

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-6-1264-1276

BOOSTER VOLTAGE CORRECTOR WITH USE OF STANDARD VOLTAGE FORM

V. G. Sugakov, N. S. Varlamov, Yu. S. Malyshev

Volga state university of water transport, Nizhny Novgorod, Russian Federation

The destabilizing factor of various kinds influences on a quality electrical energy in ship electric power systems. These factors include the connection of nonlinear electrical energy converters and the asymmetry of loads, and other consumers with non-linear characteristics. Traditionally, the compensating devices used in practice do not allow a comprehensive approach to improving a quality of electrical energy. It is expedient to switch to the use of multifunctional systems for improving the quality of electric energy in such conditions. For this purpose, a voltage corrector based on the boost voltage has been designed and tested, which, by approximating the shape of the voltage curve to the reference one, simultaneously eliminates unbalance of phase voltages and reduces harmonic distortions for power consumers. One of the measures to justify the use of a voltage corrector is simulation, in which the ship's electric power system is the object of research. Based on the simulation results, the coefficients of harmonic distortion and asymmetry coefficients were determined by reverse and zero sequence are determined. It is revealed that the use of a memory block with storage of the reference voltage form in the control system allows to sufficiently reduce the harmonic voltage distortion and the unbalance of the phase voltages at the output of the voltage corrector. However, it has been established that the use of a voltage corrector leads to a voltage distortion on the side of the generator, and also slightly increases the voltage asymmetry by reverse sequence in the case of an active load. The results of the research show the practical possibility of implementing a voltage corrector in the structure of the ship electric power system with limited power of the generator set.

Keywords: booster transformer, ship power network, voltage corrector, harmonic distortion, asymmetry.

For citation:

Sugakov, Valerij G., Nikita S. Varlamov, and Yury S. Malyshev. "Booster voltage corrector with use of standard voltage form." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.6 (2018): 1264–1276. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-6-1264-1276.

УДК 621.314.222.766

ВОЛЬТОДОБАВОЧНЫЙ КОРРЕКТОР НАПРЯЖЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭТАЛОННОЙ ФОРМЫ НАПРЯЖЕНИЯ

В. Г. Сугаков, Н. С. Варламов, Ю. С. Малышев

ФГБОУ ВО «Волжский государственный университет водного транспорта»,
Нижний Новгород, Российская Федерация

В судовых электроэнергетических системах качество электрической энергии зависит от различного рода дестабилизирующих факторов. К этим факторам относится подключение нелинейных преобразователей электрической энергии, несимметричных нагрузок и других потребителей с нелинейной характеристикой. Традиционно применяемые на практике компенсирующие устройства не позволяют осуществить комплексный подход к повышению качества электрической энергии. В таких условиях целесообразным является переход к использованию многофункциональных систем повышения качества электрической энергии. С этой целью разработан и исследован корректор напряжения на основе вольтодобавочного напряжения, который за счет приближения формы кривой напряжения к эталонной позволяет одновременно устранять небаланс фазных напряжений и уменьшать гармонические искажения для питания потребителей электрической энергии.

Одной из мер по обоснованию применения корректора напряжения является имитационное моделирование, в котором объектом исследования является судовая электроэнергетическая система. На ос-

новые результаты моделирования определены коэффициенты гармонических искажений и коэффициенты несимметрии по обратной и нулевой последовательности. Выявлено, что использование блока памяти с хранением эталонной формы напряжения в составе системы управления позволяет в достаточной мере снизить гармонические искажения напряжения и небаланс фазных напряжений на выходе корректора напряжения. Однако установлено, что применение корректора напряжения приводит к искажению напряжения со стороны генераторного агрегата, а также незначительно повышает несимметрию напряжения по обратной последовательности в случае активной нагрузки. Результаты исследования показывают практическую возможность реализации корректора напряжения в составе судовой электроэнергетической системы с ограниченной мощностью генераторного агрегата.

Ключевые слова: вольтодобавочный трансформатор, судовая электроэнергетическая сеть, корректор напряжения, гармонические искажения, несимметрия.

Для цитирования:

Сугаков В. Г. Вольтодобавочный корректор напряжения с использованием эталонной формы напряжения / В. Г. Сугаков, Н. С. Варламов, Ю. С. Малышев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 6. — С. 1264–1276. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-6-1264-1276.

Введение (Introduction)

В судовых системах электроснабжения использование полупроводниковых преобразователей электрической энергии, мощность которых соизмерима с мощностью судовой электрической станции, при несимметричном распределении мощности электропотребителей различного типа оказывает негативное воздействие на качество электрической энергии. Появление напряжений и токов обратной и нулевой последовательности, возникающих в трехфазной системе, приводит к дополнительным потерям мощности и напряжения в трехфазной системе электроснабжения, а также оказывает отрицательное влияние на работу различных исполнительных механизмов [1]–[3]. Гармонические искажения приводят к дополненным потерям в статорных обмотках синхронных генераторов, сбоям в работе радиоэлектронного оборудования, ухудшению условий коммутации полупроводниковых ключей, образованию дополнительных диэлектрических потерь, снижению класса точности устройств защиты и контрольно-измерительных приборов, а также появлению других негативных эффектов [1], [4], [5].

Согласно [6]–[8], значения суммарных коэффициентов гармонических составляющих напряжения электрической сети 380 В, усредненные в интервале времени 10 мин, не должны превышать значения 8 % в течение 95 % времени интервала за одну неделю и 12 % в течение 100 % времени интервала за одну неделю. Для значений коэффициентов несимметрии напряжений в трехфазных системах электроснабжения по обратной и нулевой последовательности в точке передачи электрической энергии не должны превышать 2 % и 4 % в течение 95 % и 100 % времени интервала за одну неделю соответственно.

Обеспечение удовлетворительного качества электрической энергии возможно только при проведении комплекса мероприятий, состоящих из оптимальных схемных решений и выбора способа управления полупроводниковым преобразователем, обеспечивающих минимизацию гармоник. К системным решениям относятся: коррекция структуры судовой системы электроснабжения, включение фильтрокомпенсирующих устройств, применение в системах автоматического регулирования напряжения корректоров напряжения и систем регулирования возбуждения синхронных генераторов с внешней форсировкой [9]. В качестве средств индивидуальной защиты отдельных потребителей могут быть использованы широкополосные фильтры. Однако в настоящее время наиболее перспективным является использование активных фильтров и вольтодобавочных компенсаторов.

