

DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-5-775-786

PREVENTIVE START-UP OF AN EMERGENCY DIESEL GENERATOR OF THE SHIP'S ELECTRIC POWER SYSTEM

N. V. Shirokov

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

The development of the method of preventive protection for the purposes of safe operation of the ship's electric power system in emergency situations associated with malfunctions of its elements that occur during operation is considered in the paper. It has been shown that the existing devices form a command to start an emergency diesel generator at the moment when the voltage on the main switchboard busbars disappears. This circumstance causes a break in the power supply of responsible consumers of electric energy for a time equal to the start time of the emergency source. At the same time, the vessel loses control, and in most cases, the course. In this regard, it has been paid special attention in the paper to the development of a method for the preventive start of an emergency diesel generator, in which the launch command is formed before the vessel is de-energized, but with a real threat of this event. The conditions under which the preventive start of an emergency diesel generator should be carried out are formulated. Within the framework of the proposed approach, the energy state of the entire ship's electric power system is predicted in the case of a decrease in its generating capacity, and, if necessary, a command to start an emergency source of electric energy is formed. At the same time, the most dangerous situation develops at a time when, in case of a failure of the generator unit of the main power plant, preventive unloading of the network turns out to be ineffective. It has been shown that there are emergency modes of vessel operation, such as flooding or fire in the room of diesel generators, in which the probability of simultaneous failure of all main electricity sources at once is especially high. The application of the proposed method of preventive start-up of an emergency power source will allow, in case of failure of at least one of the generator units of the main power plant operating in parallel, flooding or fire on the ship, to carry out structural adaptation of the system in advance to the malfunction that has arisen and go into a partially operational state, bypassing the emergency situation. At the same time, the interruption in the power supply of responsible consumers ensuring the safety of the vessel operation will either be significantly reduced or it will not happen at all. A functional diagram of a simple device implementing the proposed approach in practice is presented. A brief description of his work is given.

Keywords: emergency diesel generator, preventive start-up, preventive control, failure of the generator set, interruption in power supply, responsible consumers.

For citation:

Shirokov, Nikolaj V. "Preventive start-up of an emergency diesel generator of the ship's electric power system." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 14.5 (2022): 775–786. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-5-775-786.

УДК 621.316:658.58

ПРЕВЕНТИВНЫЙ ЗАПУСК АВАРИЙНОГО ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРА СУДОВОЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Н. В. Широков

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

Темой исследования является развитие метода превентивной защиты для безопасной работы судовой электроэнергетической системы в нештатных ситуациях, связанных с неисправностями ее элементов, возникающими в процессе эксплуатации. Показано, что существующие устройства формируют команду на запуск аварийного дизель-генератора в момент исчезновения напряжения на шинах главного распределительного щита, что обуславливает перерыв в электроснабжении ответственных потребителей электрической энергии на время, равное времени запуска аварийного источника. При этом судно теряет управляемость, а в большинстве случаев и ход. В этой связи в статье особое внимание уделено разработке

способа превентивного запуска аварийного дизель-генератора, при котором команда на запуск формируется до момента обесточивания судна, но при реальной угрозе наступления этого события. Сформулированы условия, при которых должен осуществляться превентивный запуск аварийного дизель-генератора. В рамках предложенного подхода осуществляется прогнозирование энергетического состояния всей судовой электроэнергетической системы в случае уменьшения ее генерирующей способности и при необходимости формируется команда на запуск аварийного источника электрической энергии. При этом наиболее опасная ситуация наступает в то время, когда при отказе генераторного агрегата основной электростанции превентивная разгрузка сети оказывается неэффективной. Показано, что существуют аварийные режимы работы судна, такие как подтопление или пожар в помещении дизель-генераторов, при которых вероятность одновременного выхода из строя сразу всех основных источников электроэнергии особенно велика. Представлена функциональная схема простого устройства, реализующего предложенный подход на практике, и дано краткое описание его работы. Применение предложенного способа превентивного запуска аварийного источника электроэнергии позволит в случае выхода из строя хотя бы одного из работающих параллельно генераторных агрегатов основной электростанции, подтопления или пожара на судне временно осуществить структурную адаптацию системы к возникшей неисправности и перейти в частично работоспособное состояние, минуя аварийную ситуацию. При этом перерыв в питании ответственных потребителей, обеспечивающих безопасность функционирования судна, либо существенно сократится, либо вообще не произойдет.

Ключевые слова: аварийный дизель-генератор, превентивный запуск, предупредительное управление, отказ генераторного агрегата, перерыв в электроснабжении, ответственные потребители.

Для цитирования:

Широков Н. В. Превентивный запуск аварийного дизель-генератора судовой электроэнергетической системы / Н. В. Широков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2022. — Т. 14. — № 5. — С. 775–786. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-5-775-786.

