адм. С.О. Макарова. – 2022. – Т. 14, № 6. – С. 931–944. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-6-931-944

7. Гомзяков, М.В. Определение весовых коэффициентов по факторам влияния эргатического элемента судна на морскую аварийность в Дальневосточном регионе / М.В. Гомзяков, И.Б. Друзь // Морские интеллектуальные технологии. – 2020. – № 1-2. – С. 136–144. DOI: 10.37220/MIT.2020.47.1.068

8. A Stator internal short-circuit fault protection method for turbo-generator based on instantaneous power oscillation ratio / J. Qiao, X. Yin, Y. Wang [et al.] // IEEE Transactions on Energy Conversion. – 2023. DOI : 10.1109/tec.2023.3237217

9. Епихин, А.И. Проблемы внедрения безэкипажных судов на основе статистических исследований аварийных ситуаций и потерь судов / А.И. Епихин, М.А. Модина // Морские интеллектуальные технологии. – 2021. – № 3-1 (53). – С. 77–82. DOI: 10.37220/MIT.2021.53.3.010

10. Modeling and simulation of reverse power relay for generator protection / M.M. Aman, G.B. Jasmon, Q.A. Khan [et al.] // IEEE International Power Engineering and Optimization Conference Melaka, Malaysia. – 2012. – P. 317–322. DOI: 10.1109/PEOCO.2012.6230882

11. Holguin, J.P. Reverse power flow (RPF) detection and impact on protection coordination of distribution systems / J.P. Holguin, D.C. Rodriguez, G. Ramos // IEEE Transactions on Industry Applications. – 2020. – Vol. 56, iss. 3. – P. 2393–2401. DOI: 10.1109/TIA.2020.2969640

12. Zakri, A.A. Modeling to improve the performance of reverse power relay in generator / A.A. Zakri, F. Rozi // Sinergi. – 2020. – Vol. 24, iss. 3. – P. 231–236. DOI: 10.22441/sinergi.2020.3.008

13. Саушев, А.В. Превентивная защита автономных электроэнергетических систем от обратной мощности на основе предупредительного управления / А.В. Саушев, Н.В. Широков // Электротехника. – 2023. – № 2. – С. 34–40. DOI: 10.53891/00135860_2023_2_34

14. Правила классификации и постройки морских судов. – СПб.: РМРС, 2017. – 807 с.

15. Yaghobi, H. Fast predictive technique for reverse power detection in synchronous generator / H. Yaghobi // IET Electric Power Applications. – 2018. – Vol. 12, iss. 4. – P. 508–517. DOI: 10.1049/iet-epa.2017.0491

16. Unahalekhaka, P. Reduction of reverse power flow using the appropriate size and installation position of a BESS for a PV power plant / P. Unahalekhaka, P. Sripakarach // Access IEEE. – 2020. – Vol. 8. – P. 102897–102906. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2997821

17. Holguin, J.P. Reverse power flow (RPF) detection and impact on protection coordination of distribution systems / J.P. Holguin, D.C. Rodriguez, G. Ramos // IEEE Transactions on Industry Applications. – 2020. – Vol. 56, № 3. – P. 2393–2401.

18. Игнатенко, А.В. Особенности электроэнергетических систем современных динамически позиционируемых буровых судов / А.В. Игнатенко // V Международный балтийский форум. – 2017. – С. 262–269.

19. Кузнецов, С.Е. Определение перерасхода топлива судового дизель-генератора / С.Е. Кузнецов, Н.А. Алексеев, А.А. Виноградов // Тр. Крыловского гос. науч. центра. – 2019. – № 3 (389). – С. 113–120. DOI: 10.24937/2542-2324-2019-3-389-113-120

20. Гринкруг, М.С. Разработка алгоритма работы системы управления дизельными электростанциями с учётом неравномерности её нагрузки / М.С. Гринкруг, Н.А. Новгородов // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре гос. техн. ун-та. – 2020. – № 7. – С. 42–47.