Устройства, в основу которых входят вольтодобавочные трансформаторы (ВДТ), нашли широкое применение в системах компенсации небаланса фазных напряжений [10], в энергосберегающих асинхронных электроприводах [11], а также в системах коррекции гармонических искажений, вызванных работой мощных полупроводниковых приборов [12]–[14]. Недостатком схемных решений при компенсации небаланса фазных напряжений является невозможность сохранения

удовлетворительного коэффициента небаланса фазных напряжений при работе на переменную неоднородную нагрузку. В связи с этим предложен корректор напряжения [15], который за счет одновременного приближения формы кривой напряжения к идеальной синусоиде устраняет дисбаланс фазных напряжений.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Корректор напряжения (КН) состоит из вольтодобавочного трансформатора, вторичная обмотка которого включается последовательно в цепь генераторного агрегата для регулирования и стабилизации напряжения в цепи нагрузки. Первичная обмотка КН питается от регулируемого источника напряжения вольтодобавки. Принцип работы КН заключается в формировании и передаче в систему электроснабжения напряжения вольтодобавки, которое находится в противофазе с высшими гармониками напряжения сети. На рис. 1 представлена структурная схема судовой электроэнергетической системы с корректором напряжения на основе вольтодобавочных трансформаторов T_1-T_3 , включенным между генератором G с системой автоматического регулирования напряжения, нелинейной и линейной нагрузкой и несимметричной нелинейной и линейной нагрузкой. Система управления (СУ) на основе измерения напряжения каждой из фаз сети U_{L1} , U_{L2} , U_{L3} формирует напряжение вольтодобавки для каждой из фаз напряжения сети.

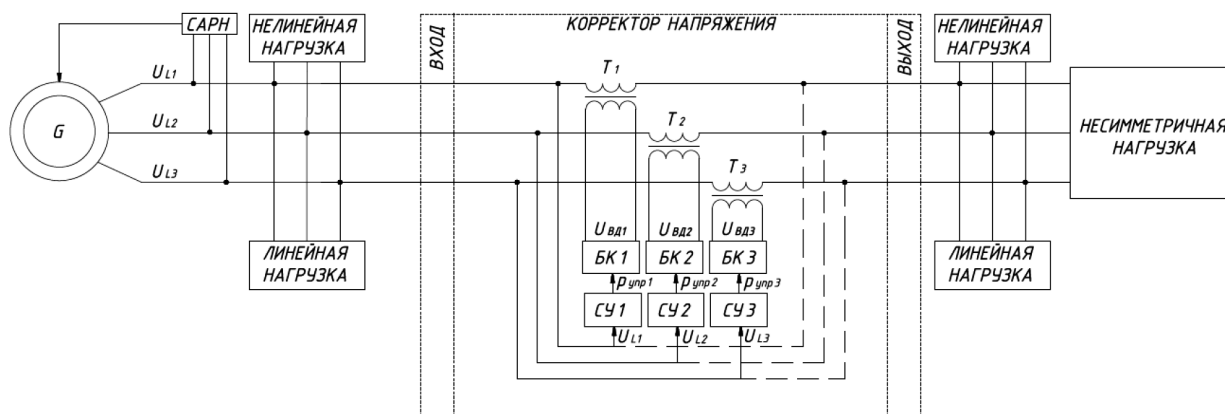


Рис. 1. Структурная схема судовой электроэнергетической системы с корректором напряжения

Для исследования эффективности компенсации гармонических искажений и небаланса фазных напряжений была разработана модель судовой электроэнергетической системы с КН в программном пакете MATLAB (номер лицензии 530479). Общий вид модели представлен на рис. 2.

В качестве генератора G (см. рис. 1) используется синхронный явнополюсный генератор мощностью 60 кВ·А с номинальным напряжением 400 В и частотой напряжения 50 Гц, который представлен блоком *Simplified Synchronous Machine pu Units*. Частота вращения задается с помощью блока w в относительных единицах. Система возбуждения генератора представлена блоком *Excitation System*, на вход которого подается требуемая величина выходного напряжения генератора с выхода блока V_{ref} в относительных единицах, и элементами *Three – PhaseV – IMeasurement1*, w и $B1$ (блок *Abctodq0*), выполняющими переход от системы координат abc к системе $dq0$. Блоки $LLoad1$, $LLoad2$ и $LLoad3$ являются линейными нагрузками генератора G . Блоки $NLoad1$ и $NLoad2$, состоящие из активной нагрузки $Load1$ и $Load2$ и неуправляемых выпрямителей $VSD1$ и $VSD2$, являются нелинейной нагрузкой. Блок $NSLoad1$ является несимметричной нагрузкой для генератора. Подключение несимметричной нагрузки $NSLoad1$ осуществляется с помощью блоков *Three – Phase – Breake* и *Start2*.



Рис. 2. Имитационная модель корректора напряжения

Каждая группа вольтметров $V1$ ($VA1$, $VB1$ и $VC1$) и $V2$ ($VA2$, $VB2$ и $VC2$) состоит из трех вольтметров, представленных блоками *Voltage Measurement*, которые измеряют напряжения в точках подключения нагрузок к клеммам генератора и в точках подключения нагрузок к клеммам КН соответственно. Блок *THD* выполняет расчет коэффициента гармонических искажений. Блок *RMS* измеряет среднеквадратичное значение напряжения. Блоки *Three – PhaseV – IMeasurement2*, *Three – PhaseV – IMeasurement3*, *Analyzer1* и *Analyzer2* (элементы $A1$ – $A6$) служат для расчета коэффициентов несимметрии напряжения по нулевой и обратной последовательности в относительных единицах.

Корректор напряжения представлен тремя вольтдобавочными трансформаторами $T1$ – $T3$, системами управления $CV1$ – $CV3$ и силовыми блоками коммутации $K1$ – $K3$. На вход каждой системы управления КН подаются: сигнал запуска с выхода блока *Start*, заданная амплитуда напряжения с выхода блока U_3 , импульсы стабильной частоты с выхода генератора импульсов *Pulse Generator* и напряжение с выхода соответствующего вольтметра группы $V1$ или $V2$.

Имитационная модель системы управления для одной фазы сетевого напряжения представлена на рис. 3. Напряжение синусоидальной формы первой фазы поступает с первого входа блока системы управления через элемент задержки 0 на элемент модуля числа 1, с выхода которого пульсирующий сигнал поступает на формирователь коротких импульсов 3, образованный элементами 3.1–3.3, через формирователь прямоугольных импульсов 2. По фронту прямоугольного сигнала с выхода элемента 2 формирователь 3 генерирует короткие импульсы, длительность которых задается элементом 3.1 и составляет половину периода следования импульсов с задающего генератора частоты. Таким образом, элементы 1–3 и их связи организуют моменты формирования измерения полупериода сетевого напряжения.

