

DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-4-789-800

## PREVENTIVE PROTECTION OF AUTONOMOUS ELECTRIC POWER SYSTEMS FROM GENERATORS REVERSE POWER

**N. V. Shirokov**

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

*Development of approaches that ensure the safe operation of an Autonomous electric power system in abnormal modes associated with the failure of its elements during operation is considered in the paper. Special attention is paid to the processes that occur in the network when one of the generator units switches to the motor mode of operation. The problem of timely shutdown of an inoperable machine at the moment of its complete unloading in order to prevent overloading of the reverse power of the remaining primary engines in the operable state is formulated. The relevance of this problem for Autonomous electric power systems is proved. It is shown that the use of time delay when generating a signal to disable a failed unit operating with reverse power can not only contribute to the development of a primary engine defect, but also lead to voltage disappearance in the Autonomous electric power system. This circumstance leads to the possibility of an emergency situation that can lead to an accident at the diagnostic facility with the most severe consequences. In this paper, the problem of timely disconnection of the faulty machine at a time when its load is zero in order to prevent overloading the reverse power of the remaining primary engines in the working state is formulated. The analysis of the performance area constructed in the space of power values developed by generator units operating in parallel is performed. The necessity of blocking the process of diagnosing power sources in the mode of switching on parallel operation of one of the generators or in the case of failure of automation means of the Autonomous power system is justified. Based on the study results, an original diagnostic feature that allows identifying the inoperable state of the generator unit during operation is proposed. Its use for the purposes of precautionary control makes it possible to turn off the automatic switch on before the generator switches to the motor mode, prevents overload of the network of the Autonomous electric power system with reverse power and reduces the probability of further development of the failed machine defect. A mathematical description of this diagnostic feature and a method for determining the numerical value of the controlled parameters forming it are proposed. Based on the obtained research results, a new algorithm for precautionary control has been developed; it provides preventive protection of the network from the reverse power of the generator. The advantages of the proposed approach over existing methods for managing the Autonomous electric power system in emergency situations are demonstrated.*

*Keywords: Autonomous electric power system, reverse power, warning control, diagnostic sign, overload of generator sets, preventive protection.*

**For citation:**

Shirokov, Nikolaj V. "Preventive protection of autonomous electric power systems from generators reverse power." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.4 (2020): 789–800. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-4-789-800.

**УДК 621.316:658.58**

## ПРЕВЕНТИВНАЯ ЗАЩИТА АВТОНОМНЫХ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ОТ ОБРАТНОЙ МОЩНОСТИ ГЕНЕРАТОРОВ

**Н. В. Широков**

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

*Статья посвящена разработке подходов, обеспечивающих безопасную работу автономной электроэнергетической системы в нештатных режимах, связанных с отказом ее элементов в процессе эксплуатации. Особое внимание уделено процессам, происходящим в сети при переходе одного из генераторов в двигательный режим работы. Обоснована актуальность рассматриваемой проблемы для автономных электроэнергетических систем. Показано, что применение выдержки времени при формировании сигнала*

на отключение вышедшего из строя агрегата, работающего с обратной мощностью, может не только способствовать развитию дефекта первичного двигателя, но и привести к исчезновению напряжения в автономной электроэнергетической системе. Данное обстоятельство обуславливает возможность возникновения аварийной ситуации, способной привести к аварии на объекте диагностирования с самыми тяжелыми последствиями. В работе сформулирована задача своевременного отключения неисправной машины в момент, когда ее нагрузка равна нулю, с целью предотвращения перегрузки обратной мощностью оставшихся в работоспособном состоянии первичных двигателей. Выполнен анализ области работоспособности системы, построенной в пространстве значений мощностей, развиваемых генераторными агрегатами, работающими параллельно. Обоснована необходимость в блокировании процесса диагностирования источников электроэнергии в режиме включения на параллельную работу одного из генераторов или в случае выхода из строя средств автоматизации автономной электроэнергетической системы. По результатам проведенного исследования предложен оригинальный диагностический признак, позволяющий идентифицировать неработоспособное состояние генераторного агрегата в процессе функционирования. Отмечается, что использование диагностического признака в целях предупредительного управления делает возможным отключение автоматического выключателя накануне перехода генератора в двигательный режим, обеспечивает предотвращение перегрузки сети автономной электростанции обратной мощностью и уменьшает вероятность дальнейшего развития дефекта отказавшей машины. Предложено математическое описание данного диагностического признака и методика определения численного значения формирующих его контролируемых параметров. На основе полученных результатов исследований разработан новый алгоритм предупредительного управления, обеспечивающий превентивную защиту сети от обратной мощности генератора. Продемонстрированы преимущества предложенного подхода перед существующими способами управления автономной электроэнергетической системой в нештатных ситуациях.

*Ключевые слова:* автономная электроэнергетическая система, обратная мощность, предупредительное управление, диагностический признак, перегрузка генераторных агрегатов, превентивная защита.

**Для цитирования:**

Широков Н. В. Превентивная защита автономных электроэнергетических систем от обратной мощности генераторов / Н. В. Широков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 4. — С. 789–800. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-4-789-800.

## Введение (Introduction)

Автономные электроэнергетические системы (АЭЭС) выполняют ответственные функции по обеспечению электрической энергией удаленных и труднодоступных объектов, для которых электроснабжение от Единой энергетической системы России оказывается невозможным или нецелесообразным. В этой связи ведутся активные исследования, направленные на улучшение качественных показателей электроэнергии, поставляемой АЭЭС с учетом специфики ее потребителей. К таким потребителям традиционно относятся: предприятия минерально-сырьевого сектора экономики [1]–[3]; населенные пункты и порты, расположенные в местах, где прокладка воздушных линий электропередач крайне затруднена по климатическим или политическим условиям [4], [5]; предприятия транспорта, особенно суда морского и речного флота [6]–[8].

