

Список литературы

1. Фирсов Ю. Г. Основы гидроакустики и использования гидрографических сонаров: учеб. пособие. ГМА им. адм. С. О. Макарова / Ю. Г. Фирсов. — СПб.: Нестор-ИСТОРИЯ, 2010. — 348 с.
2. Интернет-сайт Федерального агентства морского и речного флота Министерства транспорта Российской Федерации. Строительство объектов морского порта Сабетта — [Электронный ресурс]. — Электрон. дан. — Режим доступа: <http://www.morflot.ru/sabetta>
3. Кожухов И. В. Системный подход к изучению потоков наносов в мелководной зоне морей в связи с нарушением нормального режима судоходства / И. В. Кожухов // Эксплуатация морского транспорта. ГМА им. адм. С. О. Макарова. — СПб., 2010. — Вып. 3.
4. Лонгинов В. В. О заносимости частично огражденных морских каналов на отмелях песчаных берегах / В. В. Лонгинов, И. В. Кожухов // Тр. СМНИИП. — М.: Транспорт, 1966. — Вып. 12.
5. Кожухов И. В. Морфометрический и морфологический подходы при решении ряда практических задач инженерной гидрографии / И. В. Кожухов, Н. Г. Тимофеев // Эксплуатация морского транспорта. ГМА им. адм. С. О. Макарова. — СПб., 2011. — Вып. 4.
6. Кожухов И. В. Северный регион Российской Федерации как зона экологического риска и новый этап освоения Арктики / И. В. Кожухов, Ю. Г. Фирсов, Н. Ю. Гордиенко // Эксплуатация морского транспорта. ГМА им. адм. С. О. Макарова. — СПб., 2013. — Вып. 2.
7. Берлянт А. М. Картография / А. М. Берлянт. — М.: Аспект-Пресс, 2002.
8. Mayer L. A. Frontiers in Seafloor Mapping and Visualization / L. A. Mayer // Marine Geophysical Researches (J. Article). — 2005. — Vol. 27, № 1.

УДК 621.311:629.12

С. Ю. Труднев,
ст. преподаватель,
ФГБОУ ВПО «КамчатГТУ»

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛИ УСТРОЙСТВА АКТИВНОЙ ЗАЩИТЫ ГЕНЕРАТОРНОГО АГРЕГАТА ОТ КРАТКОВРЕМЕННЫХ ПЕРЕГРУЗОК

DEVELOPMENT AND RESEARCH OF MODEL OF THE DEVICE OF PROTECTION OF THE GENERATING UNIT FROM SHORT-TERM OVERLOADS

В статье рассмотрены структура и принцип работы устройства, позволяющего увеличить безопасность мореплавания. Разработана математическая модель трехфазного источника питания на основе емкостных элементов. Произведены расчеты тока и емкости источника электрической энергии, а также рассчитано выходное напряжение источника бесперебойного питания. На основании математической модели разработана и исследована имитационная модель предлагаемого устройства в программе MATLAB. Выявлен положительный эффект при внедрении данного устройства.

In article the structure and the principle of operation of the device, allowing to increase safety of navigation are considered, the mathematical model of the three-phase power supply on the basis of capacitor elements is presented. Calculations of current and capacity of a source of electric energy are made, and also the output tension of the uninterruptible power supply is calculated. On the basis of mathematical model the imitating model of the offered device in the MATLAB program is developed and investigated. The positive effect is revealed at introduction of this device.

Ключевые слова: емкостной элемент, трехфазный источник питания, модель, ионисторный модуль, защита.

Key words: capacitor element, three-phase power supply, model, ionistorny module, protection.

НА СОВРЕМЕННОМ этапе развития хозяйствующих субъектов существенное негативное влияние оказывает высокая доля энергетических затрат в издержках производства, которая на предприятиях рыбопромыслового флота составляет в среднем 8–12 % и имеет устойчивую тенденцию к росту в связи с большим моральным и физическим износом основного оборудования и значительными потерями при транспортировке энергетических ресурсов.

Одним из определяющих условий снижения издержек на предприятиях и повышения экономической эффективности производства в целом является рациональное использование энергетических ресурсов. Вместе с тем энергосберегающий путь развития отечественной экономики возможен только при формировании и последующей реализации программ энергосбережения на отдельных предприятиях, для чего необходимо создание соответствующей методологической и методической базы. В связи с этим вопросы энергосбережения вызывают беспокойство как на национальном, так и на глобальном уровнях. Особенно актуальна данная проблема в связи с ростом уровня индустриализации, преобладанием природоемких отраслей и устаревших технологий. Поэтому все больше внимания уделяется созданию и исследованию новых альтернативных источников питания [1, с. 37–40].