Введение (Introduction)

Аварийный режим работы любой электроэнергетической системы практически всегда характеризуется перерывом в электроснабжении ответственных потребителей [1]–[3]. На практике данная ситуация может привести к серьезным экономическим потерям, нанести вред экологии, а иногда здоровью и жизни людей [4]–[6]. Одним из основных способов уменьшения негативных последствий аварии является применение аварийных источников электроэнергии, запускаемых в момент исчезновения напряжения в сети. При этом наиболее эффективными с точки зрения быстрой реакции можно считать блоки бесперебойного питания, реализованные на базе аккумуляторных батарей [7]–[9]. Безусловным достоинством данных устройств является постоянная готовность к работе и быстрый прием нагрузки. К недостаткам следует отнести низкие массогабаритные показатели. В этой связи на судах подобные источники электроэнергии применяются для аварийного питания наиболее ответственных, но маломощных потребителей. К ним относятся пожароизвещающие станции, устройства аварийно-предупредительной сигнализации и защиты, приборы управления различными механизмами, авральная сигнализация и аппаратура радионавигации, а в отдельных случаях также сети аварийного освещения и аварийный рулевой электропривод. Для более мощных потребителей, как правило, применяют аварийные дизель-генераторные (АДГ) агрегаты. В атомной энергетике они обычно используются для предотвращения катастрофических последствий в случае аварийной остановки ядерной установки [10], но в большинстве случаев, в том числе на судах, для обеспечения электроэнергией ответственных потребителей в аварийном режиме работы электроэнергетической системы [11]–[13].

В соответствии с Правилами РС запуск АДГ и принятие им нагрузки должно осуществляться в течение 45 с после исчезновения напряжения на шинах главного распределительного щита (ГРЩ) судна. В течение всего этого времени не работает рулевой электропривод, а на большинстве судов останавливается и главный двигатель. Это аварийная ситуация для судна, которая при работе в местах с интенсивным движением, узкостях или в штормовых условиях может привести к трагическим последствиям. В этой связи *сокращение времени от момента исчезновения напряжения на шинах ГРЩ до принятия нагрузки АДГ является актуальной задачей*, от решения которой зачастую

зависит сохранность судна и груза, а во многих случаях и жизнь членов его экипажа. При этом традиционно сокращение времени запуска АДГ связано с работой агрегата в крайне сложном режиме, характеризуемом значительными температурными и механическими нагрузками,отягощенными некачественным режимом смазки, неполным сгоранием топлива вследствие инерционности работы системы подачи воздуха и связанной с этим закоксованности деталей двигателя. Все это существенным образом ухудшает показатели надежности машины. Вместе с тем время запуска АДГ конечно и физически не может быть сокращено до желаемой величины, близкой к нулю. В этой связи целесообразно рассмотреть подходы предупредительного управления (ПУ) для исключения обесточивания судовой электроэнергетической сети (СЭЭС) [14]–[16], в том числе превентивный запуск АДГ [17]–[19].

Методы и материалы (Methods and Materials)

В рамках ПУ запуск АДГ должен произойти до наступления аварийной ситуации в СЭЭС, а следовательно, до момента исчезновения напряжения на шинах ГРЩ. В соответствии с материалами статьи [14] рассмотрим ПУ как процесс воздействия на СЭЭС, в результате которого после достижения контролируемыми параметрами предельного значения или срабатывания защиты ее техническое состояние, характеризуемое точкой $S(X)$, будет принадлежать усеченной области правильного функционирования w_j^q . Последней будет соответствовать j -й режим работы системы, при котором в ее составе будет работать только АДГ. Это штатный режим работы аварийного источника электроэнергии, но в данном случае его включение на нагрузку предполагается без прерыва в питании ответственных потребителей или с существенным сокращением времени прерыва в их электроснабжении. В данном случае формирование команды на запуск АДГ должно осуществляться заранее по особым предупредительным сигналам, наличие которых обуславливает высокую вероятность исчезновения напряжения на шинах ГРЩ. Практика показывает, что обесточивание СЭЭС, как правило, происходит в результате выхода из строя ее элементов [20], [21], неправомерных действий экипажа [22]–[24] или вследствие существенных отклонений параметров окружающей среды, приводящих к невозможности функционирования ГА [25].

На современных судах, исходя из соображений безопасности, запрещена параллельная работа ГА основной электростанции и АДГ. В этой связи и в соответствии с работой [15] в составе СЭЭС выделим две автономные генерирующие системы. Первая (АГС1) будет объединять связанные между собой параллельно работающие агрегаты, предназначенные для снабжения судна электрической энергией требуемого качества в штатных режимах работы СЭЭС. Вторая (АГС2) будет состоять из АДГ и предназначаться для питания ответственных потребителей в условиях исчезновения напряжения на шинах ГРЩ. При этом АГС2 начнет функционировать при выходе из строя АГС1, и следовательно, целесообразно определить момент, когда в первой генерирующей системе появится неисправность, способная привести к обесточиванию судна. В этой связи, как следует из материалов статьи [12], АГС1 не сможет выполнять свои функции, если точка $S(X)$, характеризующая ее техническое состояние, не будет принадлежать области H . При этом

$$H = D_z \cap M_y \cap M_u, \quad (1)$$

где D_z — допусковая область выходных параметров функциональных блоков АГС1 ($\bar{Z}$), имеющая форму бруса и соответствующая внутреннему условию работоспособности (данная область в евклидовом пространстве может быть описана как $D_z = \bigcap_{k=1}^n D_k$, $D_k = D_{k \min} \cap D_{k \max}$);

M_y — область, характеризующая внешние условия работоспособности рассматриваемой системы и представляющая собой отображение выходных параметров АГС1 ($\bar{Y}$) в пространстве параметров ($\bar{Z}$) $\Phi_{yz} : D_y \rightarrow M_y$, $M_y = \bigcap_{i=1}^n M_i$;

M_u — область, характеризующая пространство управляющих воздействий системы (представляет собой отображение пространства управляющих сигналов $(\bar{U})$ в пространстве выходных параметров функциональных блоков $(\bar{Z})$ $\Phi_{uz} : D_u \rightarrow M_u$, $M_u = \bigcap_{c=1}^e M_c$.