Вместе с тем последние годы охарактеризованы бурным развитием подходов, реализующих технологию Smart Grid (интеллектуальных сетей) для повышения эффективности использования энергетических ресурсов [9], [10]. В рамках данной концепции предполагается целесообразным размещение генераторных агрегатов (ГА) и низковольтных распределительных устройств, получивших название *установок распределенной генерации* (УРГ), которые находятся в непосредственной близости от потребителей [11]–[13]. Данные установки могут работать параллельно с электроэнергетической системой более высокого уровня или самостоятельно обеспечивать электроснабжение закрепленных за ними потребителей, реализуя островной режим эксплуатации. При этом УРГ могут создавать энергетические кластеры распределенной генерации с параллельной работой ГА, которые при функционировании в островном режиме полностью идентичны АЭЭС. Указанное обстоятельство существенно расширяет ареал использования автономных систем электроснабжения и в значительной степени инициирует проведение более активных исследований в данной области электроэнергетики.

В этой связи большой интерес представляют разработки, направленные на повышение безопасной работы АЭЭС в нештатных режимах, связанных с отказом ее элементов в процессе эксплуатации. Одним из направлений данных разработок является создание средств, обеспечивающих своевременное отключение ГА при переходе его в двигательный режим ввиду отказа приводного двигателя [14]–[16]. В статьях [14], [15] авторы справедливо полагают, что формирование сигнала на отключение ГА при переходе его в двигательный режим работы, осуществляемое с выдержкой времени, может привести к серьезным повреждениям первичного двигателя. Для решения проблемы предлагаются оригинальные алгоритмы точного определения момента появления обратной мощности для оперативного отключения агрегата. Однако замена не совсем качественных реле, работающих с большой погрешностью, на современные и более точные устройства позволяет получить приемлемый результат применительно только к простейшим АЭЭС, которые не имеют в своем составе мощных потребителей, создающих нагрузку, соизмеримую с мощностью генератора и грузоподъемных механизмов, работающих с рекуперацией энергии в сеть. В большинстве случаев кратковременная работа в двигательном режиме является одним из возможных вариантов функционирования работоспособного агрегата. В этом случае применение предложенных технических решений приводит к появлению ошибки первого рода при диагностировании и ошибочному отключению исправного ГА.

Практика показывает, что принципиальная ошибка данного подхода заключается в излишней концентрации исследователей на конкретном ГА, игнорировании режимов функционирования АЭЭС и изменении параметров остальных агрегатов, работающих параллельно, исходя из предположения из предположения, что основной целью защиты от обратной мощности является предотвращение серьезных повреждений первичного двигателя, что не вполне корректно. В случае отказа одного из ГА его нагрузка перераспределяется между оставшимися работоспособными машинами. При этом если исходно работают только два агрегата, то нагрузка на работающий ГА с учетом обратной мощности увеличивается более чем в два раза. Как правило, это приводит к остановке первичного двигателя по перегрузке и перерыву в электроснабжении потребителей, что может вызвать нарушения технологических процессов и большие экономические потери, например, при добыче полезных ископаемых.

Не менее серьезные проблемы могут возникать и на транспорте. Так, время восстановления электроснабжения судовых электросетей после обесточивания колеблется в диапазоне от нескольких десятков секунд до нескольких минут [17], в течение которых судно лишено управления, а зачастую и хода. При возникновении подобной ситуации во время шторма или в узкостях, во время маневрирования в районе рифов или прибрежных скал возникает реальная опасность гибели судна и членов экипажа. В этой связи своевременное отключение неработоспособного агрегата до его перехода в двигательный режим работы является важной задачей, решение которой необходимо также для предотвращения перегрузки обратной мощностью оставшихся в работе ГА. При этом простой фиксации момента, когда началось потребление электроэнергии генератором, для идентификации его технического состояния недостаточно, необходимо учитывать также дополнительные параметры.

В работе [18] рассмотрен ряд подходов к диагностированию сложных систем с учетом информации о границах их областей работоспособности. В этой связи в статье [16] предложен метод сегментации области работоспособности с разбиением ее на усеченные области правильного функционирования, которым соответствуют установленные режимы работы АЭЭС. Выделены те из них, при которых ГА работает как электродвигатель и в соответствующие им режимы функционирования электроэнергетической системы идентификация неработоспособного состояния ГА не производится. Эти усеченные области правильного функционирования в работе [19] названы *омонимичными*. При этом представляется возможным отключать ГА, перешедший в двигательный режим работы, без выдержки времени при условии, что АЭЭС не работает в установленных режимах, как показано в работе [16], или ее параметры не принадлежат омонимичной области правильного функционирования в соответствии со статьей [19].

На рис. 1 показана область работоспособности  $H$ , построенная в пространстве внутренних параметров  $N_1$  и  $N_2$ , для плавучего крана Luft-1 [19]. При этом  $N_1$  и  $N_2$  — мощности, развиваемые, соответственно, первым и вторым генераторными агрегатами, номинальная мощность каждого из которых равна 900 кВт. Максимальная величина обратной мощности каждого агрегата составляет 140 кВт, а допустимая величина отклонения мощностей при параллельной работе (точность распределения нагрузок) — 7 % от номинальной мощности, т. е. 63 кВт.

