

УДК 621.317.629.12

Разработка и моделирование дизель-генератора с изменяемой частотой вращения в судовой единой электроэнергетической системе

Г.И. Коробко, О.С. Хватов, И.Г. Коробко

ФГБОУВО «Волжский государственный университет водного транспорта», г. Н.Новгород, Российская Федерация
E-mail: elektrotech@vgavt-nn.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса: Применение в судовой единой электроэнергетической системе мощных статических преобразователей, являющихся нелинейной нагрузкой и соизмеримых с мощностью источников, вызывает существенные искажения напряжения в судовой сети. Это отрицательно сказывается на работе многих элементов электростанции, и в первую очередь таких потребителей, как системы автоматики и управления судном. Решение данной проблемы заключается в использовании в составе электростанции стояночного дизель-генератора, выполняющего в настоящее время функции аварийного и специального источника, обеспечивающего живучесть судна. В связи с этим для ряда судов требуется постоянная работа стояночного генератора, при этом его нагрузка будет изменяться в широком диапазоне – от номинальной до минимального значения (20–30 % от P_n). Актуальным направлением является разработка и создание дизель-генераторных установок, работающих с изменяемой частотой вращения приводного двигателя в зависимости от нагрузки генератора, обеспечивающих ощутимую экономию топлива (до 10–20 %) в судовой единой энергетической системе. В настоящее время ведутся активные исследования в области моделирования и создания таких установок, однако вопрос поддержания постоянства выходного напряжения и частоты требует проработки.

Материалы и методы: Математический расчет, моделирование генераторного агрегата с изменяемой и фиксированной частотой вращения осуществлены в пакете MATLAB Simulink с использованием библиотеки SimPowerSystems, расчет – методом Рунге-Кутты (ode4) с фиксированным шагом. В модели учтены изменения индуктивных составляющих при изменении частоты напряжения на выходе генератора, а также смоделирована кривая намагничивания с учетом насыщения. Дизельный двигатель рассматривается без учета изменения тепловых потерь в разных режимах работы.

Результаты: Разработана блок-схема и модель генераторного агрегата с системами автоматического регулирования частоты вращения дизеля, напряжения синхронного генератора, частоты и амплитуды выходного напряжения преобразователя частоты. Для этих систем определены оптимальные параметры и настройка элементов.

Выводы: Предложенные системы регулирования параметров выходного напряжения на нагрузке показали высокую статическую и динамическую точность амплитуды и синусоидальность формы благодаря применению простого фильтра низкой частоты. Как показало моделирование, при изменении активной нагрузки синхронного генератора происходит изменение частоты вращения дизеля, что позволяет достигнуть снижения расхода топлива (максимальная экономия составляет 16–22 %), при этом напряжение генератора остается номинальным и поддерживается с высокой точностью.

Ключевые слова: автономная электростанция, дизель-генератор, система регулирования напряжения, преобразователь частоты, экономия топлива, регулирование скорости.

Designing and modelling of variable speed diesel generators for ship unified electric power systems

G.I. Korobko, O.S. Khvatov, I.G. Korobko

Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russian Federation
E-mail: elektrotech@vgavt-nn.ru

Abstract

Background: Using powerful static converters in a ship unified electric power system considerably distorts the voltage in the ship power network as the latter are a non-linear load and are comparable in power with the power supply sources. This factor has a negative effect on operation of many power plant components, in particular automation and control systems. This problem can be solved by installing a harbor diesel generator at the power plant. Such generators are now used as an emergency power supply source and a special power supply source ensuring ship survivability. That is why on some ships, harbor generators are expected to work continuously, with their load varying within a wide range: from the nominal value to the minimal one (20–30 % of P_n). It is quite urgent to develop and design diesel generator units in which the drive motor rotation speed depends on the generator load considerably saving fuel (by up to 10–20 %) in the ship power system. The problems of modeling and designing such units are being actively studied but the problem of maintaining constant output voltage and engine speed still remains unsolved.