В работе [26] пространство H определено как область работоспособного функционирования системы. Пространство, описываемое выражением (1), в отличие от определения области работоспособности, приведенного в источнике [27], характеризует множество допустимых значений *внутренних и управляющих* параметров АГС1, при которых выполняются все требования, предъявляемые к ее выходным параметрам [12]. При этом пересечение двух первых пространств в выражении (1), а именно $D_z \cap M_y$, образует область работоспособности АГС1 (G), принадлежность точки $S(X)$ к которой характеризует работоспособное состояние системы.

Существующее ограничение в виде пересечения с M_u обуславливает необходимость формирования управляющих сигналов АГС1, соответствующих ее возможностям и условиям правильного функционирования во всех режимах. Такими сигналами являются заданные параметры напряжения сети и переменная величина нагрузки. В случае, если величина нагрузки не будет соответствовать генерирующим возможностям АГС1, то даже работоспособная система не сможет выполнять свои функции. Поэтому система ПУ должна обеспечить такое воздействие на АГС1, чтобы в случае отказа хотя бы одного из элементов системы и срабатывания защиты ее техническое состояние, характеризуемое точкой $S(X)$, принадлежало усеченной области правильного функционирования (w_i^q), где w_i^q характеризует i -й режим работы, при котором мощность оставшихся работоспособными ГА соответствует нагрузке сети. При этом

$$H = \bigcup_{i=1}^q w_i^q, \quad q = \overline{1, n}, \quad (2)$$

где w_i^q — усеченная область правильного функционирования, соответствующая i -му режиму работы АГС1;

n — число возможных режимов работы АГС1.

Условие безаварийной работы системы при отказе ее элементов можно записать следующим образом [16]:

$$S(\bar{X}) \in w_i^q = D_z^q \cap M_y^q \cap M_u^q, \quad i = \overline{1, q}, \quad (3)$$

где $D_z^q \in D_z$; $M_y^q \in M_y$; $M_u^q \in M_u$.

Наиболее часто АГС современных судов укомплектованы ГА одинаковой мощности. При этом число режимов функционирования равно числу ГА (p), т. е. $n = p$. В этом случае при отказе любого числа работающих ГА область правильного функционирования, которой должна соответствовать точка $S(X)$, может быть представлена как w_{i-p}^q . Тогда условие безаварийной работы можно записать в следующем виде:

$$S(\bar{X}) \in w_{i-p}^q, \quad (4)$$

где p — количество отключаемых ГА [15].

Если условия (3), (4) не выполняются, то необходимо уменьшить нагрузку сети, например, отключив группу заранее выбранных потребителей электрической энергии. Разгрузка СЭЭС до отключения от сети неработоспособного ГА должна гарантированно предотвратить перегрузку исправных агрегатов и обесточивание судна. Однако весьма низкая степень адаптации современных электроэнергетических систем к появлению неисправностей ограничивает возможность применения такого подхода, и могут возникнуть ситуации, при которых технически невозможно отключить достаточное число потребителей во избежание перегрузки ГА. При этом запуск АДГ по предупредительному сигналу о неработоспособном состоянии хотя бы одного из элементов АГС1 весьма целесообразен. В данном случае запуск резервного агрегата, имеющего большую мощность, чем

АДГ и существенно большее время принятия нагрузки, может оказаться неэффективным в случае выхода из строя ГА при его одиночной работе на нагрузку.

При этом, как и при отказе всех параллельно работающих агрегатов, одновременно с запуском резервной машины следует запустить аварийный дизель-генератор, время запуска которого значительно меньше времени запуска резервной машины. Запущенный АДГ будет готов включиться для питания ответственных потребителей практически одновременно с отключением защитой неработоспособного агрегата. Если время изменения контролируемого параметра от предупредительного до аварийного значения ($t_{изм}$) окажется больше, чем время принятия нагрузки резервного ГА, то последний примет на себя часть нагрузки, система управления СЭЭС отключит неисправную машину и после этого сформирует команду на останов АДГ.

Под *предупредительным сигналом* будем понимать информацию о выходе за заданные пределы параметра Z_k любого из ГА, работающего в данный момент времени в составе АГС1, которая характеризует неработоспособное состояние этого агрегата, при котором он может в течение некоторого времени частично выполнять свои функции [14]. Так, если температура охлаждающей воды дизеля достигнет, например, 95 °С, то в системе аварийно-предупредительной сигнализации сформируется предупредительный сигнал о превышении параметром допустимых пределов. При этом работа ГА не будет удовлетворять всем требованиям технической документации, он считается неработоспособным, но вырабатывает электроэнергию требуемого качества до тех пор, пока температура охлаждающей воды не достигнет 98 °С. При этом значении формируется аварийный сигнал и срабатывает защита, отключая агрегат от сети и сокращая генерирующую способность АГС1. В этой связи в качестве предупредительного сигнала системы предупредительного управления (СПУ) в отдельных случаях можно принять предупредительный сигнал аварийно-предупредительной сигнализации (температура охлаждающей жидкости, минимальное давление смазочного масла), но такой подход приемлем не при всех неисправностях.