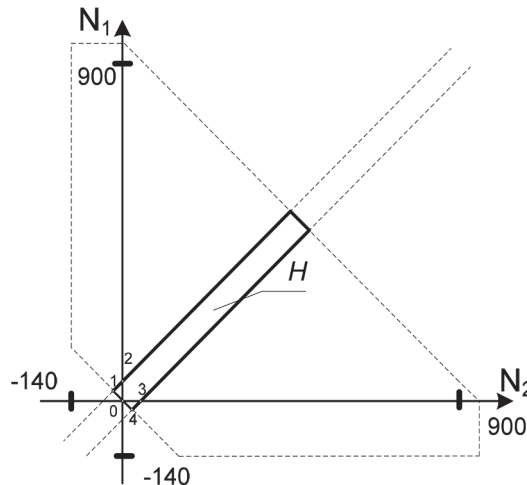


Рис. 1. Область работоспособности  $H$  плавучего крана Luft-1, построенная в пространстве внутренних параметров  $N_1, N_2$

Согласно методу исключения омонимичных областей [19], при переходе одного из ГА в двигательный режим работы проверяют  $S(N_1, N_2)$  — точку, характеризующую мощности, развиваемые агрегатами, входящими в состав АЭС, на принадлежность омонимичным областям правильного функционирования, ограниченными точками 0-1-2 и 0-3-4. Если при переходе первого ГА в двигательный режим выполняется условие

$$S \subset w_1^q, \quad (1)$$

то соответствующий агрегат признают работоспособным и не отключают по обратной мощности. В случае выполнения условия

$$S \subset w_2^q \quad (2)$$

при переходе в двигательный режим не отключают второй ГА.

В выражениях (1) и (2)  $w_1^q$  и  $w_2^q$  — омонимичные области правильного функционирования, принадлежащие области работоспособности  $H$ . Данный подход позволяет избежать ошибки первого рода при диагностировании ГА и в отличие от способов, описанных в работах [14], [15], его применение не приводит к отключению работоспособных агрегатов.

Недостатком предложенного решения является относительная сложность практической реализации, связанная с необходимостью решения задачи принадлежности точки  $S(N_1, N_2)$  треугольнику, ограниченному точками 0-1-2 или 0-3-4 при каждом появлении обратной мощности.

### Методы и материалы (Methods and Materials)

Для определения диагностических признаков перехода неработоспособного ГА в двигательный режим работы воспользуемся логико-алгоритмическим методом. На рис. 1 область работоспособности пересекает оси абсцисс и ординат в точках 3 и 2 соответственно. По материалам, изложенным в статье [18], назовем эти точки и точку начала координат *опорными*. Рассмотрим усеченную область правильного функционирования  $w_1^q$ . Опорная точка 2 характеризует состояние



полной разгрузки второго ГА перед его переходом в двигательный режим ( $N_2 = 0$ ). Отрезок 0-2 соответствует максимально допустимому значению мощности, развиваемой первым ГА, если оба агрегата и система распределения нагрузок работоспособны ( $N_{1\text{ доп}}$ ). Эта величина  $\Delta N_{\text{ доп}}$  равна допустимому отклонению разности нагрузок АЭЭС:

$$|N_1 - N_2| \leq \Delta N_{\text{ доп}}. \quad (3)$$

Предположим, что автоматика исправна. Тогда контролируя величину нагрузки первого ГА в момент полной разгрузки и перехода второго ГА в двигательный режим работы, можно идентифицировать неработоспособное состояние агрегата, функционирующего в двигательном режиме, как показано в работе [20]. В этой связи точное определение момента появления обратной мощности посредством алгоритмов, предложенных в [14], [15], представляет существенный интерес.

Системы распределения нагрузок современных АЭЭС достаточно надежны, однако допущение об их исправности в момент принятия решения об идентификации технического состояния ГА не совсем корректно. Рассмотрим часть области работоспособности  $H$ , расположенную во втором квадранте декартовой системы координат  $N_1, N_2$ , которая не предполагает работу ГА в двигательном режиме. В этом случае переход системы распределения нагрузок в неработоспособное состояние приводит к смещению точки  $S(N_1, N_2)$  за границы области работоспособности вследствие нарушения неравенства (3), что может привести к ошибочному отключению работоспособного ГА в момент его полной разгрузки. В то же время существенным фактором для определения параметров, характеризующих наличие дефектов в системе управления, является то, что область  $H$ , представленная на рис. 1, отображает работу АЭЭС в установившемся режиме. Данное изображение не учитывает резкое изменение нагрузок, соизмеримых с мощностью ГА. В этой связи следует отметить, что время восстановления условия (3) для работоспособной системы управления (СУ) обычно составляет 2–3 с ( $t_2$ ), но не более 5 с по Правилам Российского морского регистра судоходства ( $t_{2\text{ доп}}$ ). Тогда диагностическим признаком перехода системы распределения активных нагрузок АЭЭС в неработоспособное состояние ( $\bar{L}_2$ ) можно считать время, в течение которого условие (3) не выполняется, т. е. условие перехода СУ в неработоспособное состояние можно записать следующим образом:

