

# СУДОВЫЕ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

DOI: 10.24143/2073-1574-2020-3-71-81  
УДК 621.313.3

## ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯ НА БАЗЕ ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ ПЕРЕМЕННОЙ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ И БУФЕРНОГО НАКОПИТЕЛЯ ЭНЕРГИИ

*О. С. Хватов, Д. С. Кобяков, М. Е. Юрлов*

*Волжский государственный университет водного транспорта,  
Нижний Новгород, Российская Федерация*

В состав дизель-генераторного комплекса входит минимум две дизель-генераторные установки. В целях экономии топлива одну из них целесообразно выбрать инверторного типа, т. е. перевести в режим переменной частоты вращения. Для обеспечения требуемых параметров генерируемой электроэнергии при подключении «пиковых» нагрузок, а также при работе генератора на пределе номинальной мощности в составе электростанции используется буферный накопитель энергии. Приведен алгоритм управления и рассматриваются переходные процессы заряда/разряда буферного накопителя энергии в дизель-генераторной электростанции. В качестве объекта исследования выбрана электростанция, состоящая из классического дизель-генератора и дизель-генераторной установки переменной частоты вращения, т. е. генератора «вентильного» типа. Предложена структурная схема управления данной электростанцией, а также силовая трансформаторная топология дизель-генераторной установки переменной частоты вращения на базе понижающего широтно-импульсного преобразователя. Представлен алгоритм управления подключением буферного накопителя энергии в зависимости от его заряда и величины мощности нагрузки как для автономного режима, так и для режима параллельной работы генераторных агрегатов. В компьютерной среде MatLab Simulink разработана имитационная модель электростанции и проведены исследования переходных процессов коммутации нагрузки, а также заряда/разряда буферного накопителя энергии. Проиллюстрирована принципиальная электрическая схема экспериментального стенда дизель-генераторной установки переменной частоты вращения. Представлены результаты экспериментальных исследований динамических режимов работы на опытном образце дизель-генераторной установки переменной частоты вращения мощностью 3,2 кВт.

**Ключевые слова:** дизель-генераторная электростанция, дизель-генераторная установка переменной частоты вращения, буферный накопитель энергии, моделирование динамических режимов, экспериментальный стенд.

**Для цитирования:** *Хватов О. С., Кобяков Д. С., Юрлов М. Е.* Электростанция на базе дизель-генераторной установки переменной частоты вращения и буферного накопителя энергии // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. 2020. № 3. С. 71–81. DOI: 10.24143/2073-1574-2020-3-71-81.

### **Введение**

В настоящее время дизель-генераторные электростанции наряду с мини-ТЭЦ составляют основу малой энергетики России [1, 2]. Они обеспечивают электроэнергией различные транспортные объекты, в том числе суда морского и речного флота, являются основой энергетического баланса на удаленных от центра России территориях, не присоединенных к централизованному электроснабжению.

В состав автономной дизельной электростанции, как правило, входит не менее двух дизель-генераторных установок (ДГУ), что повышает как энергоэффективность ее работы в режимах долевых нагрузок, так и надежность. Дальнейшее повышение энергоэффективности дизель-генераторных электростанций связано с разработкой дизель-генераторных установок переменной частоты вращения (ДГПЧВ) – электростанций с так называемыми «вентильными» генераторами, содержащими полупроводниковые преобразователи частоты, обеспечивающие стабилизацию параметров генерируемой ДГПЧВ электроэнергии при пониженных (энергоэффективных) частотах вращения дизеля на режимах долевой нагрузки [3–6].

### Применение буферных накопителей энергии в составе дизель-генераторной электростанции

К базовому оборудованию таких электростанций следует отнести буферные накопители энергии (БНЭ), аккумулирующие устройства (аккумуляторы, суперконденсаторы и др.), предназначенные для обеспечения электроэнергией потребителей в различных режимах нагрузки, в том числе при «пиковых» нагрузках на электростанцию.

Рассмотрим структуру электростанции с ДГПЧВ и БНЭ (рис. 1).