В качестве примера рассмотрим ситуацию в АГС1 при выходе из строя системы питания одного из ГА. В этом случае неисправная машина начнет разгружаться, переводя свою нагрузку на работоспособные агрегаты, вплоть до полной разгрузки и перехода в двигательный режим. Если неработоспособный агрегат создает нагрузку, превышающую заданное значение, то через определенный промежуток времени аварийно-предупредительная сигнализация сформирует аварийный сигнал, и защита от обратной мощности отключит отказавший ГА [29]–[31]. Вследствие того, что существуют такие режимы эксплуатации СЭЭС, при которых вполне исправные источники электроэнергии временно переходят в двигательный режим, выбрать в качестве предупредительного сигнала СПУ величину мощности, потребляемой из сети, не представляется возможным. Кроме того, в данной ситуации оставшиеся работоспособными агрегаты могут оказаться перегруженными, что особенно критично при параллельной работе двух машин, когда нагрузка оставшегося в работе ГА удваивается [15].

В этой связи в [16] в качестве предупредительного сигнала предложено использовать величину F_i , описываемую следующим логическим выражением:

$$F_i = L_1 \wedge (L_2 > L_{lim}) \wedge L_3, \quad (5)$$

где L_1 — событие, при котором нагрузка одного ГА уменьшается, а других увеличивается;

$L_2 > L_{lim}$ — разница нагрузок, превышающая допустимое значение;

L_3 — разница нагрузок, продолжающая рост.

При наступлении события, описываемого выражением (5), следует сформировать команду на запуск АДГ. Очевидно, что эффективность превентивного запуска АДГ в существенной степени зависит от характера неисправности и времени $t_{изм}$, но своевременная предупредительная разгрузка сети в большинстве случаев способствует его увеличению, а, следовательно, позволяет сократить время обесточивания судна или вообще исключить его.

Ошибочные действия экипажа обычно связаны с неправомерным отключением работоспособной машины, когда нагрузка сети слишком велика и обесточивание судна может произойти вследствие перегруза оставшихся в работе агрегатов. Если при этом СПУ обеспечивает превентивную защиту СЭЭС от ошибочных действий экипажа, описанную в [28], то запуск АДГ не требуется. Исключением является ситуация, когда один из работающих агрегатов вышел из строя, а обслуживающий персонал в экстремальной ситуации пытается отключить другую машину. В этом случае следует запустить АДГ, если отключаемая нагрузка не сможет компенсировать дефицит мощности АГС1, возникающий из-за отключения неработоспособного ГА.

Успешное функционирование СЭЭС возможно при выполнении ряда внешних условий, охватываемых вектором контролируемых сигналов $\bar{V} = (v_1, \dots, v_r, \dots, v_s)$. К ним относятся характеристики параметров окружающей среды, качество и количество поставляемого топлива, смазочного масла и других технических жидкостей, наличие необходимого объема кислорода в подаваемом в первичный двигатель воздухе. Каждый из этих параметров оказывает существенное влияние на выходные сигналы ГА (например, на величину максимально возможной в данных условиях развиваемой агрегатом мощности, генерирующей способности АГС1 в целом). Выражение, определяющее область работоспособного функционирования системы H , можно представить следующим образом:

$$H = D_z \cap M_y \cap M_u \cap M_v, \quad (6)$$

где M_v — пространство, характеризующее внешние воздействия на систему, которое представляет собой отображение пространства внешних сигналов $\bar{V}$ в пространство выходных параметров функциональных блоков $(\bar{Z}) \Phi_{vz} : D_v \rightarrow M_v, M_v = \bigcap_{k=1}^s M_k$.

Данная зависимость имеет сложный характер и в рамках ПУ непосредственный учет влияния каждого из внешних параметров на ГА приведет к существенным издержкам, поэтому ее практическое применение нецелесообразно. В этой связи наибольший интерес представляет использование понятия *кластера дефектов*, под которым, в соответствии с [26], понимают совокупность неисправностей, приводящих к строго определенному признаку неработоспособного состояния элемента СЭЭС и обуславливающих применение конкретного управляющего воздействия на систему. Поэтому не имеет значения, по какой причине происходит перегрев двигателя одиночно работающего ГА, а именно: прекратилась подача забортной воды в систему охлаждения, вышел из строя холодильник или выше допустимого значения поднялась температура окружающей среды. В любом случае при достижении температурой охлаждающей воды предупредительного значения СПУ должно сформировать команду на разгрузку сети и превентивный запуск АДГ. При этом система управления СЭЭС подает команду на запуск резервного ГА.

В рамках настоящего подхода следует учитывать высокую вероятность обесточивания в аварийных режимах работы судна. При этом, как показано в [17], команду на запуск АДГ следует подавать в случае подтопления или пожара в помещении дизель-генераторов. В первом случае при достижении уровня воды обмоток генераторов произойдет пробой изоляции, выход из строя ГА и обесточивание судна. В случае пожара температура в помещении может повыситься до уровня, при котором система охлаждения не будет справляться со своими функциями, дизели перегреются и ГА будут отключены защитой. При этом велика вероятность того, что вследствие большого задымления концентрация кислорода резко упадет, и приводные двигатели заглохнут.

В случае пожара в помещении дизель-генераторов, в соответствии с инструкциями по борьбе за живучесть судна, члены экипажа перекрывают быстрозапорные клапаны, прекращают подачу топлива и смазочного масла с целью недопущения переноса пламени на соответствующие цистерны [17], что также может привести к обесточиванию судна. В подобных случаях, как правило, времени для запуска АДГ достаточно и при условии превентивного запуска перерыва в электрообеспечении ответственных потребителей не произойдет, судно не потеряет ход, будет работать рулевое управление, пожарный и осушительный насосы.