$$\bar{L}_2 \rightarrow t_2 > t_{2\text{ доп}}. \quad (4)$$

Однако в случае отказа первичного двигателя ГА его нагрузка начинает уменьшаться, а нагрузка оставшегося в работоспособном состоянии агрегата — расти. При этом условие (3) также нарушается и поэтому оно не может служить диагностическим признаком для идентификации причины дефекта. С другой стороны, неисправности, возникающие в ГА, разнообразны и имеют различные признаки, контроль которых часто вызывает трудности его технической реализации и имеет высокую стоимость. В данном случае универсальным параметром, характерным для любого отказа, можно считать время, в частности интервал времени от момента невыполнения условия (3) до момента полной разгрузки неработоспособного агрегата и появления обратной мощности ( $t_1$ ). Эта величина зависит от причины возникновения дефекта и условий функционирования АЭЭС. Так, в случае прекращения подачи воздуха в дизель он глохнет и его генератор переходит в двигательный режим работы в течение 1 с, а в случае отказа топливной системы обратная мощность может появиться как через 2 с, так и через 20 с. Последнее обстоятельство определяется количеством оставшегося топлива в системе, величина которого зависит от типа и количества топливных фильтров, диаметра трубопроводов, места дефекта, а также от величины нагрузки. При этом можно выбрать такое значение времени  $t_1$ , которое будет максимальным для данной АЭЭС ( $t_{1\text{ макс}}$ ), например, время, равное 20 с. В этом случае условие идентификации неработоспособного состояния СУ можно записать в виде

$$\bar{L}_2 \rightarrow t_2 > t_{1\text{ макс}}. \quad (5)$$

Система управления неработоспособна, если время, в течение которого не выполняется условие (3), превышает максимальное значение от момента его невыполнения до момента полной

разгрузки неработоспособного агрегата и появления обратной мощности, принятого для данной АЭЭС. К сожалению, для любой автономной электроэнергетической системы выполняется условие  $t_{2\text{доп}} < t_{1\text{max}}$ . Поэтому утверждение, обратное условию (5), в общем случае неверно. Однако работоспособный ГА переходит в двигательный режим достаточно редко и всего на несколько секунд, поэтому вероятность наступления этого события невелика. Еще меньшая вероятность выхода из строя системы распределения нагрузок АЭЭС и ничтожно мала величина вероятности того, что это событие произойдет в течение периода времени  $t_{1\text{max}}$  или в период действия работоспособного агрегата с обратной мощностью и этой величиной на практике можно пренебречь. Тогда в рамках настоящего исследования можно считать, что СУ АЭЭС работоспособна при невыполнении неравенства (3) в течение интервала времени  $t_{1\text{max}}$ . В этой связи условие работоспособности системы управления можно записать следующим образом:

$$L_2 \rightarrow t_2 \leq t_{1\text{max}}. \quad (6)$$

Тогда идентификация неработоспособного состояния второго ГА в момент перехода его в двигательный режим, с учетом выражения (6), может быть представлена следующим образом:

$$\bar{L}_{1,2} \rightarrow (N_1^{(N_2=0)} > \Delta N_{\text{доп}}) \wedge (t_2 \leq t_{1\text{max}}). \quad (7)$$

Аналогично для первого ГА:

$$\bar{L}_{1,1} \rightarrow (N_2^{(N_1=0)} > \Delta N_{\text{доп}}) \wedge (t_2 \leq t_{1\text{max}}), \quad (8)$$

где  $N_1^{(N_2=0)}$  — величина мощности, развиваемая первым ГА в момент полной разгрузки второго ГА;  
 $N_2^{(N_1=0)}$  — величина мощности, развиваемая вторым ГА в момент полной разгрузки первого ГА.

Выражения (7) и (8) предназначены для выявления вышедшего из строя ГА в ситуации, когда агрегаты работают параллельно и процессы, связанные с синхронизацией, уже закончились. В этой связи время включения генератора в параллель с сетью необходимо исключить из процесса диагностирования. Данное требование обусловлено тем, что при подключении агрегата к сети с частотой, несколько меньшей, чем частота АЭЭС, этот ГА кратковременно переходит в двигательный режим работы. По мере втягивания в синхронизм потребляемая им энергия уменьшается и в момент, когда она станет равна нулю, согласно условиям (7) и (8), возможно ошибочное отключение синхронизируемого генератора. С другой стороны, при подключении ГА с более высокой частотой, чем частота АЭЭС, этот агрегат в условиях низкой загрузки может принять всю нагрузку и перевести работающую машину в двигательный режим работы. При таких условиях может произойти ошибочное отключение уже работающего и работоспособного агрегата. В этой связи следует обозначить событие, определяющее режим работы АЭЭС с момента замыкания автоматического выключателя синхронизируемого генератора до момента принятия им нагрузки в соответствии с неравенством (3), как  $x_1$ . Тогда условие отключения второго ГА с целью предотвращения режима его работы с обратной мощностью запишется в виде

$$\bar{L}_{1,2} \rightarrow (N_1^{(N_2=0)} > \Delta N_{\text{доп}}) \wedge (t_2 \leq t_{1\text{max}}) \wedge \bar{x}_1. \quad (9)$$

Для первого ГА условие отключения с целью предотвращения его работы с обратной мощностью можно представить в следующем виде:

$$\bar{L}_{1,1} \rightarrow (N_2^{(N_1=0)} > \Delta N_{\text{доп}}) \wedge (t_2 \leq t_{1\text{max}}) \wedge \bar{x}_1. \quad (10)$$

Таким образом, ГА идентифицируют как неработоспособный и отключают от сети, если в момент его полной разгрузки мощность, развиваемая другим агрегатом, работающим параллельно, превышает допустимое значение. При этом идентификация неработоспособного состояния ГА и его отключение блокируются, если время, в течение которого осуществляется параллельная работа генераторов с недопустимой величиной отклонения нагрузок, превышает максимальное время разгрузки ГА или происходит включение генератора на параллельную работу.