Materials and methods: The mathematical calculations and modeling of variable and fixed speed generator units were made in the «SimPowerSystems» library of the MATLAB Simulink package, with the fixed step Runge-Kutta (ode4) method used for the calculations. The model accounts for the changes in the inductive components occurring with the voltage fre-

quency changes at the generator output and simulates the magnetization curve including the saturation magnetization. The heat loss variations in different modes of diesel generator operation are left out of account.

Results: The authors have developed a flow chart and a model of a generator unit with automatic systems of rotation speed, synchronous generator voltage, frequency converter output voltage frequency and amplitude control. They have also determined the optimal operation and component adjustment parameters.

Conclusions: The suggested systems of output voltage parameters control in the load mode ensure high accuracy of static and dynamic amplitude and sinusoidal curve form by using a simple low-pass filter. As the modeling shows, variations in the active load of a synchronous generator change the diesel rotation speed, which saves fuel (the maximum economy reached 16–22 %), while the generator voltage remains nominal and is accurately maintained.

Key words: autonomous electric power plant, diesel generator, voltage control system, frequency converter, fuel economy, speed control.

DOI: 10.17588/2072-2672.2017.1.055-061

Введение. Единые электроэнергетические системы (ЕЭС) широко используются на пассажирских, технических, промысловых и других судах морского и речного флота.

В состав ЕЭС входит гребная электрическая установка (ГЭУ), приводящая в работу гребные двигатели, и судовая электроэнергетическая станция (СЭЭС) для питания всех общесудовых потребителей. Как показывает анализ, основным источником электроэнергии на судах с ЕЭС являются дизель-генераторы переменного тока.

На рис. 1 представлена блок-схема ЕЭС, в состав которой входят четыре главных генератора G1...G4 и генератор G5, выполняющий функции стояночного, аварийного и специального источника, обеспечивающего живучесть судна. Статические преобразователи UZ1 и UZ2 управляют работой гребных электродвигателей M1, M2, а преобразователи UZ3, UZ4 – электродвигателями подруливающих устройств M3, M4.

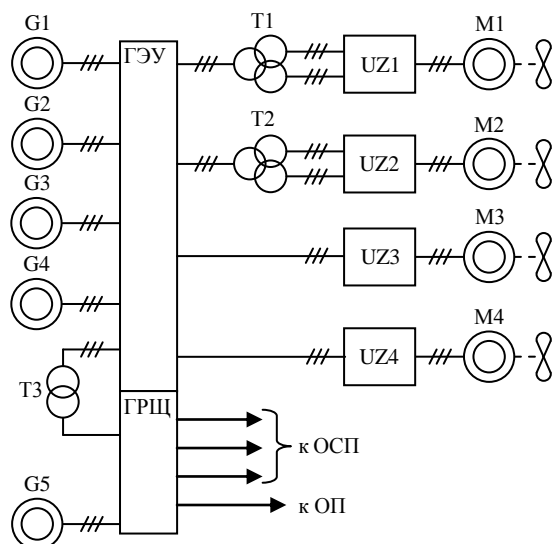


Рис. 1. Блок-схема единой энергетической системы судна

В ходовом режиме общесудовые потребители (ОСП) питаются от главного распределительного щита (ГРЩ), получающего напряжение через силовой согласующий трансформатор Т3. При стоянке судна и в аварийном режиме питания ОСП обеспечивается дизель-

генератором G5. В ряде случаев ответственные потребители (ОП) получают питание от генератора G5, работающего постоянно, при этом нагрузка дизель-генератора будет изменяться в широком диапазоне – от номинальной до минимальной величины.