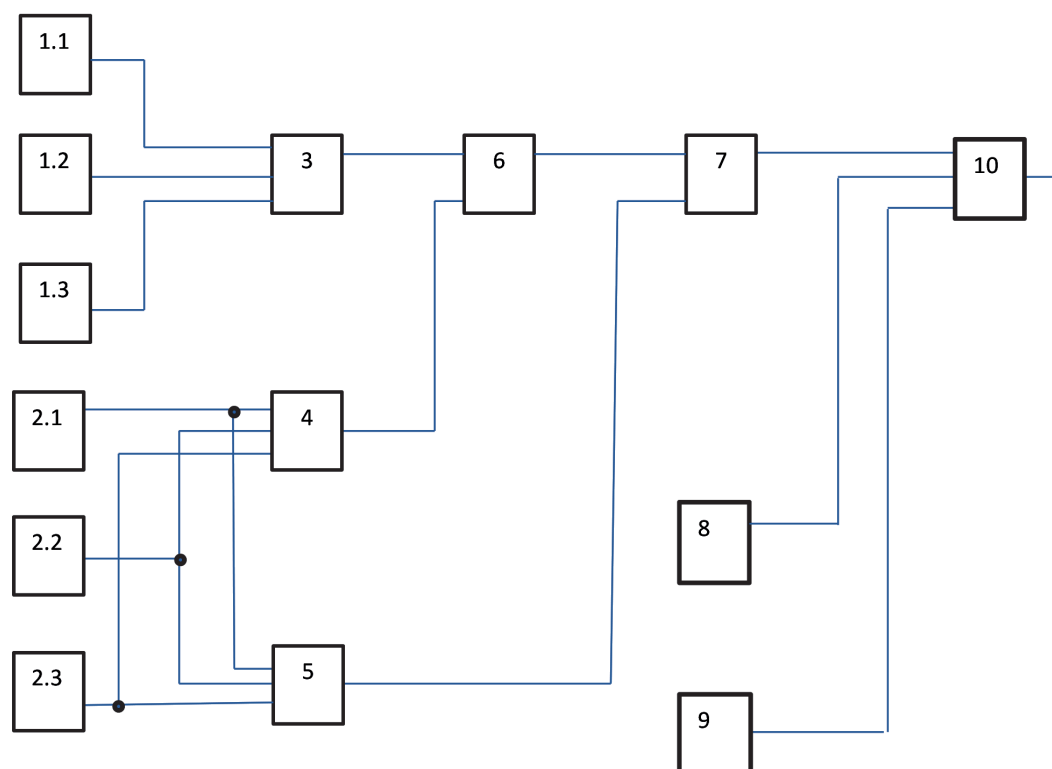
Таким образом, в случае угрозы обесточивания судна осуществляется запуск АДГ, что и в момент исчезновения напряжения на шинах ГРЩ осуществляется мгновенный переход питания ответственных потребителей от АГС1 к АГС2. При этом происходит структурная адаптация СЭЭС к аварийной ситуации с минимальным перерывом в электроснабжении или вообще без перерыва в питании ответственных потребителей.

Результаты (Results)

Разработанный способ предполагает формирование команды на запуск АДГ в следующих случаях:

- при идентификации неработоспособного состояния хотя бы одного из работающих ГА, если его отключение может привести к обесточиванию судна;
- судно находится в аварийном режиме работы, при котором возможен внезапный отказ всех работающих ГА.

Практическая реализация предложенного подхода возможна посредством превентивного запуска АДГ, функциональная схема которого для судовой электростанции, имеющей в своем составе три ГА, приведена на рисунке.



Функциональная схема устройства превентивного запуска АДГ

Условные обозначения:

- 1.1–1.3 — датчики мощности первого, второго и третьего ГА соответственно;
2.1–2.3 — блоки формирования обобщенного сигнала о неисправности соответствующего ГА;
3 — суммирующий блок; 4 — блок формирования сигнала, пропорционального прогнозируемому значению максимальной мощности, которую сможет генерировать судовая электростанция после отключения неработоспособных агрегатов; 5 — первый логический элемент «ИЛИ»;
6 — блок сравнения; 7 — логический элемент «И»; 8 — блок контроля уровня воды в помещении ГА;
9 — блок контроля возникновения пожара в помещении ГА;
10 — второй логический элемент «ИЛИ»

На выходе каждого из датчиков мощности 1.1–1.3 формируется сигнал, пропорциональный текущему значению мощности первого, второго и третьего ГА соответственно (N_1, N_2, N_3).

Блок 3 суммирует сигналы, поступающие на его входы, в результате на его выходе формируется сигнал, пропорциональный суммарной нагрузке сети: $N_{\text{общ}} = N_1 + N_2 + N_3 = \bigcup_{i=1}^3 N_i$, который передается на первый вход блока сравнения 6.

Предположим, что в составе основной электростанции работают однотипные генераторы с номинальной мощностью $N^{\text{ном}}$. При этом допустим, что $N_1 = 0,75N^{\text{ном}}$, $N_2 = 0,8N^{\text{ном}}$, $N_3 = 0,7N^{\text{ном}}$. Тогда на выходе блока 3 сформируется сигнал, пропорциональный $N_{\text{общ}} = 2,25N^{\text{ном}}$, который поступит на первый вход блока сравнения. Предположим, что на дизеле третьего ГА вышла из строя система охлаждения и температура охлаждающей воды превысила предупредительное значение. При этом на выходе блока 2.3 появится сигнал логической «1», который поступит на третий вход блока 4, на выходе которого сформируется сигнал $\bigcup_{i=1}^{n-m} N_i^{\text{ном}} = \bigcup_{i=1}^2 N_i^{\text{ном}} = 2N_i^{\text{ном}}$, который поступит на второй вход блока 6. На выходе первого логического элемента «ИЛИ» появится сигнал логической «1», который поступит на второй вход логического элемента «И».