В статье [19] из процесса диагностирования исключались режим рекуперативного торможения и скачкообразного уменьшения нагрузки параллельно работающих машин. Действительно, функционирование АЭЭС в этих режимах может привести к переходу одного из ГА в двигательный режим работы. Однако современные первичные двигатели, как правило, оборудованы качественными регуляторами топлива, и снижение общей нагрузки сети приводит к пропорциональному уменьшению загрузки каждого из работающих агрегатов, поэтому для работоспособных генераторов условия (9) и (10) не выполняются. В то же время для устаревших конструкций и недорогих маломощных агрегатов, оснащенных примитивными топливными регуляторами, идентификация неработоспособного состояния ГА должна осуществляться с блокировкой и в этих режимах, но данное условие не является общим для всех типов машин. При этом стоимость такого решения может быть достаточно высокой, так как, например, на судах даже среднего размера длина кабелей, передающих сигналы от необходимых для контроля указанных режимов датчиков, может составлять несколько сотен метров. Поэтому наиболее простым решением в данном случае представляется увеличение значения  $N_{i\text{доп}}$  выше значения  $\Delta N_{\text{доп}}$ . Причем, учитывая высокую точность распределения нагрузок, обеспечиваемую современными СУ, это увеличение может быть кратным, т. е.  $N_{i\text{доп}} = k\Delta N_{\text{доп}}$ , где  $i$  — номер ГА, а  $k$  — коэффициент пропорциональности, выбираемый таким образом, чтобы нивелировать погрешность, возникающую при работе топливных регуляторов первичных двигателей в динамических режимах.

Для выбора коэффициента пропорциональности  $k$  можно предложить следующую методику. СУ современных АЭЭС обеспечивают автоматическое отключение одного из работающих генераторов, если нагрузка окажется слишком низкой. Для режима параллельной работы двух ГА эта величина обычно составляет 30 % от номинальной мощности одной из работающих машин. Тогда, в случае неисправности и полной разгрузки вышедшего из строя агрегата, работоспособный ГА будет развивать мощность, соответствующую 60 % от ее номинальной величины. Именно это значение параметра и следует взять как предельно допустимое и исходя из этого определить коэффициент  $k$ . В данном случае он будет равен 8,57. Трудно назвать регуляторами устройства, работающие с погрешностью, превышающей 85 % от заданной величины. При этом, исключив влияние возможной неточности в работе топливной аппаратуры первичного двигателя, в предлагаемом решении неизбежно появление ошибки второго рода при диагностировании в случае нагрузки в сети менее 30 % от номинальной. Учитывая этот фактор, предлагается использовать аппаратуру, реализующую данный подход, одновременно с реле обратной мощности. В данном случае достигается главная цель проведенных исследований: разработан подход, в рамках которого при переходе ГА в двигательный режим гарантированно исключается перегрузка сети обратной мощностью и осуществляется своевременное, без выдержки времени, отключение агрегата в наиболее тяжелом, нагруженном состоянии. При этом необходимость в блокировке отключения ГА, осуществляемой в процессе включения одного из генераторов на параллельную работу, сохраняется, так как дополнительный агрегат обычно запускают, когда нагрузка работающих составляет 80–90 % от номинальной нагрузки АЭЭС.

Своевременная идентификация неработоспособного состояния ГА позволяет осуществить предупредительную разгрузку сети, например, с помощью использования способа, изложенного в работе [21], согласно которому уменьшают нагрузку параллельно работающих генераторов до отключения неработоспособного агрегата. Реле обратной мощности при таком использовании обеспечивает защиту неработоспособного агрегата лишь в редких случаях, когда генераторы работают параллельно с низкой нагрузкой. Такой режим функционирования АЭЭС неэффективен и весьма непродолжителен. При этом выражения для определения неработоспособного состояния второго и первого ГА примут вид:

$$\bar{L}_{1,2} \rightarrow (N_1^{(N_2=0)} > k\Delta N_{\text{доп}}) \wedge (t_2 \leq t_{1\text{max}}) \wedge \bar{x}_1; \quad (11)$$

$$\bar{L}_{1,1} \rightarrow (N_2^{(N_1=0)} > k\Delta N_{\text{доп}}) \wedge (t_2 \leq t_{1\text{max}}) \wedge \bar{x}_1. \quad (12)$$

### Результаты (Results)

Полученные выражения (11), (12) создают предпосылки для разработки технических средств, обеспечивающих идентификацию и отключение неработоспособного агрегата до его перехода в двигательный режим. На рис. 2 приведена блок-схема одного из возможных алгоритмов, практическая реализация которых обеспечивает предупредительное управление АЭЭС до появления обратной мощности.