Автором предлагается модернизировать судовую электроэнергетическую систему путем внедрения устройства защиты от предотказных состояний синхронного генератора. Внедрение таких устройств, в частности как источников аварийного питания, позволит обеспечить бесперебойную подачу электрической энергии наиболее ответственных потребителей даже в аварийной ситуации, что, несомненно, увеличит безопасность мореплавания.

Последующая разработка математической и имитационной модели позволит проверить качество и целесообразность проектируемого устройства [2]. Для создания виртуальной модели необходимо разработать структурную схему и алгоритм математических расчетов и формул, на основании которых будет работать моделируемое устройство. Предлагается разработать неинерционный трехфазный источник бесперебойного питания на основе емкостных накопителей, который позволит сохранить и улучшить устойчивость работы всей энергосистемы при динамических возмущениях высокой амплитуды без запуска резервного генератора. Структурная схема устройства представлена на рис. 1.

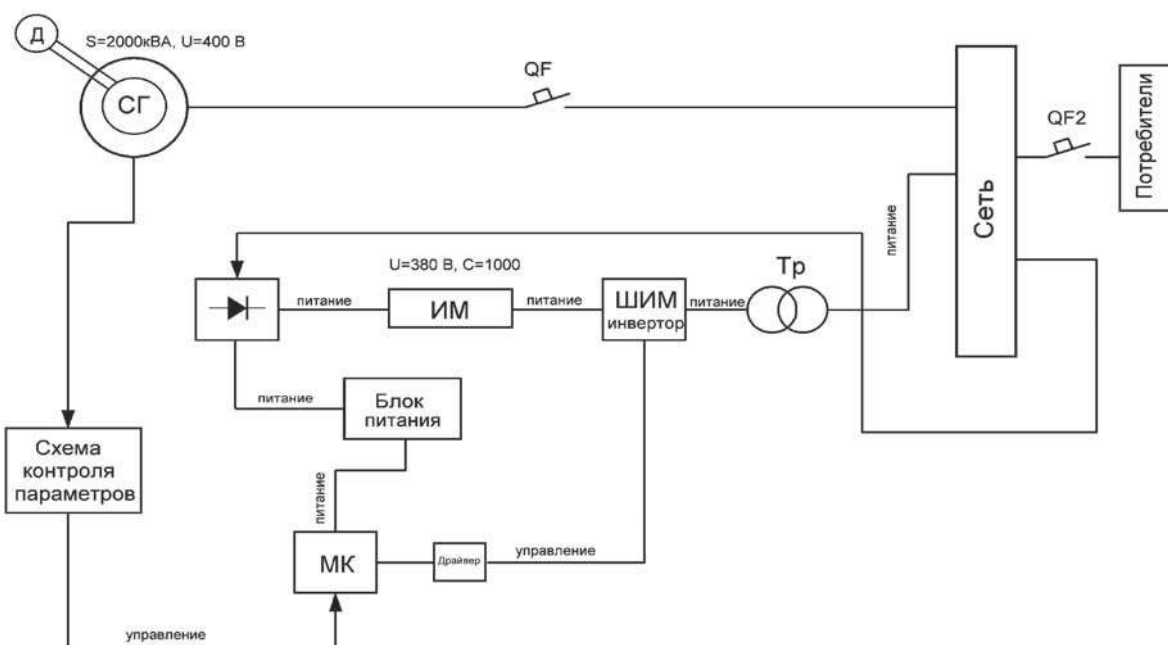


Рис. 1. Структурная схема устройства защиты генератора от предотказных состояний:

Д — дизель; СГ — синхронный генератор; Тр — трехфазный трансформатор;
МК — микроконтроллер; QF — генераторный автомат;
ШИМ-инвертор — инвертор с широтно-импульсной модуляцией

Устройство включает в себя блок контроля параметров, микроконтроллер, силовой драйвер, инвертор с широтно-импульсной модуляцией, ионисторный модуль, зарядное устройство, блок питания микроконтроллера, трансформатор, сеть, потребителей, дизель, генераторный агрегат, генераторный автомат.