Особенность ЕЭС заключается в применении силовых статических полупроводниковых преобразователей, являющихся нелинейной нагрузкой. Соизмеримость мощности источников и потребителей вызывает существенное искажение синусоидальности кривой напряжения в судовой сети и отрицательно сказывается на работе всех составляющих электростанции [1]. Этот факт заставляет повышать мощность генераторов ЕЭС, силовых трансформаторов, статических преобразователей и электродвигателей ГЭУ приблизительно на 10 %. Применение специальных схемных решений и устройств позволяет снизить значение коэффициента нелинейных искажений напряжения $K_{\text{н}}$ до величины, не превышающей 10 %. На шинах ЕЭС применение силовых полупроводниковых устройств, вызывающих искажения синусоидальной кривой напряжения более чем на 10 %, является в каждом случае предметом специального рассмотрения Российским Морским Регистром Судоходства. По особому согласованию с ним допускается использование отдельных шин с $K_{\text{н}} > 10 \%$ для питания мощных источников высших гармоник напряжения через специальное развязывающее устройство.

В связи с питанием ОСП от шин ЕЭС или через понижающий силовой трансформатор Т5, коэффициент нелинейных искажений может еще более возрасти из-за работы общесудовых потребителей с нелинейными характеристиками. Это может увеличить нелинейные искажения в силовых сетях ГЭУ и для питания систем автоматики и управления гребной установки.

В режиме стоянки судна мощность G5 для ОСП будет изменяться в широком диапазоне – от номинальной до минимальной величины, составляющей 20–30 % от $P_{\text{н}}$. Как показано в [2], при уменьшении активной мощности нагрузки генератора для сокращения удельного расхода топлива необходимо уменьшать частоту вращения дизеля. Исследованиями доказано, что удельный расход топлива в этом случае можно сократить

на 5–10 %. Для этого в состав системы управления дизелями необходимо ввести каналы регулирования их частоты вращения.

Исследования показали, что при снижении частоты в сети на 20–25 % от номинального значения преобразователь частоты способен обеспечить потребителей номинальным напряжением при ограниченной их мощности.

Снижение частоты вращения стояночного дизель-генератора ЭЭС проявляется, в первую очередь, в уменьшении частоты напряжения на шинах ГРЩ. Амплитуда напряжения останется номинальной до тех пор, пока система регулирования генератора сможет увеличивать его ток возбуждения с учетом изменения нагрузки. Однако наступит момент, когда возможности системы регулирования возбуждения будут исчерпаны и напряжение на зажимах генератора начнет снижаться. Если для преобразователей ГЭУ снижение частоты и амплитуды питающего напряжения не является критичным, то для общесудовых потребителей это недопустимо по вполне понятным причинам.

В целях обеспечения питания общесудовых потребителей электроэнергией требуемого качества в [3] предлагалось использовать вольтодобавочное устройство, которое обеспечивало постоянство напряжения на входе ПЧ. Однако данное устройство требует установки дополнительного оборудования и усложнения системы управления, что снижает надежность.

Работа дизель-генераторов электростанции зависит от эффективности разработанных систем автоматического регулирования:

- частоты вращения приводного двигателя;
- напряжения синхронного генератора;
- частоты и амплитуды выходного напряжения генераторного агрегата.

На рис. 2 показана блок-схема систем регулирования параметров дизель-генераторного агрегата.

В системе управления частотой вращения дизеля Д используется цифровой регулятор частоты вращения ЦРЧ, на вход которого поступает сигнал отрицательной обратной связи с датчика частоты импульсов ДИ, пропорциональный частоте вращения генераторного агрегата. Регулятор контролирует фактическое отклонение частоты импульсов от заданной, которая определяется эталонным значением $f_{\text{э}}$ и оперативным воздействием на частоту по двум входам $f_{\text{>}}$ и $f_{\text{<}}$. Регулятор частоты вырабатывает ток управления $I_{\text{А}}$ актуатором А, пропорцио-

нальный разности заданной и фактической частоты вращения вала генераторного агрегата. Актуатор представляет собой поворотное устройство, состоящее из электромагнита и возвратной пружины. Чем больше ток в обмотке электромагнита, тем больше угол поворота $\alpha_{\text{А}}$ выходного вала актуатора. Это будет соответствовать увеличению положения топливной рейки и, тем самым, количеству топлива, поступающего в двигатель внутреннего сгорания при увеличении его частоты вращения и момента.