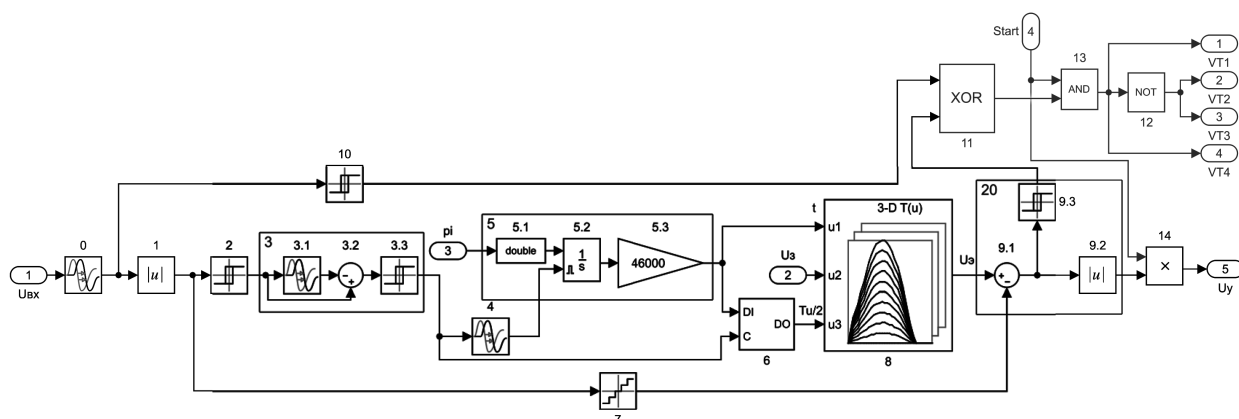


Рис. 3. Блок-схема имитационной модели системы управления корректором напряжения

Измерение текущего времени t осуществляет суммирующий счетчик 5, сформированный элементами 5.1–5.3. На счетный вход элемента 5.2 поступают через третий вход системы управления импульсы стабильной частоты с выхода генератора импульсов. На выходе элемента 5.3 появляется линейно-нарастающий сигнал, значение которого соответствует текущему времени t . При этом каждую половину периода сетевого напряжения происходит сброс счетчика 5 через элемент задержки 4 импульсом с выхода формирователя коротких импульсов 3. Задержка импульса происходит в течение периода следования импульсов с выхода генератора *Pulse Generator*.

Формирование значения числа $Tu/2$, соответствующее половине периода напряжения, осуществляет регистр памяти 6 (рис. 4, а), который состоит из элементов 6.2, 6.3 и подсистемы 6.1 (рис. 4, б). По окончании подсчета полупериода, с приходом очередной полуволны сетевого напряжения, по фронту импульса с выхода формирователя 3 в регистр записывается текущее значение сигнала с выхода суммирующего счетчика 5.

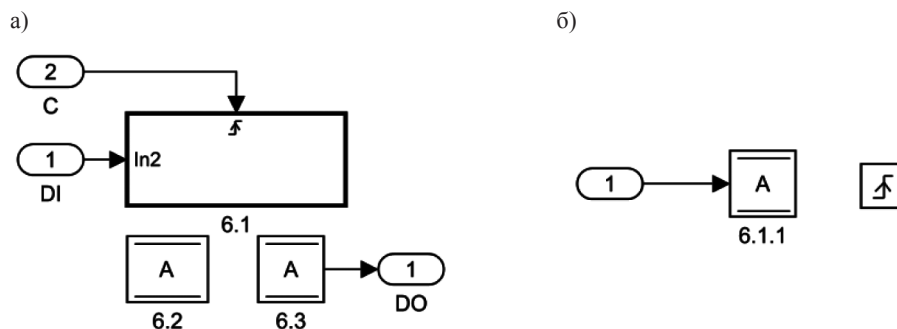


Рис. 4. Блок-схема регистра памяти:
а — подсистема 6; б — подсистема 6.1

Блок памяти 8 представлен в виде *Lookup Table* (3-д). В ячейках блока памяти записаны значения эталонного напряжения с эталонной синусоидальной формой напряжения (рис. 5). В зависимости от текущего времени t , амплитуды задающего напряжения U_3 , поступающего через второй вход системы управления, и полупериода сетевого напряжения $T/2$ на выходе блока памяти 8 появляется значение эталонного напряжения.

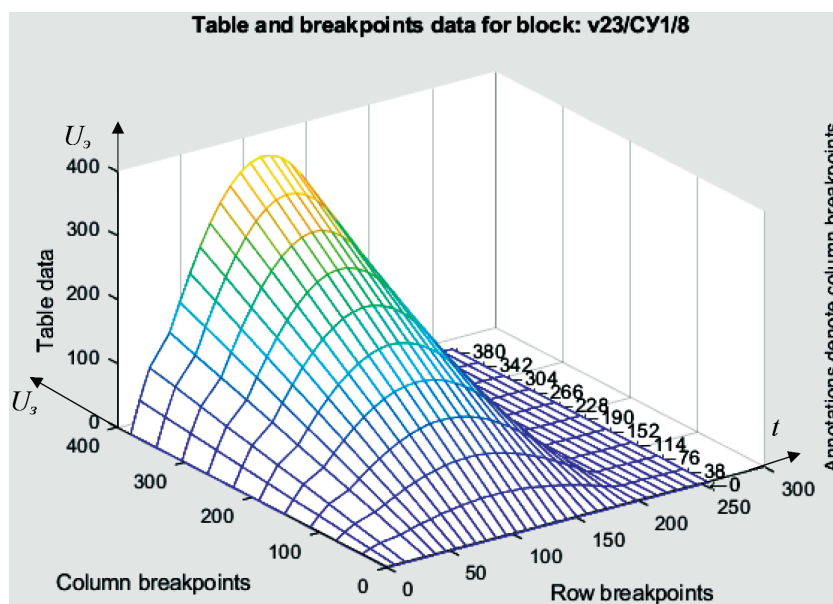


Рис. 5. Область формирования эталонной формы синусоидального напряжения в блоке памяти системы управления корректором напряжения

Из элементов 9.1, 9.2 и 9.3 собран вычитающий счетчик 9, формирующий отклонение мгновенного напряжения первой фазы, поступающего через элемент 7 дискретизации на отрицательный вход элемента 9.1, от эталонного напряжения, задаваемого блоком памяти 8 и поступающего на положительный вход элемента 9.1. Отклонение мгновенного напряжения с выхода вычитающего счетчика 9 поступает на коммутатор через элемент блокировки 14. При положительном значении отклонения мгновенного напряжения от эталонного элемент 9.3 формирует импульс управления электронными ключами.