Устройство работает следующим образом.

При нормальном режиме ионисторный модуль находится в заряженном состоянии от сети, его зарядка производится через зарядное устройство, и при этом модуль является импульсным потребителем, сигнал на блоке контроля параметров угла между вектором внутренней ЭДС и вектором напряжения отсутствует, генераторный агрегат через генераторный автомат работает на сеть. При возникновении асинхронного режима угол между векторами ЭДС и напряжения увеличивается и превышает допустимое значение угла, блок контроля параметров подает сигнал о наличии асинхронного режима на управляющий микроконтроллер, питающийся от блока питания микроконтроллера. Далее с управляющего микроконтроллера поступает сигнал на силовой драйвер, который подключает ионисторный модуль через контакты инвертора с широтно-импульсной модуляцией и трансформатор к сети, в результате чего угол между векторами ЭДС и напряжения уменьшается, генераторный агрегат возвращается в нормальный режим работы, при этом сохраняется бесперебойная подача электрической энергии к потребителям [3].

Для экспериментального исследования предлагаемого устройства на основе разработанной структурной схемы в программе MATLAB была разработана виртуальная модель для испытания устройства защиты синхронного генератора от предотказных состояний, представленная на рис. 2.

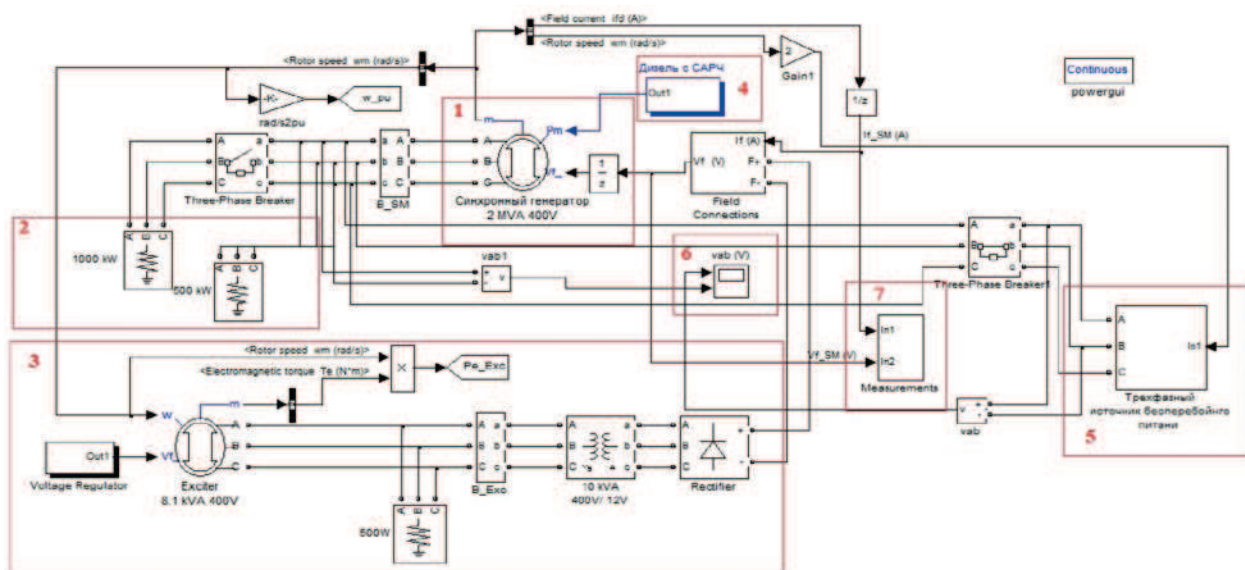


Рис. 2. Имитационная модель для исследования устройства защиты синхронного генератора от предотказных состояний:

- 1 — синхронный генератор; 2 — активная нагрузка; 3 — система возбуждения; 4 — модель дизеля;
5 — модель неинерционного трехфазного источника бесперебойного питания;
6, 7 — измерительные устройства

При протекании переходного процесса изменяется угол между ЭДС и напряжением, данный процесс будет описываться следующим дифференциальным уравнением:

$$M - M_c = J \cdot \frac{\partial w}{\partial t}, \quad (1)$$

где J — механическая постоянная инерции генераторного агрегата, M — момент дизеля, M_c — электромагнитный момент, w — угловая частота вращения ротора относительно синхронной оси.