Сигнал, поступающий на первый вход блока сравнения, превышает сигнал, поступающий на его второй вход, следовательно, на его выходе генерируется сигнал логической «1». Этот сигнал поступит на первый вход логического элемента «И» 7, на выходе которого появится сигнал логической «1», который поступит на первый вход блока 10. При этом на выходе устройства сформируется команда на запуск АДГ в виде сигнала логической «1» на выходе второго логического элемента «ИЛИ» 10. В случае подтопления или пожара в помещении дизель-генераторов, соответственно на выходе блока 8 или 9, появится сигнал логической «1». Эта информация поступит на соответствующий вход второго логического элемента «ИЛИ», который сформирует команду на запуск АДГ. Если $t_{\text{изм}}$ окажется больше, чем время запуска АДГ, то при исчезновении напряжения на шинах ГРЩ аварийный источник практически мгновенно примет нагрузку, обеспечив электроснабжение ответственных потребителей. Устройство, реализующее предложенный способ, прошло подконтрольную эксплуатацию, продемонстрировав свою эффективность.

Обсуждение (Discussion)

Превентивный запуск АДГ в большинстве случаев позволяет исключить или хотя бы существенно сократить перерыв в электроснабжении ответственных потребителей, от функционирования которых зависит живучесть судна и безопасность членов его экипажа. При этом практически все классификационные общества, в том числе Российский морской регистр судоходства и Российский речной регистр судоходства, регламентируют формирование команды на запуск АДГ только при исчезновении напряжения на шинах ГРЩ. Однако, по мнению автора статьи, предложенный подход лишь дополняет существующий способ автоматического запуска АДГ при потере электропитания от основного источника электроэнергии и не противоречит п. 9.3.4.2 ч. XI Правил РС и п. 3.2 Правила 43 Международной конвенции СОЛАС [17]. В этой связи вопрос о внесении соответствующих дополнений в указанные документы представляется весьма актуальным.

Выводы (Summary)

В результате проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Превентивный запуск АДГ существенным образом способствует решению актуальной задачи сокращения времени от момента исчезновения напряжения на шинах ГРЩ до принятия нагрузки аварийным дизель-генератором.
2. Предложенный подход хорошо дополняет существующие способы управления и защиты СЭЭС.
3. Способ превентивного запуска АДГ прост в реализации, не требует разработки специальных датчиков и сложных функциональных блоков. Его применение на судах позволит существенно повысить надежность электроснабжения ответственных потребителей.
4. Предложенный подход представляет собой один из способов реализации метода превентивной защиты СЭЭС в рамках ПУ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Абрамович Б. Н.* Система бесперебойного электроснабжения предприятий горной промышленности / Б. Н. Абрамович // Записки горного института. — 2018. — Т. 229. — С. 31–40. DOI: 10.25515/PMI.2018.1.31.
2. *Воропай Н. И.* Противоаварийное управление нагрузкой для обеспечения гибкости электроэнергетических систем / Н. И. Воропай, М. В. Чулюкова // Вестник Иркутского государственного технического университета. — 2020. — Т. 24. — № 4 (153). — С. 781–794. DOI: 10.21285/1814-3520-2020-4-781-794.
3. *Седнев В. А.* Инженерно-технические мероприятия по подготовке электроэнергетических сооружений и систем к устойчивому функционированию / В. А. Седнев // Технологии техносферной безопасности. — 2019. — № 1 (83). — С. 139–150. DOI: 10.25257/TTS.2019.1.83.139-150
4. *Гражданская защита: Энциклопедия: в 4 т / Под общ. ред. С. К. Шойгу.* — М.: Московская тип. № 2, 2006. — Т. I (А–И).
5. *Папков Б. В.* Об анализе последствий от нарушений электроснабжения / Б. П. Папков, В. А. Савельев // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. — 2016. — № 3. — С. 46–50.
6. *Жилкина Ю. В.* Отказ электросетевого оборудования в системе управления активами: методика оценки ущерба / Ю. В. Жилкина // Вестник Казанского государственного энергетического университета. — 2019. — Т. 11. — № 4 (44). — С. 94–101.
7. *Душин В. К.* Системы бесперебойного питания локальных вычислительных сетей / В. К. Душин, И. И. Саморуков, Н. Н. Теодорович, А. Н. Феоктистов // Электротехнические и информационные комплексы и системы. — 2006. — Т. 2. — № 2. — С. 19–22.
8. *Резников С.* Резервно-аккумуляторные источники бесперебойного питания для автономных и сетевых систем электроснабжения со звеном постоянного повышенного напряжения / С. Резников, С. Климова, И. Харченко, В. Смирнов, В. Савостьянов // Силовая электроника. — 2016. — Т. 2. — № 59. — С. 34–38.
9. *Самсыгин В. К.* Разработка и создание источников бесперебойного питания систем энергообеспечения морского исполнения / В. К. Самсыгин, Д. В. Соколов, Д. И. Улитовский, М. Ю. Сергеев, А. А. Мартынов // Труды Крыловского государственного научного центра. — 2019. — № 2 (388). — С. 101–111. DOI: 10.24937/2542-2324-2019-2-388-101-111.
10. *Аминов Р. З.* Комплексная оценка показателей надежности резервных дизель-генераторов атомных электростанций / Р. З. Аминов // Труды Академэнерго. — 2019. — № 1 (54). — С. 72–80.
11. *Пичугин Д. Д.* Автоматизация дизель-генераторной установки / Д. Д. Пичугин, Е. А. Чабанов // Транспорт: проблемы, цели, перспективы (Transport 2021): Материалы II Всероссийской научно-технической конференции с международным участием / Под ред. Е. В. Чабановой. — Пермь: Пермский филиал Федерального госбюдж. образов. учрежд. ВО «Волжский государственный университет водного транспорта», 2021. — С. 236–240.
12. *Жирохова Е. А.* Принципы совершенствования методики проектирования судовой аварийно-стояночной электростанции / Е. А. Жирохова // Труды Крыловского государственного научного центра. — 2021. — № S1. — С. 56–57. DOI: 10.24937/2542-2324-2021-1-S-1-56-57.
13. *Кузнецов С. Е.* Определение надежности электроснабжения судовых ответственных приемников электроэнергии / С. Е. Кузнецов, Н. А. Алексеев, А. А. Виноградов // Морские интеллектуальные технологии. — 2020. — № 4–2 (50). — С. 22–26. DOI: 10.37220/MIT.2020.50.4.067.
14. *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.
15. *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.
16. *Saushev A.* Preventive protection of marine electrical power system from the transition of generating sets to motoring mode / A. Saushev, N. Shirokov // E3S Web of Conferences. — EDP Sciences, 2021. — Vol. 244. — Pp. 08007. DOI: 10.1051/e3sconf/202124408007.
17. *Широков Н. В.* Превентивная защита судовой электроэнергетической системы с параллельно работающими генераторными агрегатами / Н. В. Широков // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2021. — № 62–63. — С. 121–130.