21. Григорьев, А.В. Повышение эффективности эксплуатации судовых дизельных электростанций / А.В. Григорьев, В.Ю. Колесниченко // Вестник Гос. ун-та морского и речного флота им. адм. С.О. Макарова. – 2014. – № 6 (28). – С. 39–43.

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

23. Саушев, А.В. Методы, модели и алгоритмы предупредительного управления состоянием автономных электроэнергетических систем / А.В. Саушев, Н.В. Широков. – СПб.: Изд-во Гос. ун-та морского и речного флота им. адм. С.О. Макарова, 2023. – 212 с.

24. Саушев, А.В. Оперативная идентификация технического состояния судовой электростанции для решения задач предупредительного управления / А.В. Саушев, Н.В. Широков // Вестник Гос. ун-та морского и речного флота им. адм. С.О. Макарова. – 2022. – Т. 14, № 2. – С. 306–318. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-2-306-318

25. Saushev, A. Rapid identification of the technical condition of a marine electric power system / A. Saushev, N. Shirokov, A. Butsanets // Journal of Physics Conference Series 1742-6596. DOI: 10.1088/1742-6596/2061/1/012032

26. Sudhakar, P. Reducing the impact of DG on distribution networks protection with reverse power relay / P. Sudhakar, S. Malaji, B. Sarvesh // *Materials Today: Proceedings*. – 2018. – Vol. 5, iss. 1. – P. 51–57.

27. Unahalekhaka, P. Reduction of reverse power flow using the appropriate size and installation position of a BESS for a PV power plant / P. Unahalekhaka, P. Sripakarach // *IEEE Access*. – 2020. – Vol. 8. – P. 102897–102906. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2997821

28. Enhancing the coordination of reverse power, overcurrent, under-frequency, and under-voltage relays using transient stability analysis in real plant applications / T.P. Sari, A. Priyadi, M. Pujiantaraet, M.H. Purnomo // *Ain Shams Engineering Journal*. – 2020. – Vol. 11, iss. 1. – P. 19. DOI: 10.1016/j.asej.2019.06.001

References

1. Kondrat'ev D.A., Iureskul A.G. Intellektual'nye sistemy diagnostirovaniia sudovogo elektrooborudovaniia [Intellectual diagnostic-systems of marine electrical equipment]. *Morskoi vestnik*, 2020, no. 1, pp. 92-96.

2. Epikhin A.I., Kondrat'ev S.I., Khekert E.V. Primenenie neironnykh setei na baze mnogosloinogo pertseptrona s ispol'zovaniem nechetkoi logiki dlia tekhnicheskoi diagnostiki sudovykh tekhnicheskikh sredstv [Application of neural networks based on a multilayer perceptron using fuzzy logic for technical diagnostics of ship technical equipment]. *Ekspluatatsiia morskogo transporta*, 2020, no. 3, pp. 111-119. DOI: 10.34046/aumsuomt96/15

3. Zhang L., Zhang Z., Peng H. Diagnostic method for short circuit faults at the generator end of ship power systems based on mwdn and deep-gated RNN-FCN. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2023, vol. 11, no. 9, 1806 p. DOI: 10.3390/jmse11091806

4. Steklov A.S., Serebriakov A.V. Razrabotka bazy znaniia dlia operativnoi diagnostiki sudovykh sinkhronnykh generatoro [Development of a knowledge base for operational diagnostics of ship synchronous generators]. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Elektromekhanika*, 2020, vol. 63, no. 1, pp. 85-89. DOI: 10.17213/0136-3360-2020-1-85-89

5. Loginov O.G., Khimanych A.B., Lychakov A.I. Problemy otsenki ostatochnogo resursa korabel'nykh radioelektronnykh sredstv pri remonte i modernizatsii, puti ikh resheniia [Remaining life of electronics equipment upon repair and modernization: estimation issues and solutions]. *Sudostroenie*, 2021, no. 4, pp. 61-64. DOI: 10.54068/00394580_2021_4_61

