

УДК 621.316.722.1

Компенсация небаланса фазных напряжений

В.Г. Сугаков, О.С.Хватов, Ю.С. Малышев, А.А. Тощев
ФГБОУВО «Волжский государственный университет водного транспорта»,
г. Нижний Новгород, Российская Федерация
E-mail: electrotech@vgavt-nn.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса: На данный момент для устранения возможности появления небаланса фазных напряжений (токов) иногда применяются системы, которые не позволяют сохранять удовлетворительным коэффициент небаланса фазных напряжений при работе на несимметричную нагрузку. Проводимые ранее исследования привели к выявлению отрицательных факторов, воздействующих как на источник, так и на потребителей электрической энергии. Однако научных изысканий по разработке устройств анализа и коррекции небаланса фазных напряжений при использовании автономных источников ограниченной мощности практически не проводилось. В связи с этим актуальным является разработка способов и устройств компенсации небаланса фазных напряжений.

Материалы и методы: Исследования и разработка устройства компенсации небаланса фазных напряжений основаны на анализе статистических данных изменения параметров электроэнергии с применением метода аналитического синтеза.

Результаты: Разработано устройство оценки и коррекции небаланса фазных напряжений, содержащее измерители амплитуды и вариаторы в каждой фазе источника питания. Установлено, что использование этого устройства приводит к снижению возможности появления напряжений и токов обратной и нулевой последовательности, перегрузки одной из фаз генератора, перегрева генератора и способствует повышению качества электрической энергии в целом.

Выводы: Предложенное устройство может быть использовано в трехфазных системах с питанием от автономного источника ограниченной мощности в целях оценки и компенсации небаланса фазных напряжений.

Ключевые слова: небаланс напряжений, качество электрической энергии, система регулирования возбуждения, компенсация небаланса напряжений, линейный стабилизатор напряжения.

Compensation of phase voltage unbalance

V.G. Sugakov, O.S. Khvatov, Y.S. Malyshev, A.A. Toshchev
Volga State University Of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russian Federation
E-mail: electrotech@vgavt-nn.ru

Abstract

Background: At the moment, phase voltages (currents) unbalance is sometimes prevented by using systems that cannot maintain a satisfactory phase voltage unbalance rate under unbalanced load. Prior studies identified negative factors affecting both the electricity source and the consumers. However, there is still little information about the problem of developing devices for monitoring and correction of phase voltage unbalance in independent limited power sources. Therefore, it is important to develop methods and apparatuses for compensation of phase voltage unbalance.

Materials and methods: The study is based on the analysis of statistical data about the changes in power supply parameters and development of a device for phase voltage unbalance compensation by the analytical synthesis method.

Results: We have developed a device for evaluation and correction of phase voltage unbalance containing amplitude measuring instruments and variators in each phase of the power source. It was established that this device reduces the possibility of reverse and zero sequence voltages and currents, overload of one of the generator phases, generator overheating, and improves the quality of electricity in general.

Conclusions: The developed device can be used in three-phase systems powered by an independent source of limited power for phase voltage unbalance evaluation and compensation.

Key words: voltage, voltage unbalance, electric power quality, excitation regulation system, voltage unbalance compensation, linear voltage regulator.

DOI: 10.17588/2072-2672.2015.2.030-034

Согласно ГОСТ 23875-88 «Качество электрической энергии. Термины и определения»¹, небаланс напряжений (токов) – это от-

личие по модулю значения хотя бы одного из фазных или линейных напряжений (токов) многофазной системы электроснабжения от значений напряжений (токов) других фаз.

Под небалансом фазных (линейных) напряжений понимается неравенство фазных (линейных) напряжений в трехфазной системе, а также искажение симметрии напряже-

¹ ГОСТ 23875–88. Взамен ГОСТ 23875–79. Качество электрической энергии. Термины и определения; введ. 01.07.89. – М.: Изд-во стандартов, 1988. – 15 с.

ний трехфазной системы. Причиной искажения симметрии трехфазной системы может служить асимметрия самого источника, а также несимметричное подключение потребителей электрической энергии по фазам, которое не отслеживают большинство современных систем автоматического регулирования напряжений [1].