При работе установки с изменяемой частотой вращения на входы регулятора ЦРЧ $f_{\text{>}}$ и $f_{\text{<}}$ через импульсный преобразователь ИП подается сигнал с выхода блока экономичного режима БЭР. Этот блок, получив на вход сигнал об активной мощности, отдаваемой генератором $P_{\text{Г}}$, сформированный в блоке измерения БИ, вырабатывает оптимальный сигнал по отклонению частоты вращения генератора $\Delta\omega_{\text{опт}}$. Для его определения используется зависимость $\Delta\omega^*_{\text{опт}} = 1 - \omega^*_{\text{опт}}$, в которой значение $\omega^*_{\text{опт}}$ является характеристикой экономичного режима дизеля. Точное поддержание заданной частоты вращения дизеля обеспечивает оптимальный расход топлива [4].

Снижение частоты вращения дизеля (до 75–80 % от номинальной величины) приведет к уменьшению частоты выходного напряжения генератора. Поддержание амплитуды напряжения генератора на номинальном уровне будет обеспечено за счет регулятора возбуждения – РВ, на входе которого сравнивается значение напряжения на выходе генератора и заданного напряжения $U_{\text{н}}$. Для этого используются синхронные генераторы с «высокой» характеристикой холостого хода и повышенным до 415 В и более номинальным напряжением [5].

Система поддержания амплитуды переменного напряжения на выходе дизель-генератора состоит из силовых и управляющих устройств. На выходе дизель-генераторного агрегата подключен преобразователь частоты ПЧ, особенностью которого является работа при снижении входной частоты напряжения до 25 % от номинального значения (преобразователи фирмы Siemens и др). На входы контроллера поступают сигналы управления частотой $U_{\text{УЧ}}$, и напряжением $U_{\text{УН}}$. На выходе преобразователя частоты установлен фильтр низких частот ФНЧ, предназначенный для получения синусоидальной формы выходного напряжения, поступающего на нагрузку Н.

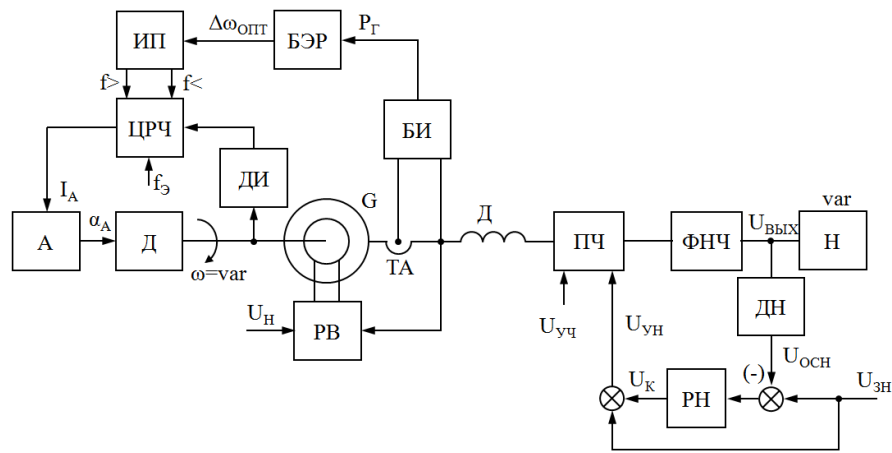


Рис. 2. Блок-схема дизель-генератора с системами автоматического регулирования

Поддержание амплитуды переменного напряжения на выходе генераторного агрегата осуществляется регулятором напряжения РН, на входы которого поступают напряжения задания $U_{3Н}$ и обратной связи $U_{ОСН}$. Для получения этого сигнала используется датчик напряжения ДН, подключенный к выходу генераторного агрегата. По мере увеличения тока нагрузки выходное напряжение $U_{ВЫХ}$ будет снижаться из-за роста потерь в фильтре низких частот, а также в элементе преобразователя частоты. С помощью датчика напряжения формируется сигнал обратной связи по напряжению $U_{ОСН}$, который сравнивается с сигналом задания $U_{3Н}$, и полученная разница поступает на вход регулятора напряжения. В результате на выходе регулятора напряжения будет получен сигнал компенсации $U_К$. В сигнал задания $U_{3Н}$ добавляется величина сигнала компенсации $U_К$, а полученный сигнал $U_{УН}$ является задающим по напряжению для преобразователя частоты. В режиме холостого хода, когда ток нагрузки равен нулю, $U_{3Н} = U_{ОСН}$, при этом $U_К = 0$.