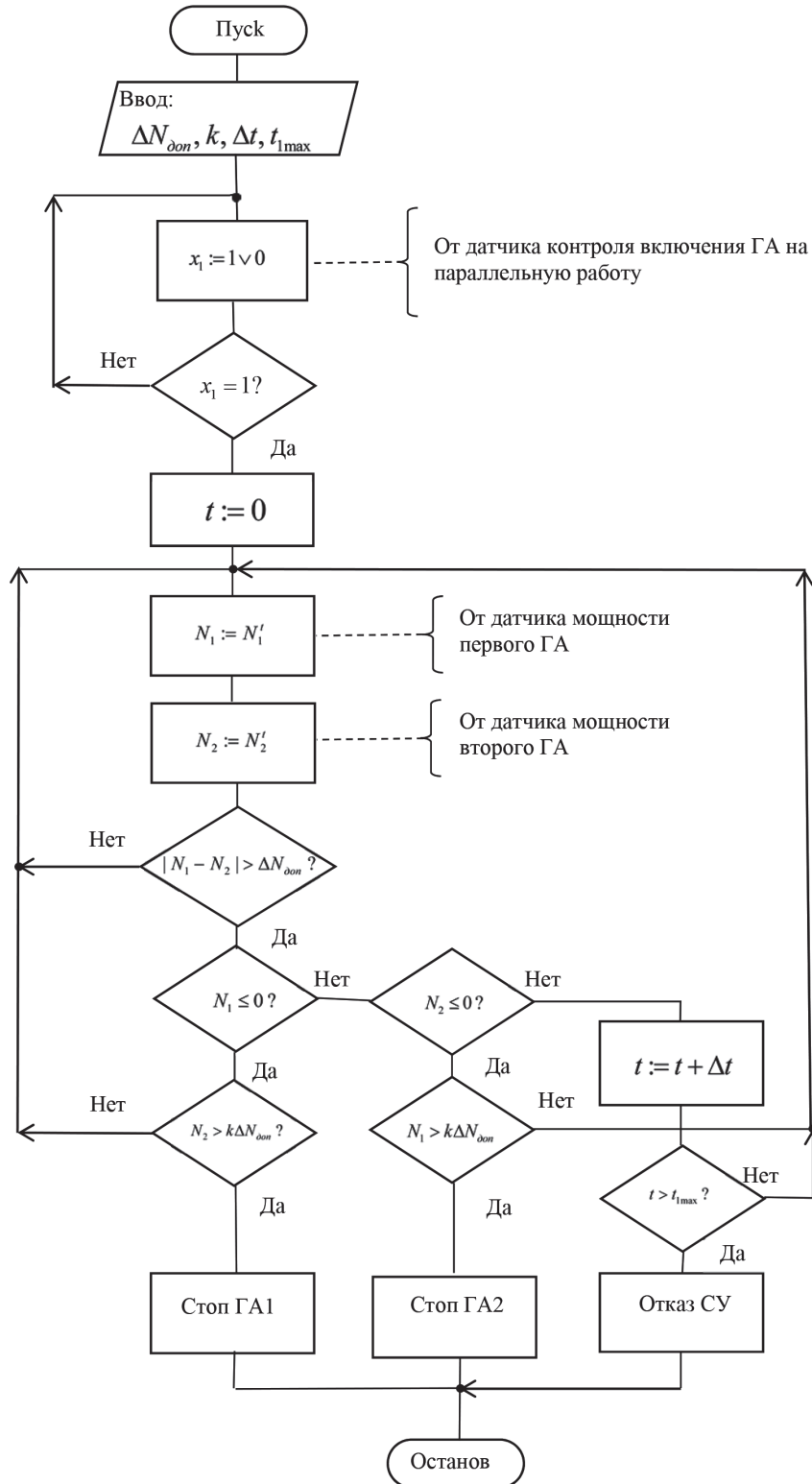


Рис. 2. Блок-схема алгоритма превентивной защиты АЭЭС от обратной мощности



Согласно предложенному варианту решения поставленной задачи, в устройство вводятся значения постоянных величин:

- разности нагрузок АЭЭС ( $\Delta N_{\text{доп}}$ );
- выбранного коэффициента пропорциональности  $k$ ;
- максимально возможного для данной АЭЭС интервала времени от момента невыполнения условия (3) до момента полной разгрузки неработоспособного агрегата ( $t_{1\text{max}}$ );
- шага измерения интервала времени ( $\Delta t$ ).

На первом этапе осуществляют проверку отсутствия процесса включения одного из ГА на параллельную работу ( $x_1$ ). Сигнал об этом в виде логической единицы поступает с выхода соответствующего датчика. Если это условие не выполняется, то процесс определения технического состояния ГА блокируется до момента его выполнения. На основании информации, поступающей с выходов датчиков мощности первого и второго ГА, производят контроль выполнения неравенства (3) и в случае его нарушения проверяют наличие режима полной разгрузки одного из ГА. Если при этом оба агрегата работают с нагрузкой, то начинают отсчет времени. В ситуации, при которой момент полной разгрузки генераторов не наступил в течение времени  $t_{1\text{max}}$ , формируют сигнал «Отказ СУ» и в случае перехода ГА в двигательный режим работы блокируют его отключение. Если разгрузка одной из машин произошла в течение допустимого периода времени и мощность, развиваемая другим первичным двигателем, оказалась больше значения  $k\Delta N_{\text{доп}}$ , то формируют команду на отключение и выполняют останов разгруженного агрегата. Разработанный алгоритм представляет собой развитие способа, описанного в [20], и обладает более высокой достоверностью диагностирования ГА.

### Обсуждение (Discussion)

Предложенное техническое решение обеспечивает идентификацию неработоспособного состояния ГА в момент полной разгрузки и отключение его от сети накануне перехода в двигательный режим. Данное обстоятельство позволяет избежать перегрузки АЭЭС обратной мощностью. В данном случае указанный подход можно классифицировать как метод предупредительного управления объектом. При этом за рамками настоящей работы остался вопрос перегрузки работоспособного агрегата общей нагрузкой сети. В этой связи следует отметить, что после возникновения отказа, вплоть до момента перехода в двигательный режим, неработоспособный агрегат продолжает снабжать сеть электроэнергией, частично смягчая процесс перевода нагрузки на исправные машины. Поэтому отключение вышедшего из строя ГА наиболее целесообразно производить в момент его полной разгрузки. Однако отключение части потребителей необходимо осуществлять ранее, — до момента перегрузки первичных двигателей. Решение этой задачи требует специального рассмотрения.