Несимметричность трехфазной системы приводит к появлению факторов, негативно влияющих как на сам источник электрической энергии, так и на работу потребителей. К таким негативным факторам можно отнести появление напряжений и токов обратной и нулевой последовательности, перевозбуждение генератора, перегрузку одной из фаз генератора, снижение качества электрической энергии [2].

Появление напряжений и токов обратной и нулевой последовательности приводит к дополнительным потерям мощности и энергии, а также к потерям напряжения в сети [3], кроме того, отрицательно сказывается на рабочих и технико-экономических характеристиках вращающихся электрических машин. Ток прямой последовательности в статоре создает магнитное поле, вращающееся с синхронной частотой в направлении вращения ротора [4]. Токи обратной последовательности в статоре создают магнитное поле, вращающееся относительно ротора в направлении, противоположном вращению, и создают тормозной фактор, отрицательно влияющий на работу источника электрической энергии. Кроме того, токи обратной последовательности снижают КПД двигателя [5]. В асинхронных двигателях возникают дополнительные потери в статоре. В синхронных машинах, кроме дополнительных потерь и нагрева статора и ротора, могут начаться опасные вибрации. Кроме того, сокращается срок службы изоляции трансформаторов, синхронные двигатели и батареи конденсаторов уменьшают выработку реактивной мощности [6].

На данный момент для устранения возможности появления небаланса фазных напряжений (токов) иногда применяются системы регулирования возбуждения синхронных генераторов [7], но использование подобных устройств не позволяет сохранять удовлетворительным коэффициент небаланса фазных напряжений при работе на несимметричную нагрузку, поскольку регулирование возбуждения производится для генератора в целом, а не для отдельных фаз².

Также для коррекции небаланса могут применяться линейные стабилизаторы напряжений. Преимуществами линейного стабилизатора являются простота, отсутствие помех и небольшое количество используемых деталей, что увеличивает надежность и срок службы элемента. Однако недостатком линейных стабилизаторов является их низкий КПД. Причем чем меньше выходное напряжение источника питания, тем меньше становится его КПД [8].

Для снижения небаланса фазных напряжений при работе на переменную неоднородную несимметричную нагрузку предлагается устанавливать устройство коррекции небаланса фазных напряжений, которое представлено на рис. 1.

Принцип работы данного устройства следующий. В задающем регистре 6 устанавливается код, обеспечивающий среднюю по величине проводимость вариаторов 4-1, 4-2 и 4-3.

При подаче сигнала на шину 8 этот код заносится в счетчики вариаторов 4-1, 4-2 и 4-3. Системе регулирования возбуждения 2 задается уровень регулирования, обеспечивающий номинальное напряжение на нагрузке при симметричной нагрузке. При появлении на нагрузке 3 напряжения u оно поступает в измерители 5-1, 5-2 и 5-3 амплитуд фазных напряжений. На выходе измерителей 5-1, 5-2 и 5-3 устанавливаются и постоянно обновляются коды А, В и С амплитуды напряжения соответственно первой, второй и третьей фазы. С выхода измерителей 5-1, 5-2 и 5-3 коды А, В и С поступают на входы числовых компараторов из блока коррекции небаланса напряжений 7.

На рис. 2 показаны эпюры сигналов на основных элементах схемы. Если, например, к моменту времени t_0 возникает разбалансировка фазных напряжений, то в момент времени t_0 формируется код А амплитуды напряжения первой фазы. Через треть периода $T/3$ в момент времени t_1 формируется код В амплитуды напряжения второй фазы, еще через треть периода в момент времени t_2 – код С амплитуды напряжения третьей фазы. Если, например, имеет место соотношение $A > C > B$, то к моменту времени t_3 появится сигнал на первом выходе числового компаратора блока 7. Сигнал с выхода блока 7 поступает на второй вход вариатора 4-1. В момент времени t_3 , когда завершается формирование очередного кода А, появляется импульс на выходе измерителя 5-1, который через открытый электронный ключ поступает на четвертый вход вариатора 4-1 и далее на вход измерителя амплитуды 5-1. Снижение проводимости вариатора 4-1 вызывает увеличение его сопротивления и падения напряжения Δu на нем, при этом на ступень снижается напряжение $u = u_0 - \Delta u$ первой фазы нагрузки, амплитуда которого максимальна.