Оценка ошибки по напряжению на нагрузке определяется формулой

$$\Delta U_{НАГР} = \frac{\Delta U_{\Sigma}}{(1 + K_{РН})},$$

где ΔU_{Σ} – величина падения напряжения на нагрузке при номинальном токе без замкнутой системы регулирования; $K_{РН}$ – коэффициент усиления регулятора напряжения РН.

При значении $\Delta U_{\Sigma} = 5\%$ (от U_H) при номинальном токе нагрузки и коэффициенте усиления регулятора $K_{РН} = 10$ ошибка составляет $\Delta U_{НАГР} = 0,6\%$. Предложенная выше система управления отличается от классической системы по отклонению, требующей наличие датчика напряжения с низким уровнем пульсаций выходного сигнала. В случае применения измерителя на базе выпрямителя потребуются сглаживающий фильтр высокого порядка с большой постоянной времени, который заметно снизит быстродействие системы. Основное достоинство

во предложенной системе управления, по сравнению с классической системой, заключается в возможности работы при наличии пульсаций на выходе измерителя напряжения, что позволяет отказаться от использования дополнительных фильтров и повысить быстродействие и точность работы системы.

Методы исследования. Для моделирования системы регулирования напряжения дизель-генераторного агрегата изменяемой частоты вращения в пакете Matlab Simulink была создана модель, представленная на рис. 3.

В модели использованы стандартные блоки библиотеки *SimPowerSystem*. Генератор представлен эквивалентной явнополюсной фундаментальной синхронной машиной *Synchronous Machine pu Fundamental* мощностью 250 кВт с номинальным выходным напряжением 415 В частотой 50 Гц. Регулятор возбуждения генератора представлен блоком *Excitation System*, который формирует напряжение возбуждения на зажимах генератора и заданием, поступающим на вход V_{ref} . Блок *SM_Demux* предназначен для разбивки текущих параметров генератора с выхода m (напряжения V_d и V_q поступают на вход регулятора возбуждения). К выходу генератора подключен блок *Power Meter*, измеряющий значения активного и реактивного тока и выходного напряжения. Задатчик экономического режима представлен блоком *EMS*. На его вход поступает измеренное значение активного тока, в соответствии с которым формируется задание на скорость дизеля, приводящего в действие синхронный генератор. Нагрузкой генератора является эквивалентная активно-реактивная нагрузка *Series RLC Load*. Через входные дроссели к генератору подключен преобразователь частоты, состоящий из выпрямителя *FC Rectifier*, фильтра в звене постоянного тока *LC Filter*, инвертора *FC Invertor* и ШИМ-контроллера *PWM Control*.