Асинхронный момент машины обеспечивает затухание колебаний при относительно небольших изменениях частоты вращения и не учитывается уравнением (1), тогда дифференциальное уравнение примет вид

$$M - M_c = J \cdot \frac{\partial w}{\partial t} + K_D \cdot w, \quad (2)$$

где K_D — коэффициент демпфирования.

На рис. 2 видно, что в имитационной модели отражается параллельная работа неинерционного источника бесперебойного питания и дизель-генераторного агрегата ($S = 2000$ кВ·А, $U = 380$ В, $f = 50$ Гц) на динамическую нагрузку, соизмеримой по мощности ($P = 1500$ кВт) генератора. Данная модель позволит исследовать возможность параллельной работы синхронного генератора и трехфазного источника бесперебойного питания, а также выявить влияние на устойчивость работы дизель-генераторного агрегата при подключении в параллельную работу неинерционного источника питания с высокой удельной мощностью.

Состав модели:

- 1 — синхронный генератор, представленный блоком Synchronous Machine, $S = 2000$ кВ·А, $U = 380$ В, $f = 50$ Гц, момент инерции генераторного агрегата составляет $J = 99,62$ кг·м²;
- 2 — активная нагрузка, $P = 1700$ кВт;
- 3 — система возбуждения, состоящая из блоков Synchronous Machine, Three-Phase Transformer (понижающего трансформатора) и Universal Bridge (выпрямителя);
- 4 — модель дизеля Diesel Engine & Governor;
- 5 — модель неинерционного трехфазного источника бесперебойного питания, собранного из ионисторных модулей емкостью $C = 1000$ Ф и выходным напряжением $U = 380$ В, подключенных к инвертору с широтно-импульсной модуляцией;
- 6, 7 — измерительные устройства.

Для создания имитационной модели в пакете Simulink необходимо учесть значение такого показателя, как мощность источника питания. Мощность источника должна быть соизмеримой с мощностью одного генератора. Для этого необходимо учесть значение тока, в связи с чем необходимо произвести расчет выходного тока синхронного генератора.

Исходные данные:

- мощность генератора — $P = 2000$ кВт;
- линейное напряжение между фазами — $U = 400$ В;
- время разряда ионистора — 60 с.

$$I = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot U}, \quad (3)$$

$$I = \frac{2 \cdot 10^6}{1,7 \cdot 400},$$

$$I = 3096 \text{ А}.$$

Произведем расчет емкости ионистора.

Исходя из требований Морского регистра, время запуска аварийного дизель-генератора составляет 45 с, это говорит о том, что приблизительно в течение одной минуты даже наиболее ответственные потребители будут полностью обесточены. Создание источника бесперебойного питания решит данную проблему, поэтому необходимо рассчитать емкость, соизмеримую с мощностью одного генератора.

Заряд на емкостном элементе [4, с. 143–145]:

$$Q = C \cdot U, \quad (4)$$

$$I = \frac{Q}{t} = \frac{C \cdot U}{t}. \quad (5)$$

Тогда емкость источника будет рассчитываться по формуле (5):

$$C = \frac{I}{U} t,$$

$$C = \frac{3096}{380} 60 \approx 489 \text{ Ф.}$$

Учитывая условия эксплуатации источника бесперебойного питания и мощность, потребляемую ШИМ-инвертором, выбираем с запасом конденсатор емкостью 1000 фарад.

Разработка модели безынерционного трехфазного источника энергии на основе конденсатора.

Произведем расчет выходного напряжения источника трехфазного питания:

$$Q = 1000 \cdot 380 = 3800 \text{ Кл,}$$

$$W = \frac{C \cdot U^2}{2}, \quad (6)$$

$$W = \frac{C \cdot 380^2}{2},$$

$$W_1 = W_2 + W_3, \quad (7)$$

где W_1 — энергия емкостного источника;
 W_2 — энергия потребителя;
 W_3 — энергия источника бесперебойного питания.