² ГОСТ Р ИСО 8528-1–2005. Электроагрегаты генераторные переменного тока с приводом от двигателя внутреннего сгорания. Ч. 1. Применение, технические характеристики и параметры. – М.: Изд-во стандартов, 2006. – 13 с.; ГОСТ Р 50783-95. Электроагрегаты и передвижные электростанции дизельные. Общие технические условия. – М.: Изд-во стандартов, 1995. – 20 с.

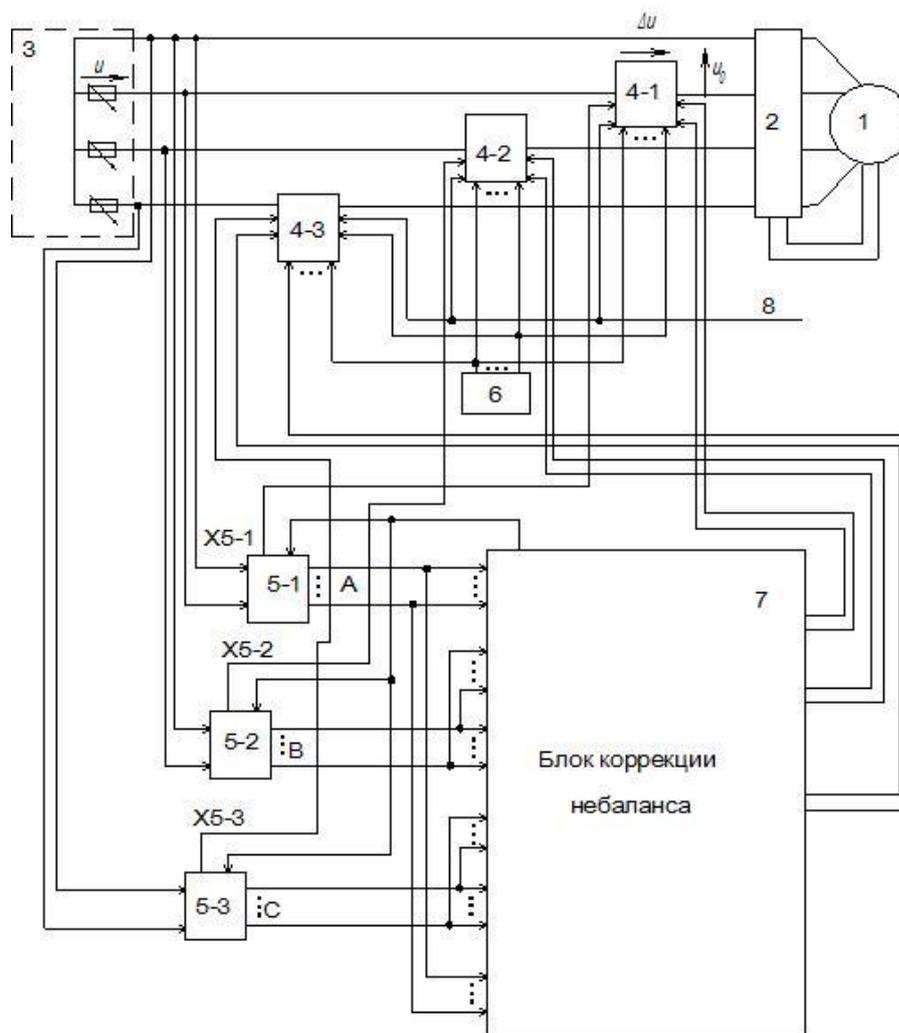


Рис. 1. Схема устройства коррекции небаланса фазных напряжений (токов): 1 – трехфазный генератор переменного тока; 2 – система автоматического регулирования возбуждения; 3 – нагрузка; 4-1, 4-2 и 4-3 – вариаторы; 5-1, 5-2 и 5-3 – измерители амплитуды; 6 – задающий регистр; 7 – блок коррекции небаланса напряжений; 8 – шина ПУСК

К моменту времени t_4 присутствует сигнал на третьем выходе компаратора в блоке 7. С его выхода подается сигнал на первый вход вариатора 4-2. В момент времени t_4 , когда в измерителе 5-2 завершается формирование кода В амплитуды второй фазы, появляется импульс на выходе X5-1, который поступает на четвертый вход вариатора 4-2. Проводимость вариатора 4-2 возрастает на одну ступень, падение напряжения на нем уменьшается. Напряжение второй фазы нагрузки, амплитуда которого минимальна, возрастает на ступень.