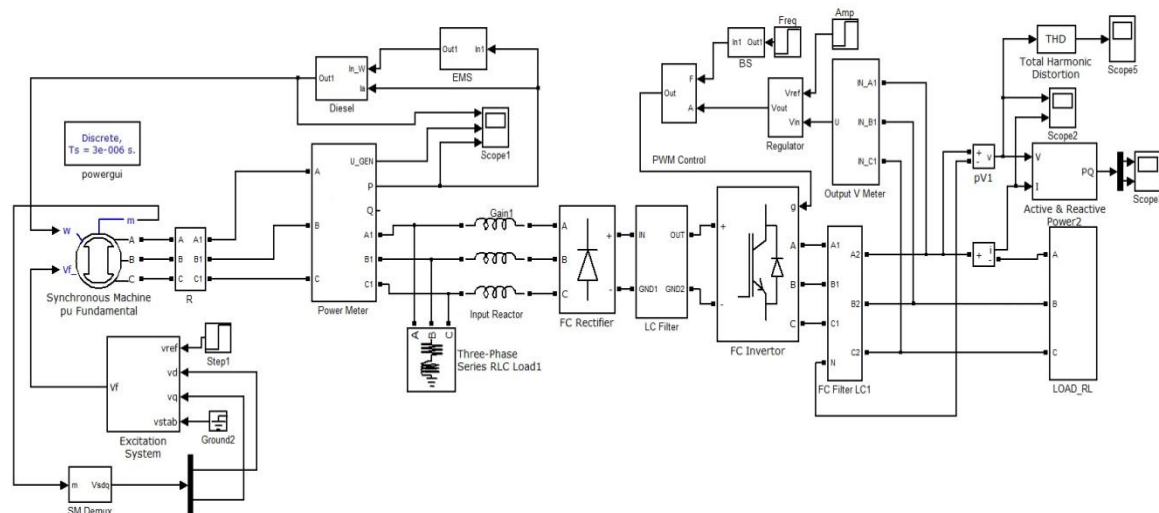


Рис. 3. Модель систем регулирования параметров генераторного агрегата с изменяемой частотой вращения

Значения частоты и амплитуды напряжения на выходе ПЧ задаются через входы F и A, а их задатчики *Freq* и *Amp* подключаются через блок формирования сигналов синхронизации *BS* и регулятор напряжения *Regulator*. К выходу преобразователя частоты через синусный LC-фильтр *FC Filter LC1* подключена активновыдуктивная нагрузка *Load RL*. Для измерения выходящего трехфазного переменного напряжения используется блок *Output V Meter*, представляющий собой трехфазный понижающий трансформатор и выпрямитель с фильтром низких частот. Таким образом, на выходе блока формируется сигнал постоянного тока, поступающий на вход блока *Regulator*, пропорциональный измеренному значению выходного напряжения на нагрузке. Блоки *Active&Reactive Power 2* и *Total Harmonic Distortion THD* используются для измерения активной и реактивной мощности и коэффициента нелинейных искажений на выходе.

Результаты исследования. Результаты моделирования систем автоматического регулирования дизель-генератора показаны на рис. 4 (в о.е.), где изменение активной мощности, отдаваемой генератором, приводит к изменению частоты вращения дизеля. При этом напряжение на шинах синхронного генератора остается номинальным.

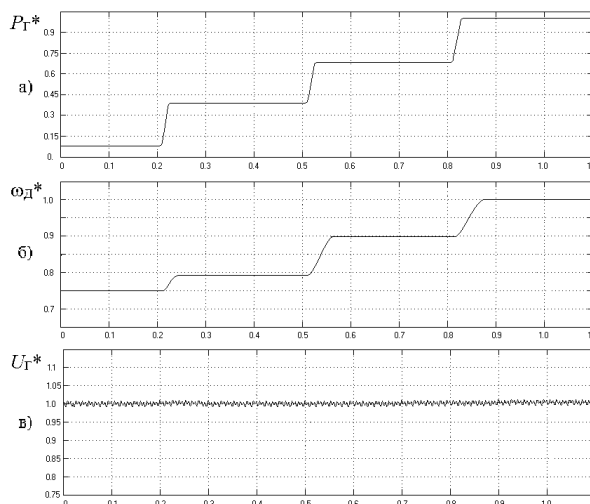


Рис. 4. Диаграммы изменения: а – активной мощности генератора P_G^* ; б – частоты вращения дизеля ω_d^* ; в – напряжения на выходе генератора U_G^*

В зависимости от отдаваемой генератором активной мощности (рис. 5) будет изменяться расход топлива дизель-генератора. Кривая G^* показывает относительный расход топлива дизель-генератора без регулирования частоты вращения. При регулировании частоты вращения дизеля, используя характеристику экономичного режима $\omega_{опт}^*$, снижение частоты вращения дизеля уменьшает расход топлива (кривая $G^{*'}$ располагается ниже G^*). Наибольшее снижение расхода топлива ΔG^* достигается при изменении нагрузки в диапазоне от 25 до 50 % от номинальной мощности и составляет 16–22 %.