### Выводы (Summary)

На основании выполненного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Применение выдержки времени при формировании сигнала на отключение ГА, перешедшего в двигательный режим, может не только способствовать развитию дефекта первичного двигателя, но и привести к исчезновению напряжения в АЭЭС. В ряде случаев это чревато возникновением аварийной ситуации, способной привести к аварии с тяжелыми последствиями.
2. Предложенный оригинальный диагностический признак позволяет идентифицировать неработоспособное состояние перешедшего в двигательный режим работы генератора накануне появления обратной мощности. Применение данного параметра для отключения агрегата, вышедшего из строя, позволяет предотвратить перегрузку сети АЭЭС обратной мощностью и избежать дальнейшего развития дефекта отказавшей машины.
3. Разработанный алгоритм превентивной защиты АЭЭС от обратной мощности обеспечивает практическую реализацию разработанного подхода в рамках предупредительного управления объектом.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Абрамович Б. Н.* Эффективность распределенной энергетики в условиях минерально-сырьевого комплекса / Б. Н. Абрамович [и др.] // *Промышленная энергетика*. — 2019. — № 5. — С. 8–16.
2. *Бычков Е. В.* Обеспечение устойчивой работы автономных энергосистем в газовой промышленности / Е. В. Бычков, П. А. Захаров // *Автоматизация и IT в нефтегазовой промышленности*. — 2019. — № 3 (37). — С. 30–40.
3. *Козярук А. Е.* Анализ развития технических средств освоения нефтегазовых месторождений / А. Е. Козярук, Б. Ю. Васильев, А. И. Ивановский // *Морской вестник*. — 2017. — № 2 (62). — С. 115–119.
4. *Архипова О. В.* Принципы оптимизации электроснабжения населенных пунктов Крайнего Севера на базе ветродизельных комплексов / О. В. Архипова // *Вестник Югорского государственного университета*. — 2015. — № S2 (37). — С. 204–206.
5. *Бончук И. А.* Обеспечение генерирующего резерва в энергосистеме и на объектах морской индустрии Калининградской области / И. А. Бончук [и др.] // *Морские интеллектуальные технологии*. — 2019. — № 4-4 (46). — С. 62–67.
6. *Kim S. H.* Estimation of ship operational efficiency from AIS data using big data technology / S. H. Kim, M. I. Roh, M. J. Oh, S. W. Park, I. I. Kim // *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*. — 2020. — Vol. 12. — Pp. 440–454. DOI: 10.1016/j.ijnaoe.2020.03.007.
7. *Saushev A. V.* System approach to ensure performance of marine and coastal electrical systems during operation / A. V. Saushev, S. E. Kuznetsov, A. B. Karakayev // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. — 2018. — Vol. 194. — Is. 8. DOI: 10.1088/1755-1315/194/8/082037.
8. *Abbasian N.S.* Improving early OSV design robustness by applying ‘Multivariate Big Data Analytics’ on a ship’s life cycle / N. S. Abbasian [et al] // *Journal of Industrial Information Integration*. — 2018. — Vol. 10. — Pp. 29–38. DOI: 10.1016/j.jii.2018.02.002.
9. *Dileep G.* A survey on smart grid technologies and applications / G. Dileep // *Renewable Energy*. — 2020. — Vol. 146. — Pp. 2589–2625. DOI: 10.1016/j.renene.2019.08.092.
10. *Paul S.* A review of smart technology (Smart Grid) and features / S. Paul, M. S. Rabbany, R. K. Kundu, S. M. R. Zaman // *2014 1st International Conference on Non Conventional Energy (ICONCE 2014)*. — IEEE, 2014. — Pp. 200–203.
11. *Al Rammal Z.* Optimal PMU placement for reverse power detection / Z. Al Rammal [et al] // *2018 4th International Conference on Renewable Energies for Developing Countries (REDEC)*. — IEEE, 2018. — Pp. 1–5. DOI: 10.1109/REDEC.2018.8597975.
12. *Mishra R.* Development and implementation of control of stand-alone PMSG-based distributed energy system with variation in input and output parameters / R. Mishra [et al] // *IET Electric Power Applications*. — 2019. — Vol. 13. — Is. 10. — Pp. 1497–1506. DOI: 10.1049/jet-epa.2018.5882.
13. *Булатов Ю. Н.* Интеллектуальные системы управления установками распределенной генерации / Ю. Н. Булатов // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. — 2017. — Т. 21. — № 10 (129). — С. 78–94. DOI: 10.21285/1814-3520-2017-10-78-94.
14. *Yaghoobi H.* Fast predictive technique for reverse 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.
15. *Samami M.* Novel fast and secure approach for reverse 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.
16. *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.
17. *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.
18. *Саушев А. В.* Диагностирование состояния электротехнических систем в пространстве параметров их элементов / А. В. Саушев, Н. В. Широков // *Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова*. — 2016. — № 2 (36). — С. 143–156. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-2-143-156.

19. 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.

20. Пат. 2686103 Российская Федерация, МПК H02H 3/08, H02H 7/085. Способ определения неработоспособного генераторного агрегата / Н. В. Широков; заяв. и патентообл. ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова. — № 2018125823; заявл. 12.07.2018; опубл. 24.04.2019, Бюл. № 12. — 9 с.