Если за счет однократной коррекции напряжения первой и второй фазы баланс не наступает, то продолжается, как описано выше, сближение уровней напряжений путем ступенчатого снижения напряжения первой фазы в моменты времени t_5, t_7, t_9 и увеличения напряжения второй фазы в моменты времени t_6 и t_8 .

К моменту времени t_{10} складывается соотношение кодов амплитуд напряжений фаз $A>B=C$. Далее проходит сигнал на первый вход вариатора 4-2, что вызывает увеличение на ступень напряжения второй фазы и приводит к соотношению кодов $A>B>C$. Поэтому к момен-

ту времени t_{11} подается сигнал на первый вход вариатора 4-3, в момент времени t_{11} с приходом с выхода измерителя 5-3 импульса X5-3 – на четвертый вход вариатора 4-3. При этом возрастает проводимость вариатора 4-3, а сопротивление его и падение напряжения Δu на нем уменьшаются. Напряжение $u = u_0 - \Delta u$ третьей фазы нагрузки возрастает на ступень вместе с кодом C, что приводит к соотношению кодов $A>B=C$. К моменту времени t_{12} проходит сигнал на второй вход вариатора 4-1. В момент времени t_{12} на четвертый вход вариатора 4-1 приходит сигнал X5-1 с выхода измерителя 5-1, что вызывает очередное снижение напряжения первой фазы нагрузки.

В момент времени t_{13} происходит увеличение на ступень напряжения второй фазы нагрузки, как в момент времени t_{10} , в момент времени t_{13} – увеличение на ступень напряжения третьей фазы нагрузки, как в момент времени t_{14} , а в момент времени t_{15} – уменьшение на ступень напряжения первой фазы нагрузки, как в момент времени t_{12} . При этом в момент времени t_{15} наступает баланс фазных напряжений нагрузки и равенство кодов $A=B=C$.

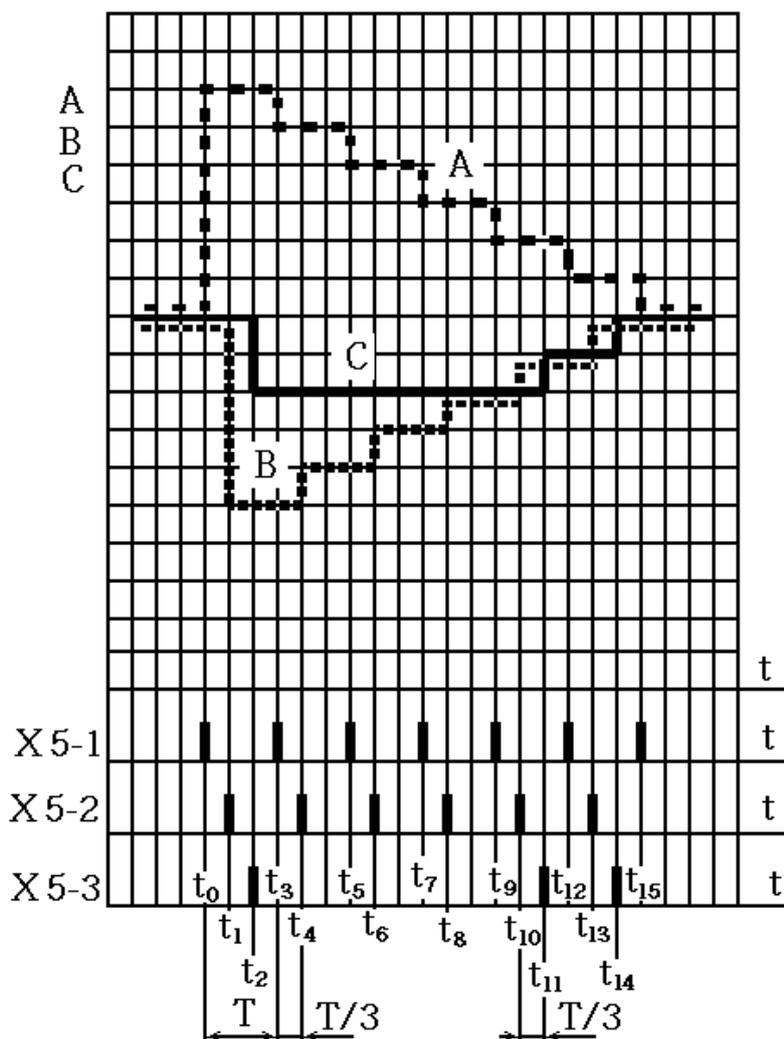


Рис. 2. Эпюры сигналов на основных элементах схемы устройства коррекции небаланса фазных напряжений (токов)