На рис. 6 представлена диаграмма изменения величины активной мощности, отдаваемой в нагрузку, и огибающая действующего значения напряжения на нагрузке $U_{Вых}$ в разомкнутой и замкнутой системе. При изменении нагрузки от 0 до 185 кВт снижение линейного напряжения в разомкнутой системе составляет приблизительно

но 22 В. В замкнутой системе стабилизации изменение напряжения не превышает 2 В в статике, а величина динамических провалов составляет около 8 В.

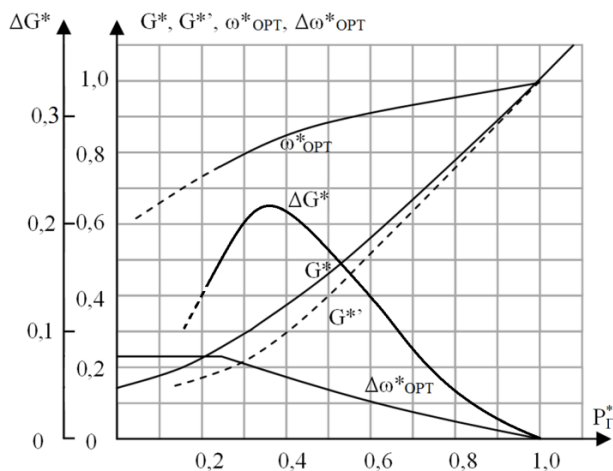


Рис. 5. Зависимости расхода топлива и частоты вращения дизеля от мощности нагрузки

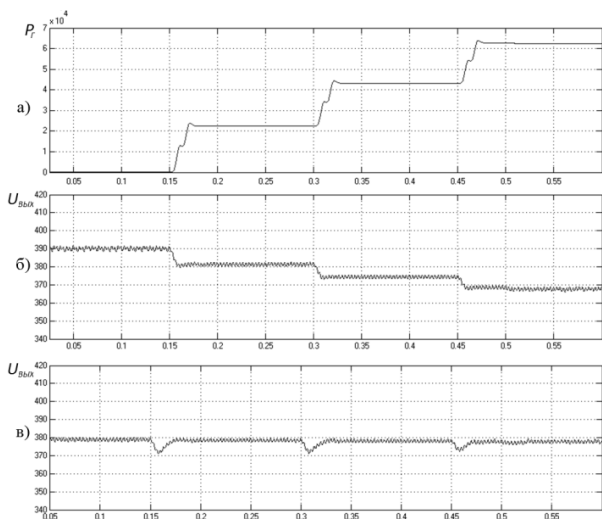


Рис. 6. Диаграмма изменения: а – активной мощности на нагрузке; б – огибающей напряжения в разомкнутой системе; в – огибающей напряжения в замкнутой системе

Выводы. Предложенный вариант питания ОСП и ОП позволяет обеспечить высокое качество электроэнергии в различных режимах работы судна. За счет применения дизель-генератора с изменяемой частотой вращения расход топлива снижается до 16–22 % (по сравнению с системой без регулирования частоты). Кроме того, снижение эксплуатационных расходов приведет к улучшению работы ЭЭС с точки зрения экономической эффективности.

Коробко Григорий Иванович,

ФГБОУВО «Волжский государственный университет водного транспорта», кандидат технических наук, доцент кафедры электротехники и электрооборудования объектов водного транспорта, e-mail: tv-out@narod.ru

В ШИМ-контроллере ПЧ разработаны специальные сигналы синхронизации по фазам. За счет этого в выходном напряжении ПЧ кроме основной частоты присутствует только частота модуляции. Выходное напряжение ПЧ достигает величины напряжения источника, равной единице, что является актуальным.