Выбор моментов коммутации электронных ключей и определение полярности вольтодобавки обеспечивают: логический элемент, исключаящий ИЛИ11, логический элемент ИИ2, формирователь прямоугольных импульсов при прохождении положительной полуволны напряжения 10 и элемент 9.3 вычитающего счетчика 9. Элементы 13 и 14 блокируют коммутацию электронных ключей и формирование вольтодобавки при отсутствии сигнала на входе 4 системы управления.

Блок коммутации, представленный на рис. 6, содержит четыре электронных ключа $VT1$ – $VT4$ на базе IGBT-транзисторов со встречно-параллельным диодом и источник вольтодобавки *Voltage Source*.

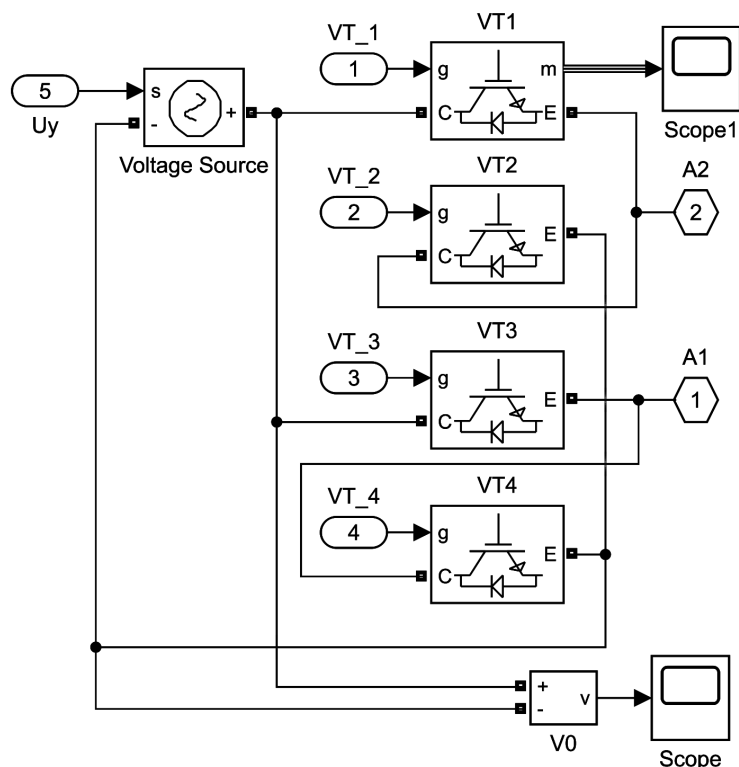


Рис. 6. Блок-схема блока коммутации корректора напряжения

Управляющие импульсы с выхода системы управления поступают на затвор электронных ключей $VT1$ – $VT4$. При этом коллекторы транзисторов $VT1$ и $VT3$ соединены с положительным полюсом элемента *Voltage Source*, а эмиттеры транзисторов $VT2$ и $VT4$ — с отрицательным полюсом. Эмиттеры транзисторов $VT1$ и $VT3$ и коллекторы транзисторов $VT2$ и $VT4$ соединены с первичной обмоткой соответствующего вольтодобавочного трансформатора.

Результаты (Results)

Для оценки эффективности применения корректора напряжения проведено исследование работы модели (см. рис. 2). На рис. 7 представлены результаты моделирования работы корректора напряжения. Мощности линейных нагрузок $LLoad1$, $LLoad2$ и $LLoad3$ принимались равными 5 кВт, 5 кВт·А (активно-индуктивный характер) и 5 кВт соответственно, мощность нелинейной нагрузки $NLoad1$ — 20 кВт. При этом мощности нагрузок $Load3$, $Load4$, $Load5$ принимались равными 6,7 кВт·А (активно-индуктивный характер), 4,24 кВт·А (активно-емкостной характер) и 6 кВт соответственно.

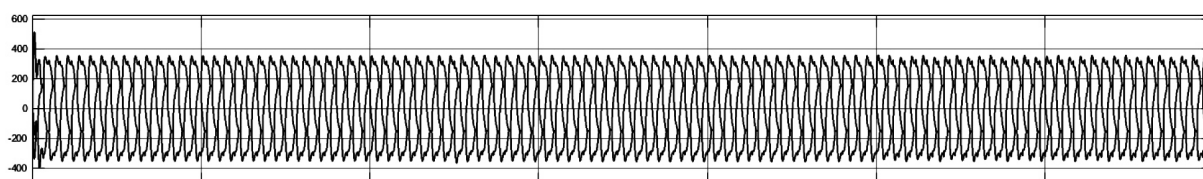
С момента включения генератора в диапазоне времени 0–0,5 с за счет нелинейной нагрузки соизмеримой мощности напряжение сети значительно искажается, а установившаяся величина нелинейных искажений достигает 14,4 % в точке присоединения генератора и 13,6 % в точке присоединения корректора напряжения. Вследствие симметрии нагрузок в данный период времени коэффициенты несимметрии по нулевой K_{0U} - и обратной K_{2U} -последовательности стремятся к нулевому значению. При этом фазные напряжения на выходе корректора напряжения остаются равными.

В момент времени 0,25 с подключается несимметричная нагрузка. В период времени 0,25–0,5, когда установившееся значение нелинейных искажений уменьшается до 15,1 % в точке

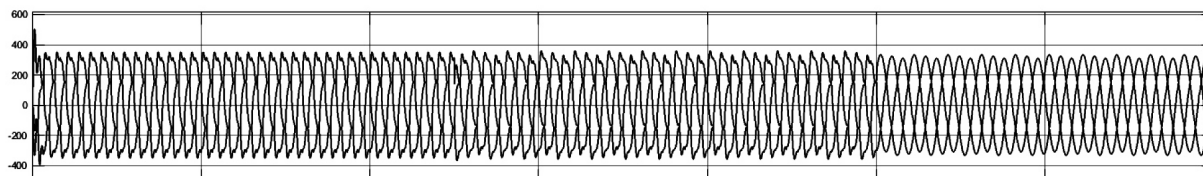
присоединения генератора и до 14,2 % на выходе корректора напряжения, а коэффициенты несимметрии по обратной и нулевой последовательности увеличиваются до 0,0376 и 0,02085 соответственно, также наблюдается небаланс фазных напряжений на выходе генератора.