Одновременно закрываются блокирующие ключи измерителей 5-1, 5-2 и 5-3, что исключает изменение параметров вариаторов 4-1, 4-2 и 4-3 и флуктуацию фазных напряжений в условиях их фактического баланса. При возникновении небаланса фазных напряжений при других соотношениях кодов А, В и С схема работает аналогично описанному выше.

Во всех случаях происходит последовательное ступенчатое уменьшение наибольшего из фазных напряжений и увеличение наименьшего из напряжений до наступления баланса на уровне среднего значения.

Точность обеспечения баланса напряжений определяется шагом квантования АЦП блоков 5-1, 5-2, 5-3 и разрядностью элементов схемы. Так, при $N = 10$ погрешность и коэффициент небаланса не превышают 0,1 %. В то время как при использовании линейных стабилизаторов напряжения точность стабилизации напряжения составляет лишь от 2 до 4 %.

Таким образом, применение устройства коррекции небаланса фазных напряжений приводит к снижению возможности появления напряжений и токов обратной и нулевой после-

довательности, перегрузки одной из фаз генератора, перегрева генератора и способствует повышению качества электрической энергии в целом. Кроме того, применение данного устройства приводит к увеличению срока службы, надежности и стабильности работы источника электроэнергии.

Список литературы

1. **Повышение** качества электроэнергии в судовых электроэнергетических системах с использованием вольтодобавочных устройств / Г.И. Коробко, С.В. Попов, В.В. Лебедев, А.С. Макаев: Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева. – Н. Новгород, 2012. – №1 (94). – 366 с.
2. **Коробко Г.И., Лебедев В.В.** Влияние высших гармоник на работу судового электрооборудования и способы их снижения // Труды XIV междунар. науч.-промышленного форума «Великие реки»: материалы науч.-метод. конф. профессорско-преподавательского состава, аспирантов, специалистов и студентов «Проблемы использования и инновационного развития внутренних водных путей в бассейнах великих рек». Т. 2. – Н. Новгород: Изд-во ФБОУВПО «ВГАВТ», 2012. – 382 с.
3. **Магазинник Л.Т., Егорова Н.Ю.** Оценка величины дополнительных потерь мощности, обусловленных несимметрией токов // Современные наукоемкие технологии. – 2006. – № 4 – С. 44–45;

4. Полянский В.Ф., Попов А.В. Электрооборудование судов и предприятий: учеб. для вузов. – М.: Транспорт, 1989. – С. 233–236.

5. Чивенков А.И., Алтунин Б.Ю. Математическая модель тиристорного контактора с пофазным регулированием преобразовательных трансформаторов // Проблемы преобразовательной техники: тез. докл. V Всесоюз. науч.-техн. конф. / Институт Электродинамики АН УССР. – Киев, 1991. – Ч. 1V. – С. 151–154.

6. А. с. 964850. Устройство для симметрирования напряжения и компенсации реактивной мощности в трехфазной сети Б.И. / И.М. Туманов, В.Г. Рогоцкий, А.Н. Левин, А.И. Чивенков. – 1982. – № 37.

7. Пат. 2523005 Российская Федерация, МПК Н 02 Р9/14. Система возбуждения синхронного генератора с управляемой внешней форсировкой / В.Г. Сугаков, О.С. Хватов, Ю.С. Малышев, А.А. Тоцев. – № 2013108756/07; заявл. 27.02.2013; опубл. 20.07.2014, Бюл. № 20.

8. Сугаков В.Г., Хватов О.С. Системы автоматического регулирования параметров электрической энергии судовых электростанций. Ч. 2. Автоматическое регулирование напряжения судовых источников электрической энергии: учеб. пособие. – Н. Новгород: Изд-во ФГОУВПО «ВГАВТ», 2011. – С. 47–57.