6. Moseiko E.S., Ol'khovik E.O. Zadachi otsenki riskov i preduprezhdeniia otkazov sudovykh mekhanicheskikh sistem [Tasks of risks assessment and failures prevention of the ship's mechanical systems]. *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova*, 2022, vol. 14, no. 6, pp. 931-944. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-6-931-944

7. Gomziakov M.V., Druz' I.B. Opredelenie vesovykh koeffitsientov po faktoram vliianiia ergaticheskogo elementa sudna na morskuiu avariinost' v Dal'nevostochnom regione [Finding of weighting factors by factors of the influence of the ergatic element of the vessel on accidents at sea in the far east]. *Morskie intellektual'nye tekhnologii*, 2020, no. 1-2, pp. 136-144. DOI: 10.37220/MIT.2020.47.1.068

8. Qiao J., Yin X., Wang Y. et al. A Stator internal short-circuit fault protection method for turbo-generator based on instantaneous power oscillation ratio. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2023. DOI: 10.1109/tec.2023.3237217

9. Epikhin A.I., Modina M.A. Problemy vnedreniia bezekipazhnykh sudov na osnove statisticheskikh issledovaniia avariinykh situatsii i poter' sudov [Problems of introducing unmanned vessels on the basis of statistical studies of emergencies and ship losses]. *Morskie intellektual'nye tekhnologii*, 2021, no. 3-1 (53), pp. 77-82. DOI: 10.37220/MIT.2021.53.3.010

10. Aman M.M., Jasmon G.B., Khan Q.A. et al. Modeling and simulation of reverse power relay for generator protection. *Power Engineering and Optimization Conference Melaka. Malaysia*, 2012, pp. 317-322. DOI: 10.1109/PEOCO.2012.6230882

11. Holguin J.P., Rodriguez D.C., Ramos G. Reverse power flow (RPF) detection and impact on protection coordination of distribution systems. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2020, vol. 56, iss. 3, pp. 2393-2401. DOI: 10.1109/TIA.2020.2969640

12. Zakri A.A., Rozi F. Modeling to improve the performance of reverse power relay in generator. *Sinergi*, 2020, vol. 24, iss. 3, pp. 231-236. DOI: 10.22441/sinergi.2020.3.008

13. Saushev A.V., Shirokov N.V. Preventivnaia zashchita avtonomnykh elektroenergeticheskikh sistem ot obratnoi moshchnosti na osnove predupreditel'nogo upravleniia [Preventive protection of autonomous electric power from reverse power on the basis of preventive control]. *Elektrotehnika*, 2023, no. 2, pp. 34-40. DOI: 10.53891/00135860_2023_2_34

14. Pravila klassifikatsii i postroiki morskikh sudov [Rules for the classification and construction of marine vessels]. Saint Petersburg: Rossiiskii morskoi registr sudokhodstva, 2017, 807 p.

15. Yaghobi, H. Fast predictive technique for reverse power detection in synchronous generator. *IET Electric Power Applications*, 2018, vol. 12, iss. 4, pp. 508-517. DOI: 10.1049/iet-epa.2017.0491

16. Unahalekhaka P., Sripakarach P. Reduction of reverse power flow using the appropriate size and installation position of a BESS for a PV power plant. *Access IEEE*, 2020, vol. 8, pp. 102897-102906. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2997821

17. Holguin J.P., Rodriguez D.C., Ramos G. Reverse power flow (RPF) detection and impact on protection coordination of distribution systems. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2020, vol. 56, no. 3, pp. 2393-2401.

18. Ignatenko A.V. Osobennosti elektroenergeticheskikh sistem sovremennykh dinamicheskii pozitsioniruemykh burovykh sudov [Features of electric power systems of modern dynamically positioned drilling vessels]. *V Mezhdunarodnyi baltiiskii forum*, 2017, pp. 262-269.