В период времени 0,5 (когда вводится в работу КН)–0,7 с установившееся значение коэффициента нелинейных искажений на выходе корректора напряжения достигает 3 %, а также наблюдается незначительное уменьшение установившегося значения коэффициента нелинейных искажений до 14,54 % в точке присоединения генератора, уменьшение коэффициента несимметрии по нулевой последовательности до 0,01 и коэффициента несимметрии по обратной последовательности до 0,0345 в точке присоединения корректора напряжения.

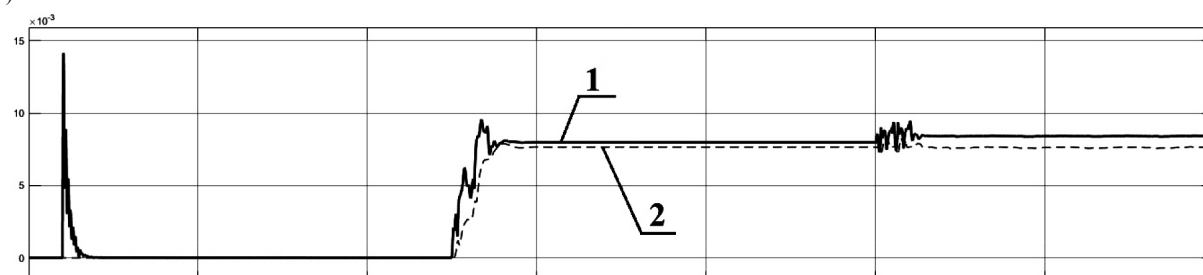
а)



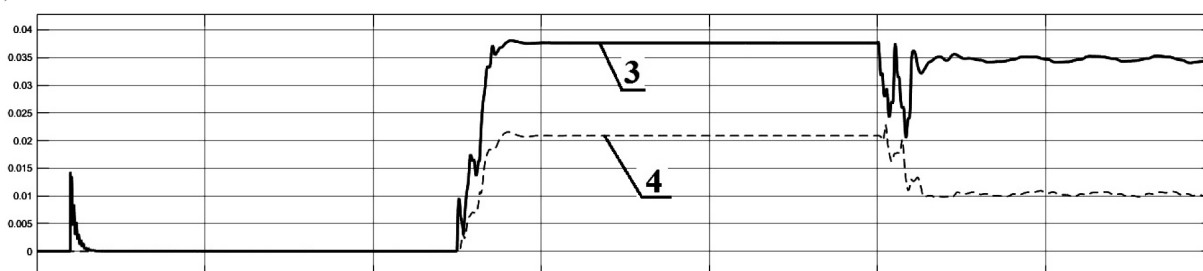
б)



в)



г)



д)

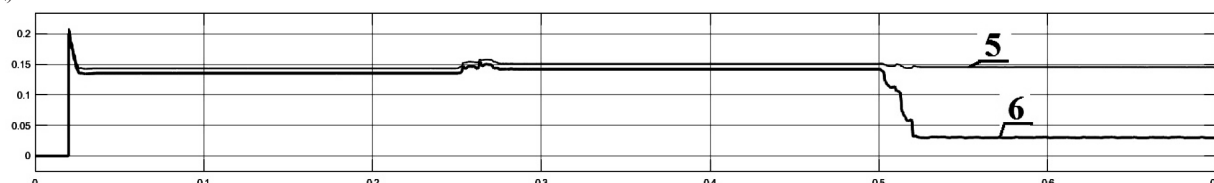
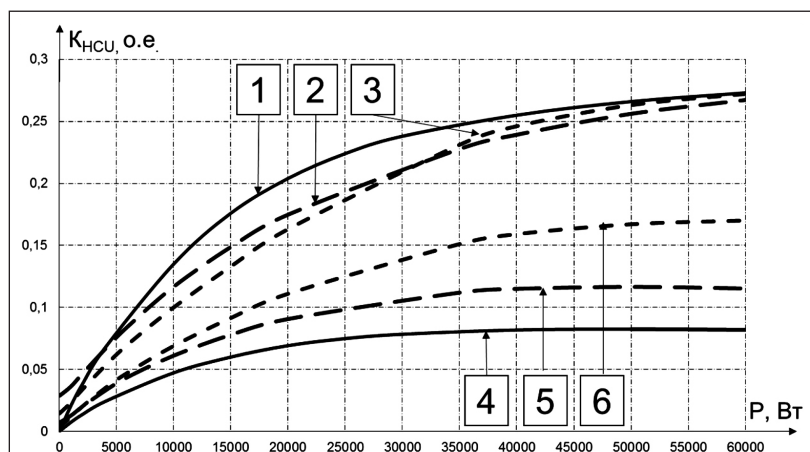


Рис. 7. Результаты моделирования работы корректора напряжения:

- а — фазные напряжения на входе КН; б — фазные напряжения на выходе КН;
- в — изменение коэффициентов нулевой 2 и обратной 1 последовательности на входе КН;
- г — изменение коэффициентов нулевой 4 и обратной 3 последовательности на КН;
- д — коэффициенты нелинейных искажений на входе 5 и на выходе КН 6

С помощью модели было исследовано влияние изменения мощности нелинейной нагрузки на величину коэффициента искажения на шинах генератора и на выходе корректора напряжения. Результаты моделирования представлены на рис. 8, где показано изменение коэффициента нелинейных искажений в судовой электроэнергетической системе без и с использованием коррекции напряжения в зависимости от мощности нелинейных нагрузок $NLoad1$ или $NLoad2$, а также при подаче на вход системы управления КН напряжений с входа / выхода вольтодобавочного трансформатора. При этом мощность нагрузок $LLoad1$, $LLoad2$, $LLoad3$ равнялась 5 кВт, 5 кВт и 5 кВт, а мощность нагрузок $Load3$, $Load4$, $Load5$ принималась равной 6 кВт.