$$W_1 = \frac{C \cdot U_1^2}{2},$$

$$W_2 = \frac{P}{t}, \quad (8)$$

$$W_3 = \frac{C \cdot U_2^2}{2},$$

$$W_1 = W_2 + W_3,$$

$$W_3 = W_1 - W_2,$$

$$\frac{C \cdot U_2^2}{2} = \frac{C \cdot U_1^2}{2} - W_2,$$

$$U_2^2 = U_1^2 - \frac{2 \cdot W_2}{C}.$$

Тогда уравнение разряда конденсатора примет вид:

$$U_2 = \sqrt{U_1^2 - \frac{2 \cdot W_2}{C}} = \sqrt{\frac{C \cdot U_1^2 - 2 \cdot W_2}{C}}, \quad (9)$$

$$U_2 = \sqrt{\frac{1000 \cdot 144\,400 - 2 \cdot W_2}{2000}} = \sqrt{\frac{144\,400\,000 - 2 \cdot W_2}{2000}}.$$

Для создания модели конденсаторного модуля используем блок Fcn (рис. 3, блок А) пакета Simulink с уравнением (9).

Имитационная модель трехфазного источника бесперебойного питания (блок 5, рис. 2) представлена на рис. 3. Данная модель включает в себя три основных блока А, В, С. Данные блоки образуют инвертор с широтно-импульсной модуляцией, на вход которого подключается ионисторный модуль (блок А), а на выходе создается сигнал напряжения, изменяющийся по закону:

$$U_a \approx \sin \omega \cdot t,$$

$$U_b \approx \sin(\omega \cdot t - 120^\circ),$$

$$U_c \approx \sin(\omega \cdot t + 120^\circ).$$

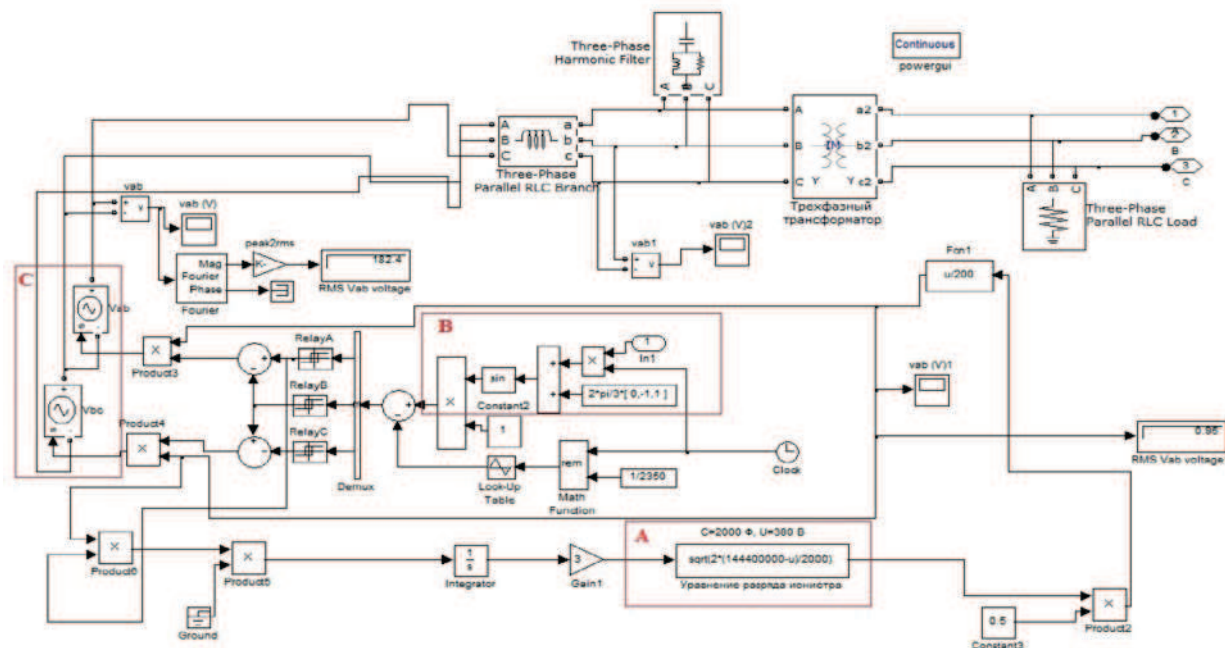


Рис. 3. Виртуальная модель безынерционного трехфазного источника энергии на основе ионистора

По расчетным данным, ионисторный модуль способен взять на себя нагрузку, соизмеримую с мощностью одного генератора, тем самым обеспечивая динамическую устойчивость и сглаживая импульсные пики нагрузки. На рис. 4 изображен график зависимости линейных напряжений генератора и трехфазного источника при их параллельной работе.