19. Kuznetsov S.E., Alekseev N.A., Vinogradov A.A. Opredelenie pereraskhoda topliva sudovogo dizel'-generatora [Detection of fuel overconsumption by marine diesel genset]. *Trudy Krylovskogo gosudarstvennogo nauchnogo tsentra*, 2019, no. 3 (389), pp. 113-120. DOI: 10.24937/2542-2324-2019-3-389-113-120

20. Grinkrug M.S., Novgorodov N.A. Razrabotka algoritma raboty sistemy upravleniia dizel'nyimi elektrostantsiiami s uchetom neravnomernosti ee nagruzki [Development of the algorithm of the diesel power plant control systems taking into account the uniformity of its load]. *Uchenye zapiski Komsomol'skogo-na-Amure gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2020, no. 7, pp. 42-47.

21. Grigor'ev A.V., Kolesnichenko V.Iu. Povyshenie effektivnosti ekspluatatsii sudovykh dizel'nykh elektrostantsii [Improving the operational efficiency of marine diesel power plants]. *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova*, 2014, no. 6 (28), pp. 39-43.

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

23. Saushev A.V., Shirokov N.V. Metody, modeli i algoritmy predupreditel'nogo upravleniia sostoianiem avtonomnykh elektroenergeticheskikh sistem [Methods, models and algorithms of preventive management of the state of autonomous electric power systems]. Saint Petersburg: Gosudarstvennyi universitet morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova, 2023, 212 p.

24. Saushev A.V., Shirokov N.V. Operativnaia identifikatsiia tekhnicheskogo sostoianiia sudovoi elektrostantsii dlia resheniia zadach predupreditel'nogo upravleniia [Operational identification of the ship's power plant technical condition for solving problems of preventive management]. *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova*, 2022, vol. 14, no. 2, pp. 306-318. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-2-306-318

25. Saushev A., Shirokov N., Butsanets A. Rapid identification of the technical condition of a marine electric power system. *Journal of Physics Conference Series 1742-6596*. DOI: 10.1088/1742-6596/2061/1/012032

26. Sudhakar P., Malaji S., Sarvesh B. Reducing the impact of DG on distribution networks protection with reverse power relay. *Materials Today: Proceedings*, 2018, vol. 5, iss. 1, pp. 51-57.

27. Unahalekhaka P., Sripakarach P. Reduction of reverse power flow using the appropriate size and installation position of a BESS for a PV power plant. *IEEE Access*, 2020, vol. 8, pp. 102897-102906. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2997821

28. Sari T.P., PriyadiA., Pujiantaraet M., Purnomo M.H. Enhancing the coordination of reverse power, overcurrent, under-frequency, and under-voltage relays using transient stability analysis in real plant applications. *Ain Shams Engineering Journal*, 2020, vol. 11, iss. 1, 19 p. DOI: 10.1016/j.asej.2019.06.001

Сведения об авторе

Широков Николай Викторович (Санкт-Петербург, Российская Федерация) – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Электропривод и электрооборудование береговых установок» Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова (198035, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7, e-mail: Shirokovn@inbox.ru).

About the author

Nikolaj V. Shirokov (St. Petersburg, Russian Federation) – Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor Department of electric drives and electrical equipment of onshore units Admiral S.O. Makarov State University of Maritime and Inland Shipping (198035, St. Petersburg, 5/7, Dvinskaya str., e-mail: Shirokovn@inbox.ru).

Поступила: 03.05.2024. Одобрена: 21.05.2024. Принята к публикации: 08.07.2024.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов по отношению к статье.

Вклад 100 %.

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Широков, Н.В. Превентивная защита от обратной мощности судовых электро-энергетических систем при отказе их элементов / Н.В. Широков // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2024. – № 50. – С. 61–81. DOI: 10.15593/2224-9397/2024.2.04

Please cite this article in English as:

Shirokov N.V. Preventive protection against reverse power of marine electric power systems in case of failure of their elements. *Perm National Research Polytechnic University Bulletin. Electrotechnics, information technologies, control systems*, 2024, no. 50, pp. 61-81. DOI: 10.15593/2224-9397/2024.2.04