References

1. Korobko, G.I., Popov, S.V., Lebedev, V.V., Ma-kaev, A.S. Povyshenie kachestva elektroenergii v sudovykh elektroenergeticheskikh sistemakh s ispol'zovaniem vol'todobavochnykh ustroystv [Improving of power quality in ship power systems by using voltage boosters]. *Trudy Nizhegorodskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. R.E. Alekseeva* [Collected works of Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev]. Nizhny Novgorod, 2012, no. 1 (94). 366 p.

2. Korobko, G.I., Lebedev, V.V. Vliyaniye vysshikh garmonik na rabotu sudovogo elektrooborudovaniya i sposoby ikh snizheniya [Influence of higher harmonics on ship electrical equipment operation and methods of their reduction]. *Trudy XIV mezhdunarodnogo nauchno-promyshlennogo foruma «Velikie reki»: materialy nauchno-metodicheskoy konferentsii professorsko-prepodavatel'skogo sostava, aspirantov, spetsialistov i studentov «Problemy ispol'zovaniya i innovatsionnogo razvitiya vnutrennikh vodnykh putey v basseynakh velikikh rek»* [Proceedings of the XIV International scientific-industrial forum «Great Rivers»: proceedings of the

scientific and methodological conference of the teaching staff, post-graduate, graduate and undergraduate students «Problems of use and innovative development of inland waterways in the basins of the great rivers»]. Nizhny Novgorod, Izdatel'stvo FBOUVO «VGAVT», 2012. 382 p.

3. Magazinnik, L.T., Egorova, N.Yu. Otsenka velichiny dopolnitel'nykh poter' moshchnosti, obuslovlennykh nesimmetriey tokov [An estimate of additional power loss due to current unbalance]. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii*, 2006, no. 4, pp. 44–45.

4. Polyanskiy, V.F., Popov, A.V. *Elektrooborudovaniye sudov i predpriyatiy* [Electrical equipment of ships and enterprises]. Moscow, Transport, 1989, pp. 233–236.

5. Chivenkov, A.I., Altunin, B.Yu. Matematicheskaya model' tiristor'nogo kontaktora s pofaznym regulirovaniem preobrazovatel'nykh transformatorov [A mathematical model of thyristor contactor with converter transformer segregated phase control]. *Tezisy dokladov V Vsesoyuznoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Problemy preobrazovatel'noy tekhniki»* [Abstracts of the V All-Union conference on science and technology «Problems of converter equipment»]. Kiev, 1991, part 1V, pp. 151–154.

6. Tumanov, I.M., Rogatskiy, V.G., Levin, A.N., Chivenkov, A.I. *Ustroystvo dlya simmetrirovaniya napryazheniya i kompensatsii reaktivnoy moshchnosti v trekhfaznoy seti* [A device for voltage balancing and reactive power compensation in three-phase networks]. *Avtorskoe svidetel'stvo*, no. 964850, 1982.

7. Sugakov, V.G., Khvatov, O.S., Malyshev, Yu.S., Toshchev, A.A. *Sistema vzbuzhdeniya sinkhronnogo generatora s upravlyayemoy vneshney forsirovkoy* [Excitation system of a synchronous generator with external controlled forcing]. Patent RF, no. 2523005, 2014.

8. Sugakov, V.G., Khvatov, O.S. *Sistemy avtomaticheskogo regulirovaniya parametrov elektricheskoy energii sudovykh elektrostantsiy. Ch. 2. Avtomaticheskoe regulirovaniye napryazheniya sudovykh istochnikov elektricheskoy energii* [Automatic control systems of electric power parameters of marine power plants. Part 2. Automatic voltage regulation of ship electric power sources]. Nizhny Novgorod, Izdatel'stvo FGOUVO «VGAVT», 2011, pp. 47–57.

Сугаков Валерий Геннадьевич,

ФГБОУВО «Волжский государственный университет водного транспорта»,
доктор технических наук, профессор кафедры электротехники и электрооборудования водного транспорта,
телефон (831) 419-35-13.

Хватов Олег Станиславович

ФГБОУВО «Волжский государственный университет водного транспорта»,
доктор технических наук, профессор кафедры электротехники и электрооборудования водного транспорта,
телефон (831) 419-35-13.

Малышев Юрий Сергеевич

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

Тоцев Александр Александрович

ФГБОУВО «Волжский государственный университет водного транспорта»,
аспирант кафедры электротехники и электрооборудования водного транспорта,
телефон (831) 419-35-13.