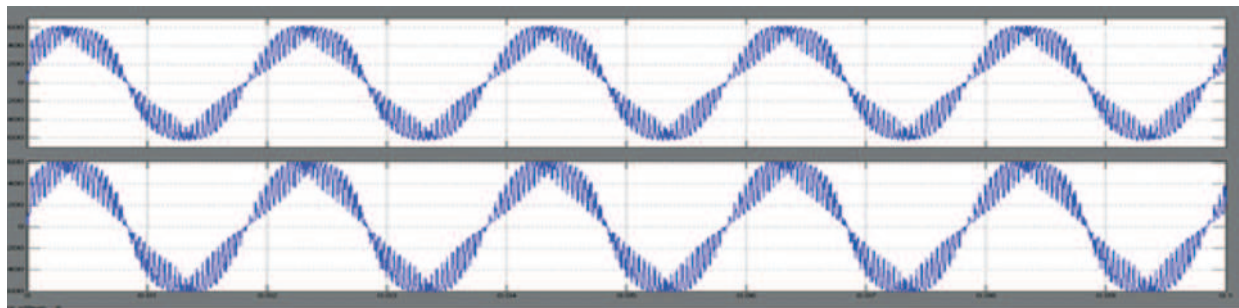


Рис. 4. График зависимости напряжений от времени параллельной работы синхронного генератора и трехфазного источника питания

Исходя из вышеуказанных результатов, можно выделить преимущество ионисторного модуля, используемого в качестве импульсного источника питания, заключающееся в том, что он не обладает инерцией, а значит, способен практически мгновенно взять на себя нагрузку и без дополнительных условий войти в синхронизм благодаря инвертору с широтно-импульсной модуляцией.

В подтверждение этого был произведен следующий эксперимент: на дизель-генератор в момент времени $t = 3$ с на протяжении некоторого времени была подключена импульсная нагрузка, соизмеримая с мощностью одного генератора ($P_{\text{нагрузки}} = 70 \% \cdot P_{\text{генератора}}$), затем был произведен тот же эксперимент, только параллельно был подключен импульсный источник трехфазного питания (рис. 3, 4). В результате были построены характеристики по устойчивости, представленные на рис. 5.

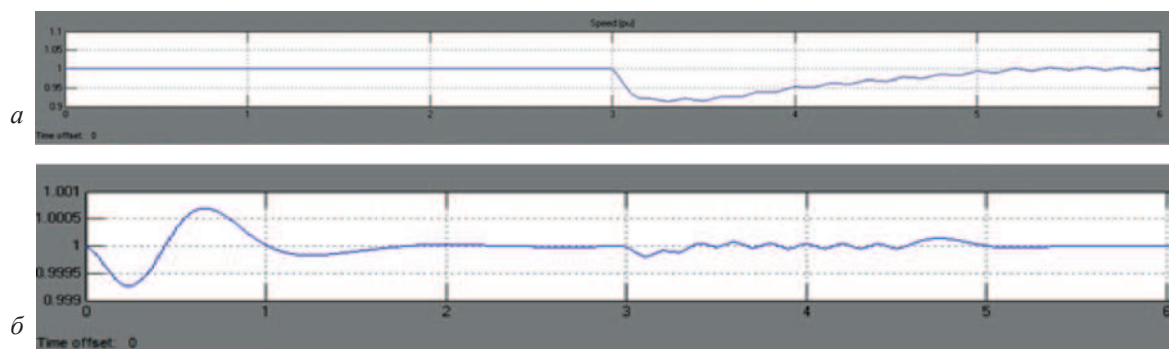


Рис. 5. Зависимость угловой частоты вращения от времени в относительных единицах:

a — одиночная работа синхронного генератора;

б — работа синхронного генератора с подключенным импульсным источником

Правилами Морского регистра к судовым автоматическим системам распределения нагрузки устанавливается следующая норма: при набросе (сбросе) 100 %-ной нагрузки изменение частоты вращения ПД не должно превышать ± 10 % номинального значения, а установившаяся частота вращения не должна отличаться более чем на ± 5 % от номинальной (это требование одинаково для турбин и дизелей, за тем исключением, что у дизелей наброс нагрузки проводится в две ступени, по 50 % каждая) [5]. На рисунке 5, *a* видно, как дизель-генератор критически близко подходит к 10 %-ной границе, это говорит о том, что в реальных условиях автоматическая система может не отработать отклонение в 10 %, нарушив требования Морского регистра. Включение в параллельную работу импульсного источника трехфазного питания, как видно на графике рис. 5, *б*, позволяет значительно снизить отклонение по частоте вращения приблизительно до 0,01 %.