а)



б)

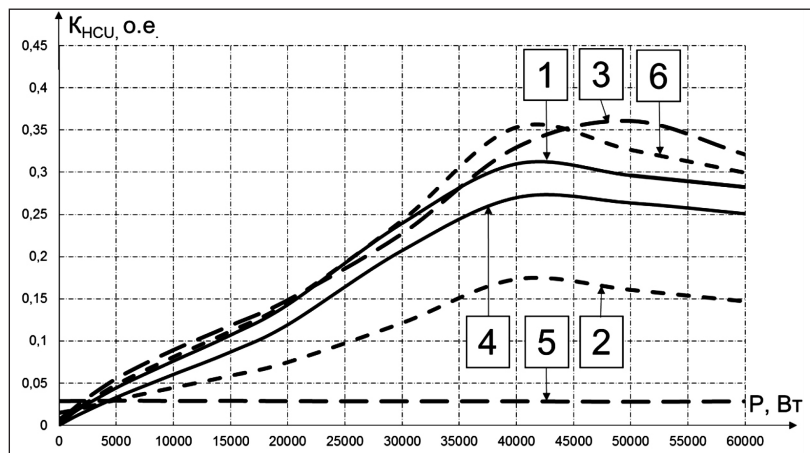


Рис. 8. График влияния мощности нелинейной нагрузки на коэффициент нелинейных искажений:
а — при изменении мощности нелинейной нагрузки $NLoad2$; б — при изменении мощности нелинейной нагрузки $NLoad1$; 1 — на выходе КН без использования коррекции напряжения;
2 — на выходе КН с коррекцией напряжения в зависимости от напряжений на входе ВДТ;
3 — на выходе КН с коррекцией напряжения в зависимости от напряжений на выходе ВДТ;
4 — на входе КН без использования коррекции напряжения;
5 — на входе КН с коррекцией напряжения в зависимости от напряжений на входе ВДТ;
6 — на входе КН с коррекцией напряжения в зависимости от напряжений на выходе ВДТ

Анализ графиков показывает, что наибольшая эффективность по уменьшению гармонических искажений достигается при подаче на вход системы управления КН напряжений со стороны источника гармонических искажения, при этом наилучшие показатели (около 3 %) КН показывает при возникновении гармоник со стороны входа ВДТ (см. рис. 8, б, характеристика 5). Во всех случаях наблюдается уменьшение коэффициента гармонических искажения на выходе КН и увеличение данного коэффициента на стороне генератора. Степень уменьшения гармонических ис-

кажений в основном зависит от мощности нелинейной нагрузки, точности задания эталонного напряжения в блоке памяти и задержки формирования напряжения вольтодобавки.

Исследовано влияние изменения мощности однофазной нагрузки *Load3* (мощность нагрузок *Load4*, *Load5* принималась равной 6 кВт в случае активной нагрузки, 3 кВт при активной составляющей и 3 кВ·А при реактивной составляющей в случаях активно-индуктивного и активно-емкостного характера нагрузки) на величину изменения коэффициентов несимметрии по нулевой K_{0U} - и обратной K_{2U} -последовательности (рис. 9).

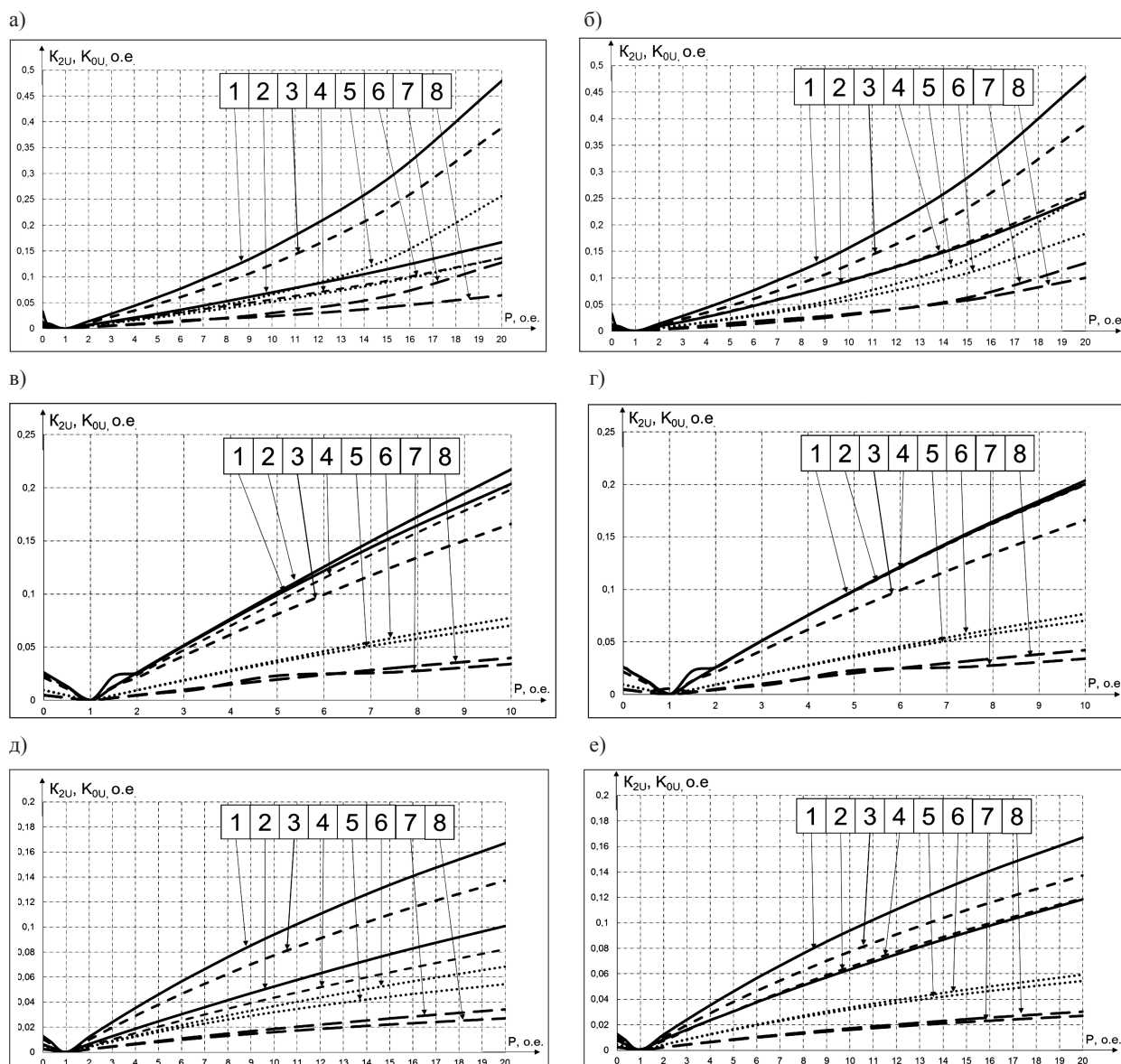


Рис. 9. Графики изменения коэффициентов несимметрии по нулевой и обратной последовательности в зависимости от относительной мощности нагрузок одной фазы: а, б — при изменении мощности емкостной составляющей нагрузки в зависимости от напряжений с входа и выхода КН соответственно; в, г — при изменении мощности активной составляющей нагрузки в зависимости от напряжений с входа и выхода КН соответственно; д, е — при изменении мощности индуктивной составляющей нагрузки в зависимости от напряжений с входа и выхода КН соответственно