18. Пат. 2681940 Российская Федерация, МПК H02H3/08 (2020.03). Способ защиты судовой электроэнергетической системы / Н. В. Широков // Заяв. и патентообл. ООО «Форпик Стандарт Сервис». — № 2018110027; заявл. 27.03.2018; опубл. 14.03.2019, Бюл. № 8. — 17 с.
19. Пат. 2731762 Российская Федерация, МПК H02H3/08 (2020.03). Способ защиты судовой электроэнергетической системы / Н. В. Широков // Заяв. и патентообл. ООО «Форпик Стандарт Сервис». — № 2019133753; заявл. 22.10.2019; опубл. 08.09.2020, Бюл. № 25. — 9 с.
20. Каракаев А. Б. Контроль и управление коммутационными состояниями электрических сетей / А. Б. Каракаев, А. В. Луканин, Н. И. Николаев, Е. В. Хекерт // Морские интеллектуальные технологии. — 2019. — № 1–2 (43). — С. 46–54.
21. Портнягин Н. Н. Исследование виртуальных моделей защиты генератора от обратной мощности в судовой электроэнергетической системе / Н. Н. Портнягин, С. Ю. Труднев // Вестник Камчатского государственного технического университета. — 2011. — № 18. — С. 32–35.
22. 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.
23. 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.
24. Kondrateva O. E. Analysis of the Applicability of Key Risk Assessment Methods for Solving Problems of Reducing Accidents at Energy Facilities / O. E. Kondrateva, M. K. Romashov, O. A. Loktionov // 2021 3rd International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE). — IEEE, 2021. — Pp. 1–5. DOI: 10.1109/REEPE51337.2021.9388031.
25. Болгаров С. П. Анализ информации по авариям ледоколов и транспортных судов с атомными энергетическими установками / С. П. Болгаров, В. М. Воробьев, А. В. Воронцов, Р. А. Иванов // Труды Центрального научно-исследовательского института им. академика А. Н. Крылова. — 2009. — № 45 (329). — С. 111–128.
26. Саушев А. В. Оперативная идентификация технического состояния судовой электростанции для решения задач предупредительного управления / А. В. Саушев, Н. В. Широков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2022. — Т. 14. — № 2. — С. 306–318. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-2-306-318.
27. Саушев А. В. Основы управления состоянием электротехнических систем объектов водного транспорта: моногр / А. В. Саушев. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2015. — 215 с.
28. 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.
29. Yaghoobi H. Fast predictive technique for revers power detection in synchronous generator / H. Yaghoobi // IET Electric Power Applications. — 2018. — Vol. 12. — Is. 4. — Pp. 508–517. DOI: 10.1049/iet-epa.2017.0491.
30. Samami M. Novel fast and secure approach for revers power protection in synchronous generators / M. Samami, M. N. Azary // IET Electric Power Applications. — 2019. — Vol. 13. — Is. 12. — Pp. 2128–2138. DOI: 10.1049/iet-epa.2018.5961.
31. 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. — Pp. 102897–102906. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2997821.

REFERENCES

1. Abramovich, Boris N. “Uninterruptible power supply system for mining industry enterprises.” *Journal of Mining Institute* 229 (2018): 31–40. DOI: 10.25515/PMI.2018.1.31.
2. Voropai, Nikolai I., and Margarita V. Chulyukova. “Emergency load control for power system flexibility.” *iPolytech Journal* 24.4(153) (2020): 781–794. DOI: 10.21285/1814-3520-2020-4-781-794.
3. Sednev, V.A. “Engineering and technical measures for the preparation of electric power facilities and systems for sustainable operation.” *Technology of technosphere safety* 1(83) (2019): 139–150. DOI: 10.25257/TTS.2019.1.83.139-150.
4. Shoigu, S.K., ed. *Grazhdanskaya zashchita*. Vol. I (A–I). M.: Moskovskaya tipografiya № 2, 2006.