Анализ полученных характеристик показывает, что судовые дизель-генераторные агрегаты, особенно со сроком службы более 10 лет, не всегда способны обеспечить частоту питающей сети в пределах требований Морского регистра при пуске электрических машин, соизмеримых с мощностью генератора. Это может привести либо к отключению второстепенных потребителей, либо к запрету выхода судна в море. Результаты исследования имитационной модели устройства на основе суперконденсатора показывают, что предлагаемое устройство способно компенсировать пусковой режим работы мощных судовых потребителей без участия дополнительного синхронного генератора в параллели.

Таким образом, исследование модели доказывает, что предложенное устройство уменьшает диапазон отклонения работы генераторного агрегата по частоте до 0,01 %. Модель позволяет сделать выводы о том, что дизель не имеет достаточной надежности, чтобы обеспечить качество энергии, соизмеримое с береговым. В любой момент при возникновении динамических перегрузок дизель может не обеспечить необходимую частоту вращения, что приведет к непредвиденному отключению потребителей и нарушит бесперебойную подачу электрической энергии. Это может привести к серьезным последствиям, так, например, если произойдет перегрузка момента траловой лебедки, то остановка привода приведет к тому, что трал, переполненный уловом, останется за бортом, в любой момент это может быть последствием переворота всего судна, что приведет к гибели судна и всего экипажа. Положительным эффектом при внедрении устройства будет обеспечение динамической устойчивости работы судовой электростанции, которая способна от-

вечать устойчивости работе системы берегового электроснабжения. Можно сделать выводы, что предлагаемое устройство позволит сделать дизель-генераторный агрегат системным устройством с улучшенными показателями качества электрической энергии.

Подводя итог, можно сделать вывод, что использование предлагаемого устройства обеспечит следующие преимущества:

- повышение надежности работы электростанции в связи с возможностью исключения провалов напряжения;
- уменьшение длительности амплитуды бросков напряжения при переключении режимов холостого хода в нагрузку и наоборот;
- обеспечение бесперебойной подачи электрической энергии;
- исключает ресинхронизацию параллельно работающих генераторов;
- исключает сложную операцию повторной синхронизации параллельно работающих генераторов в случае возникновения асинхронного режима работы.

Откладывание реализации энергосберегающих мероприятий наносит значительный экономический ущерб предприятиям и негативно отражается на общей экологической и социально-экономической ситуации. Помимо этого, дальнейший рост издержек рыбопромыслового флота и других отраслей народного хозяйства сопровождается растущим дефицитом финансовых ресурсов, что задерживает обновление производственной базы предприятий в соответствии с достижениями научно-технического прогресса. Уменьшение энергетической составляющей в издержках производства позволит получить дополнительные средства для обеспечения приемлемого уровня морального и физического износа технологического оборудования.

Предлагаемое техническое решение может быть исполнено на судах рыбопромыслового флота и электростанциях, эксплуатирующихся в режиме резкого изменения нагрузки со стороны потребителя, как в большую, так и в меньшую сторону.

Список литературы

1. *Труднев С. Ю.* Разработка цифровых моделей режимных свойств для исследования динамической устойчивости судовой электроэнергетической системы / С. Ю. Труднев, Н. Н. Портнягин // Вестник КамчатГТУ. — 2012. — № 20.
2. *Черных И. В.* Моделирование электротехнических устройств в MATLAB Sim Power Systems и Simulink / И. В. Черных. — М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. — 288 с.
3. Пат. RU 133364 U1. Устройство для определения и ликвидации предотказных состояний синхронной машины / Труднев С. Ю., Портнягин Н. Н. — Бюл. № 28; Оpubл. 10.10.2013.
4. *Труднев С. Ю.* Разработка математической модели вторичного источника питания / С. Ю. Труднев // Наука, образование, инновации: пути развития : материалы IV Всерос. науч.-практ. конф., 23–25 апреля 2013 г. — Петропавловск-Камчатский, 2013. — Ч. 1.
5. Правила классификации и постройки морских судов. — СПб.: Транспорт, 2010. — 280 с.