21. Пат. 2653361 Российская Федерация, МПК H02H 3/46, H02J 3/14. Способ автоматической разгрузки электроэнергетической системы с параллельно работающими генераторными агрегатами / Н. В. Широков; заяв. и патентообл. ООО «Форпик Стандарт Сервис». — № 2017124539; заявл. 10.07.2017; опубл. 08.05.2018, Бюл. № 13. — 15 с.

## REFERENCES

1. Abramovich, B. N., Yu. A. Sychev, D. A. Ustinov, I.S. Babanova, and V.B. Prokhorova. “Effektivnost’ raspredelennoi energetiki v usloviyakh mineral’no-syr’evogo kompleksa.” *Promyshlennaya energetika* 5 (2019): 8–16.

2. Bychkov, Evgeny Viktorovich, and Petr Alekseevich Zakharov. “Sustainable work autonomous power systems in the gas industry.” *Avtomatizatsiya i IT v neftegazovoi promyshlennosti* 3(37) (2019): 30–40.

3. Kozyaruk, A. E., B. Yu. Vasil’ev, and A. I. Ivanovskii. “Analiz razvitiya tekhnicheskikh sredstv osvoeniya neftegazovykh mestorozhdenii.” *Morskoi vestnik* 2(62) (2017): 115–119.

4. Arkhipova, Olga. “Principles of electricity optimization of far north settlements the on the basis of wind-diesel systems.” *Yugra State University Bulletin* S2(37) (2015): 204–206.

5. Bonchuk, Ilya A., Valeriy F. Beley, Victor M. Minko, and Kryukov I. Nikitovich. “Provision of generating reserve in the power system and marine industry facilities of the Kaliningrad region.” *Marine Intelligent Technologies* 4-4(46) (2019): 62–67.

6. Kim, Seong-Hoon, Myung-II Roh, Min-Jae Oh, Sung-Woo Park, and In-II Kim. “Estimation of ship operational efficiency from AIS data using big data technology.” *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering* 12 (2020): 440–454. DOI: 10.1016/j.ijnaoe.2020.03.007.

7. Saushev, Aleksandr V., Sergey E. Kuznetsov, and Aleksandr B. Karakayev. “System approach to ensure performance of marine and coastal electrical systems during operation.” *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. Vol. 194. No. 8. 2018. DOI: 10.1088/1755-1315/194/8/082037.

8. Abbasian, Niki Sadat, Afshin Salajegheh, Henrique Gaspar, and Per Olaf Brett. “Improving early OSV design robustness by applying ‘Multivariate Big Data Analytics’ on a ship’s life cycle.” *Journal of Industrial Information Integration* 10 (2018): 29–38. DOI: 10.1016/j.jii.2018.02.002.

9. Dileep, G. “A survey on smart grid technologies and applications.” *Renewable Energy* 146 (2020): 2589–2625. DOI: 10.1016/j.renene.2019.08.092.

10. Paul, Shuva, Md Sajed Rabbani, Ripon Kumar Kundu, and Sikdar Mohammad Raihan Zaman. “A review of smart technology (Smart Grid) and its features.” *2014 1st International Conference on Non Conventional Energy (ICONCE 2014)*. IEEE, 2014. 200–203.

11. Al Rammal, Zeina, Nivine Abou Daher, Hadi Kanaan, Imad Mougharbel, and Maarouf Saad. “Optimal PMU placement for reverse power flow detection.” *2018 4th International Conference on Renewable Energies for Developing Countries (REDEC)*. IEEE, 2018. 1–5. DOI: 10.1109/REDEC.2018.8597975.

12. Mishra, Rupa, Udayan Banerjee, Thotakura N.S.C. Sekhar, and Tapas Kumar Saha. “Development and implementation of control of stand-alone PMSG-based distributed energy system with variation in input and output parameters.” *IET Electric Power Applications* 13.10 (2019): 1497–1506. DOI: 10.1049/iet-epa.2018.5882.

13. Bulatov, Yuri N. “Intelligent control systems for distributed generation plants.” *Proceedings of Irkutsk State Technical University* 21.10(129) (2017): 78–94. DOI: 10.21285/1814-3520-2017-10-78-94.

14. Yaghibi, 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.

15. 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.

16. 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.

17. 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.

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

19. 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.

20. Shirokov, N. V. RU 2 686 103 C1, IPC H02H 3/08, H02H 7/085. Sposob opredeleniya nerabotosposobnogo generatornogo agregata. Russian Federation, assignee. Publ. 24 Apr. 2019.

21. Shirokov, N. V. RU 2 653 361 C1, IPC H02H 3/46, H02J 3/14. Sposob avtomaticheskoi razgruzki elektroenergeticheskoi sistemy s parallel'no rabotayushchimi generatornymi agregatami. Russian Federation, assignee. Publ. 8 Aug. 2018.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

**Широков Николай Викторович** —  
кандидат технических наук, доцент  
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала  
С. О. Макарова»  
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,  
ул. Двинская, 5/7  
e-mail: [Shirokovn@inbox.ru](mailto:Shirokovn@inbox.ru),  
[kaf\\_electroprivod@gumrf.ru](mailto:kaf_electroprivod@gumrf.ru)

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Shirokov, Nikolaj V.** —  
PhD, associate professor  
Admiral Makarov State University of Maritime  
and Inland Shipping  
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,  
Russian Federation  
e-mail: [Shirokovn@inbox.ru](mailto:Shirokovn@inbox.ru),  
[kaf\\_electroprivod@gumrf.ru](mailto:kaf_electroprivod@gumrf.ru)

*Статья поступила в редакцию 4 августа 2020 г.  
Received: August 4, 2020.*