Условные обозначения:

- 1 — коэффициент K_{0U} на выходе КН без коррекции напряжения; 2 — коэффициент K_{0U} на выходе КН с коррекцией напряжения; 3 — коэффициент K_{2U} на выходе КН без коррекции напряжения; 4 — коэффициент K_{2U} на выходе КН с коррекцией напряжения; 5 — коэффициент K_{0U} на входе КН без коррекции напряжения; 6 — коэффициент K_{0U} на входе КН с коррекцией напряжения; 7 — коэффициент K_{2U} на входе КН без коррекции напряжения; 8 — коэффициент K_{2U} на входе КН с коррекцией напряжения

Характеристики, полученные на имитационной модели корректора напряжения, позволяют выполнить качественный анализ работы КН при различном характере несимметричной нагрузки и типе управления КН.

Из рис. 9, а, б, д, е видно, что при емкостном и индуктивном характере нагрузки коэффициенты K_{0U} и K_{2U} уменьшаются на входе и выходе КН при увеличении мощности нагрузки одной из фаз. Использование напряжений с выхода КН в качестве входных для системы управления КН позволяет значительно снизить коэффициенты несимметрии по нулевой и обратной последовательности.

При работе КН на активную нагрузку (см. рис. 9, в, з) наблюдается негативное влияние на качество электрической энергии, в результате чего происходит увеличение коэффициентов несимметрии по нулевой и обратной последовательности как со стороны выхода ВДТ, так и со стороны генератора.

Анализ графиков показывает, что режим стабилизации фазных напряжений обеспечивает снижение коэффициента небаланса фазных напряжений и несимметрии нулевой последовательности в случае активно-реактивного характера несимметричной нагрузки. Наибольшая эффективность КН достигается при подаче напряжений выходных напряжений КН на вход его системы управления, однако такой способ не позволяет в должной мере устранить гармонические искажения, вызванные нелинейными потребителями электрической энергии со стороны генератора. С другой стороны, использование фазных напряжений со стороны генератора в качестве входных для корректора напряжения позволяет приблизить форму кривой напряжения на выходе КН к эталонной в случае гармонических искажений со стороны входа КН, которая ограничивается только формой задания эталонного напряжения и задержкой входного сигнала в системе управления.

Выводы (Conclusion)

В результате проведения эксперимента можно сделать следующие выводы:

1. Технический результат предлагаемого корректора напряжения заключается в расширении функциональных возможностей системы управления вольтодобавочным трансформатором, в результате чего работа КН в составе судовой электроэнергетической системы позволяет снизить гармонические искажения и небаланс фазных напряжений. При этом уровень качества напряжения с выхода вольтодобавочного трансформатора в основном определяется формой задания эталонного напряжения в блоке памяти устройства.

2. Анализ данных показывает, что наибольшая эффективность по уменьшению гармонических искажений предложенного устройства достигается в случае, когда источник гармонических искажений в цепи генератора располагается перед корректором в случае, когда на вход системы управления КН подается напряжение с шин генератора.

3. При несимметрии реактивной мощности потребителей электрической энергии данное устройство позволяет существенно снизить величину небаланса напряжений по обратной и нулевой последовательности в случае, когда данные потребители располагаются после корректора напряжения при коррекции напряжения в зависимости от напряжения с шин несимметричной нагрузки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Fuchs E. Power Quality in Power Systems and Electrical Machines / E. Fuchs, M. A. S. Masoum. — Second edition. — Academic Press, 2015. — 1140 p. DOI: 10.1016/B978-0-12-800782-2.09989-9.*
2. *Абдиева З. Э. Экспериментальное исследование несимметрии трехфазной системы напряжений / З. Э. Абдиева, Б. И. Сариев, Р. Б. Куржумбаева, Х. Т. Касмамбетов // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. — 2018. — № 2. — С. 93–100. DOI: 10.22281/2413-9920-2018-04-02-218-225.*
3. *Виноградов А. А. Анализ влияния непропорционального распределения нагрузки между параллельно работающими генераторами на коэффициент мощности нагрузки каждого генератора / А. А. Вино-*

градов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 2. — С. 411–419. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-2-411-419.

4. Ольховский В. Я. Исследование воздействия высших гармоник мелких нелинейных потребителей на работу сети до 1000 В / В. Я. Ольховский, Т. В. Мятёж, С. Ю. Наяксов // Доклады академии наук высшей школы Российской Федерации. — 2016. — № 1 (30). — С. 84–97. DOI: 10.17212/1727-2769-2016-1-84-97.

5. Родимов Н. В. Анализ систем повышения качества электрической энергии при активной фильтрации гармонических искажений сети / Н. В. Родимов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 2 (30). — С. 198–207. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-2-198-207.

6. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. — М.: Стандартинформ, 2014. — 6 с.

7. Правила Российского Речного Регистра: в 5 т. — М.: Российский речной регистр, 2017. — Т. 2: Правила классификации и постройки судов (ПКПС). — 1885 с.

8. Правила классификации и постройки морских судов Российского морского регистра судоходства. Ч. XI: Электрическое оборудование. — СПб: Российский морской регистр судоходства, 2018. — 131 с.

9. Сугаков В. Г. Внешняя форсировка систем возбуждения судовых синхронных генераторов / В. Г. Сугаков [и др.] // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2015. — № 3. — С. 103–111.

10. Сугаков В. Г. Компенсация небаланса фазных напряжений / В. Г. Сугаков, О. С. Хватов, Ю. С. Малышев, А. А. Тощев // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. — 2015. — № 2. — С. 30–34. DOI: 10.17588/2072-2672.2015.2.030.034.

11. Старостина Я. К. Построение ряда энергосберегающих асинхронных электроприводов на основе унифицированного трансформаторно-транзисторного модуля / Я. К. Старостина, С. Н. Сидоров // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. — 2017. — Т. 17. — № 2. — С. 67–74. DOI: 10.14529/power170209.

12. Коробко Г. И. Моделирование устройства компенсации нелинейных искажений напряжения судовой электроэнергетической системы / Г. И. Коробко, В. В. Лебедев // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. — 2014. — № 2. — С. 45–49.