Анализ осциллограмм выходного напряжения преобразователя частоты показывает, что при применении фильтра с малой постоянной времени форма напряжения на выходе практически синусоидальная, а коэффициент нелинейных искажений составляет чуть более 1 %.

Список литературы

1. Анисимов Я.Ф., Васильев Е.П. Электромагнитная совместимость полупроводниковых преобразователей и судовых электроустановок. – Л.: Судостроение, 1990. – 264 с.
2. Двигатели внутреннего сгорания: теория поршневых и комбинированных двигателей / под ред. А.С. Орлина, М.Г. Круглова. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1993. – 372 с.
3. Климаш В.С. Вольтодобавочные устройства для компенсации отклонений напряжения и реактивной энергии с амплитудным, импульсным и фазовым регулированием // Комсомол.-на-Амуре гос. техн. ун-т. – Владивосток: Дальнаука, 2002. – 140 с.
4. Обухов С.Г., Плотников И.А. Экспериментальные исследования дизель-генераторной установки на переменной частоте вращения // Известия Томского политехнического университета. – 2015. – Т. 326, № 6.
5. Электроснабжение потребителей на судах с ЭЭС / Г.И. Коробко, В.В. Лебедев, И.Г. Коробко, С.В. Попов // Вестник ВГАВТ. – 2015. – Вып. 44.

References

1. Anisimov, Ya.F., Vasilyev, E.P. *Elektromagnitnaya sovmestimost' poluprovodnikovyykh preobrazovateley i sudovykh elektroustanovok* [Electromagnetic compatibility of semiconductor transformers and ship electric power plants]. Leningrad, Sudostroenie, 1990. 264 p.
2. Orlina, A.S., Kruglova, M.G. *Dvigateli vnutrennego sgoraniya: teoriya porshnevyykh i kombinirovannykh dvigateley* [Internal combustion engines: theory of reciprocating and combined engines]. Moscow, Mashinostroenie, 1983. 372 p.
3. Klimash, V.S. *Vol'todobavochnye ustroystva dlya kompensatsii otkloneniy napryazheniya i reaktivnoy energii s amplitudnym, impul'snym i fazovym regulirovaniem* [Voltage boosters with amplitude, pulse and phase control for compensation of voltage and reactive energy deviation]. Vladivostok, Dal'nauka, 2002. 140 p.
4. Obukhov, S.G., Plotnikov, I.A. *Ekspperimental'nye issledovaniya dizel'-generatornoy ustanovki na peremennoy chasote vrashcheniya* [Experimental studies of variable speed diesel generator units]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta*, 2015, vol. 326, no. 6.
5. Korobko, G.I., Lebedev V.V., Korobko I.G., Popov S.V. *Elektrosnabzhenie potrebiteley na sudakh s EES* [Consumer power supply on vessels with unified electric power systems]. *Vestnik VGAVT*, 2015, no. 44.

Korobko Grigory Ivanovich,
Volga State University of Water Transport,
Candidate of Engineering, Associate Professor of the Department of Electrical Engineering and Electric Equipment of Water Transport Facilities,
e-mail: tv-out@narod.ru

Хватов Олег Станиславович,
ФГБОУВО «Волжский государственный университет водного транспорта»,
профессор, доктор технических наук, зав. кафедрой электротехники и электрооборудования объектов водного транспорта,
e-mail: khvatov_oleg@mail.ru

Khvatov Oleg Stanislavovich,
Volga State University of Water Transport,
Professor, Doctor of Engineering, Head of the Department of Electrical Engineering and Electric Equipment of Water Transport Facilities,
e-mail: khvatov_oleg@mail.ru

Коробко Иван Григорьевич,
ФГБОУВО «Волжский государственный университет водного транспорта»,
аспирант кафедры электротехники и электрооборудования объектов водного транспорта,
e-mail: ivan17389@gmail.com

Korobko Ivan Grigoryevich,
Volga State University of Water Transport,
Post-graduate student of the Department of Electrical Engineering and Electric Equipment of Water Transport Facilities,
e-mail: ivan17389@gmail.com