5. Papkov, B. V., and V. A. Savelyev. "Analysis of power supply interruption consequences." *Vestnik IGEU* 3 (2016): 46–50.
6. Zhilkina, Yulia V. "The failure of the electric grid equipment in the asset management system: methodology of assessment of damage." *Bulletin of the Kazan State Power Engineering University* 11.4(44) (2019): 94–101.
7. Dushin, V. K., I. I. Samorukov, N. N. Teodorovich, and A. N. Feoktistov. "Uninterruptible power supply systems of the local area networks." *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy* 2.2 (2006): 19–22.
8. Reznikov, S., S. Klimova, I. Kharchenko, V. Smirnov, and V. Savost'yanov. "Rezervno-akkumulyatornye istochniki bespereboynogo pitaniya dlya avtonomnykh i setevykh sistem elektroobrazovaniya so zvenom postoyanogo povyshennogo napryazheniya." *Silovaya elektronika* 2.59 (2016): 34–38.
9. Samsygin, Vadim K., Dmitry V. Sokolov, Dmitry I. Ulitovsky, Maxim Yu. Sergeev, and Alexandr A. Martynov. "Design and development of UPS for marine power systems." *Transactions of the Krylov State Research Centre* 2(388) (2019): 101–111. DOI: 10.24937/2542-2324-2019-2-388-101-111.
10. Aminov, R. Z. "Comprehensive assessment of the reliability of backup diesel generators of nuclear power plant." *Transactions of Academenergo* 1(54) (2019): 72–80.
11. Pichugin, D. D., and E. A. Chabanov. "Automation of the diesel generator set." *TRANSPORT: PROBLEMY, TsELI, PERSPEKTIVY (TRANSPORT 2021)*. Perm': Volzhskii gosudarstvennyi universitet vodnogo transporta, 2021. 236–240.
12. Zhirokhova, E.A. "The principles of improving the design methodology for a ships emergency parking power plant." *Transactions of the Krylov State Research Center SI* (2021): 56–57. DOI: 10.24937/2542-2324-2021-1-S-I-56-57.
13. Kuznetsov, Sergey E., Nikolay A. Alekseev, and Andrey A. Vinogradov. "Determination of reliability of power supply of ship's responsible power receivers." *Marine intellectual technologies* 4–2(50) (2020): 22–26. DOI: 10.37220/MIT.2020.50.4.067.
14. 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.
15. 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.
16. Saushev, Alecsandr, and Nikolai Shirokov. "Preventive protection of marine electrical power system from the transition of generating sets to motoring mode." *E3S Web of Conferences*. Vol. 244. EDP Sciences, 2021. DOI: 10.1051/e3sconf/202124408007.
17. Shirokov, N. V. "Preventive protection of the ship's electric power system with parallel generators sets." *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping* 62–63 (2021): 121–130.
18. Shirokov, N. V. RU 2 681 940 C1, IPC H02H3/08. Method of protection of the ship electric power systems. Russian Federation, assignee. Publ. 14 March 2019.
19. Shirokov, N. V. RU 2 731 762 C1, IPC H02H3/08. Method of protection of the ship electric power systems. Russian Federation, assignee. Publ. 8 September 2020.
20. Karakayev, Alexander B., Andrey V. Lukanin, Nikolay I. Nikolaev, and Evgeniy V. Heckert. "Control and management of the switching conditions electric networks." *Marine intellectual technologies* 1–2(43) (2019): 46–54.
21. Portnyagin, Nikolaj N., and Sergej U. Trudnev. "Research of virtual models of protection of the generator from return capacity in a ship electropower system." *Vestnik Kamchatskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta* 18 (2011): 32–35.
22. 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.
23. 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.
24. Kondratyeva, 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.

25. Bolgarov, S. P., V. M. Vorobyev, A. V. Vorontsov, and R. A. Ivanov. "Analysis of accident reports regarding operation of nuclear ice-breakers and transport ships." *Transactions of the Krylov State Research Centre* 45(329) (2009): 111–128.

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

27. Saushev, A. V. *Osnovy upravleniya sostoyaniem elektrotekhnicheskikh sistem ob'ektov vodnogo transporta*. SPb.: Izd-vo GUMRF im. adm. S. O. Makarova, 2015.

28. 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 admirala S. O. Makarova* 13.3 (2021): 430–441. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-3-430-441.

29. Yaghobi, Hamid. "Fast predictive technique for reverse power detection in synchronous generator." *IET Electric Power Applications* 12.4 (2018): 508–517. DOI: 10.1049/iet-epa.2017.0491.

30. Samami, Mehdi, and Milad Niaz Azari. "Novel fast and secure approach for reverse power protection in synchronous generators." *IET Electric Power Applications* 13.12 (2019): 2128–2138. DOI: 10.1049/iet-epa.2018.5961.

31. Unahalekhaka, Pramuk, and Panot Sripakarach. "Reduction of reverse power flow using the appropriate size and installation position of a BESS for a PV power plant." *IEEE Access* 8 (2020): 102897–102906. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2997821.

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 11 июля 2022 г.

Received: July 11, 2022.