13. Мещеряков В. Н. Устройство компенсации гармонических искажений тока в системах с тиристорным преобразователем напряжения / В. Н. Мещеряков, А. М. Евсеев // Электротехнические системы и комплексы. — 2017. — № 3 (36). — С. 4–10. DOI: 10.18503/2311-8318-2017-3(36)-4-10.

14. Мещеряков В. Н. Исследование активного фильтро-компенсирующего устройства с общим звеном постоянного тока / В. Н. Мещеряков, М. М. Хабибуллин, И. С. Павлов // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. — 2016. — № 1. — С. 44–51. DOI: 10.17588/2072-2672.2016.1.044-051.

15. Пат. 2612055, Российская Федерация, МПК H02P 9/14. Корректор напряжения / В. Г. Сугаков, Ю. С. Малышев, О. С. Хватов, Н. С. Варламов, И. И. Ягжов; заяв. и патентообл. ФГБОУ ВО «Волжский государственный университет водного транспорта». — № 2631862; Заявлено 27.10.2016; Опубл. 27.09.2017; бюл. № 27. — 10 с.

REFERENCES

1. Fuchs, Ewald, and Mohammad AS Masoum. *Power Quality in Power Systems and Electrical Machines*. Second edition. Academic Press, 2015. DOI: 10.1016/B978-0-12-800782-2.09989-9.

2. Abdieva, Z. E., B. I. Sariev, R.B. Kurzhumbaeva, and K. T. Kasmambetov. “Experimental study of the asymmetry of a three-phase stress system.” *Scientific and Technical Journal of Bryansk State University* 2 (2018): 93–100. DOI: 10.22281/2413-9920-2018-04-02-218-225.

3. Vinogradov, Andrey A. “Analysis of influence of non-proportional distribution of load between parallelly operating generators for the power factor of loading of each generator.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 10.2 (2018): 411–419. DOI: 10.21821/2309-5180- 2018-10-2-411-419.

4. Olhovskiy, V. Y., T. V. Myateg, and S. Y. Nayaksov. “Predictions of Circuit High Harmonics Values Increase in the Networks of up to 1000 V.” *Proceedings of the Russian Higher School Academy of Sciences* 1(30) (2016): 84–97. DOI: 10.17212/1727-2769-2016-1-84-97.

5. Rodimov, N.V. "Analysis of improving the quality of electrical energy at active filtering of harmonic distortion of network." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S.O. Makarova* 2(30) (2015): 198–207. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-2-198-207.
6. Russian Federation. State Standard GOST 32144-2013. Electric energy. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Power quality limits in the public power supply systems. M.: Standartinform, 2014.
7. *Pravila Rossiiskogo Rechnogo Registra: v 5 t. Vol. 2. Pravila klassifikatsii i postroiki sudov (PKPS)*. M.: Rossiiskii rechnoi registr, 2017.
8. *Pravila klassifikatsii i postroiki morskikh sudov Rossiiskogo morskogo registra sudokhodstva. Chast' XI. Elektricheskoe oborudovanie*. SPb: Rossiiskii morskoi registr sudokhodstva, 2018.
9. Sugakov, Valeriy Gennadyevich, Oleg Stanislavovich Khvatov, Yuriy Sergeevich Malyshev, Alexander Aleksandrovich Toshchev, and Ivan Vyacheslavovich Sychushkin. "External boost of excitation systems of marine synchronous generators." *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies* 3 (2015): 103–111.
10. Sugakov, V. G., O. S. Khvatov, Y. S. Malyshev, and A. A. Toshchev. "Compensation of phase voltage unbalance." *Vestnik IGEU* 2 (2015): 30–34. DOI: 10.17588/2072-2672..2.030-034.
11. Starostina, Ya. K., and S. N. Sidorov. "Construction of a number of energy saving asynchronous electric drives based on unified transformer-transistor module." *Bulletin of South Ural State University. Series "Power Engineering"* 17.2 (2017): 67–74. DOI: 10.14529/power170209.
12. Korobko, G. I., and V. V. Lebedev. "Simulating of a nonlinear voltage distortion compensation device of a ship electric power system." *Vestnik IGEU* 2 (2014): 45–49.
13. Meshcheryakov, Victor N., and Alexei M. Evseev. "Device For Compensation of Harmonic Distortion of Currents in Systems with a Thyristor Voltage Converter." *Electrotechnical Systems and Complexes* 3(36) (2017): 4–10. DOI: 10.18503/2311-8318-2017-3(36)-4-10.
14. Meshcheryakov, V. N., M. M. Khabibullin, and I. S. Pavlov. "A study of the active filter-compensation device with a common DC link." *Vestnik IGEU* 1 (2016): 44–51. DOI: 10.17588/2072-2672.2016.1.044-051.
15. Sugakov, V. G., Yu. S. Malyshev, O. S. Khvatov, N. S. Varlamov, and I. I. Yagzhov. RU 2612055, IPC H 02 P 9/14. Korrektor napryazheniya. Russian Federation, assignee. Publ. 27 Sept. 2017.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Сугаков Валерий Геннадьевич — доктор технических наук, профессор
 ФГБОУ ВО «Волжский государственный университет водного транспорта»
 603951, Российская Федерация, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5
 e-mail: elektrikasp@mail.ru, electrotech@vgavt-nn.ru
Варламов Никита Сергеевич — аспирант
Научный руководитель:
 Сугаков Валерий Геннадьевич
 ФГБОУ ВО «Волжский государственный университет водного транспорта»
 603951, Российская Федерация, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5
 e-mail: varlamov_nikita@mail.ru
Малышев Юрий Сергеевич — кандидат технических наук, доцент
 ФГБОУ ВО «Волжский государственный университет водного транспорта»
 603951, Российская Федерация, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5
 e-mail: elektrikasp@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Sugakov, Valerij G. — Dr. of Technical Sciences, professor
 Volga State University of Water Transport
 5 Nesterova Str., Nizhny Novgorod, 603951, Russian Federation
 e-mail: elektrikasp@mail.ru, electrotech@vgavt-nn.ru
Varlamov, Nikita S. — Postgraduate
Supervisor:
 Sugakov, Valerij G.
 Volga State University of Water Transport
 5 Nesterova Str., Nizhny Novgorod, 603951, Russian Federation
 e-mail: varlamov_nikita@mail.ru
Malyshev, Yuriy S. — PhD, associate professor
 Volga State University of Water Transport
 5 Nesterova Str., Nizhny Novgorod, 603951, Russian Federation
 e-mail: elektrikasp@mail.ru

Статья поступила в редакцию 11 декабря 2018 г.
 Received: December 11, 2018.