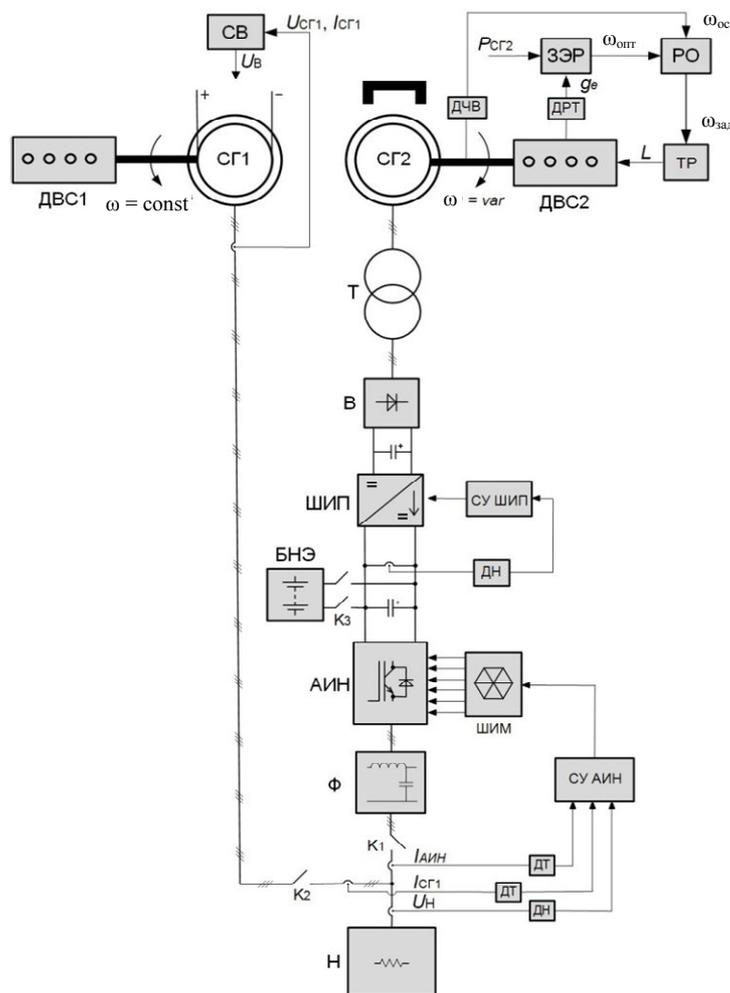


Рис. 1. Структурная схема электростанции с ДГПЧВ и БНЭ: СГ1, СГ2 – синхронный генератор; СВ – система возбуждения; ДВС1, ДВС2 – двигатель внутреннего сгорания; ЗЭР – задатчик экономичного режима; РО – регулятор оборотов; ДРТ – датчик расхода топлива; ДЧВ – датчик угловой частоты вращения; ТР – топливный регулятор; Т – повышающий трансформатор; В – выпрямитель; ШИП – понижающий широтно-импульсный преобразователь; АИН – автономный инвертор напряжения; Ф – синус-фильтр; Н – нагрузка; СУ ШИП – система управления ШИП; СУ АИН – система управления АИН; ШИМ – широтно-импульсная модуляция; ДН – датчик напряжения; ДТ – датчик тока; К1, К2, К3 – ключи силовые

Разработан алгоритм управления коммутацией БНЭ с учетом режима работы генераторных установок (автономная или параллельная работа), а также величины мощности долевой нагрузки на электростанцию.

Существуют различные топологии построения силовой схемы ДГПЧВ [7, 8]. В данной статье рассмотрен вариант силовой схемы ДГПЧВ на базе ШИП.

Мощность БНЭ определяется исходя из минимально допустимой мощности нагрузки на дизельный двигатель (ДВС). При нагрузках на ДВС менее 25 % от номинальной нагрузки существенно возрастает вероятность закоксовывания камеры сгорания ДВС, а также его коллектора и выхлопного трубопровода, что снижает безаварийность работы ДГУ и в дальнейшем при повторных запусках может привести к «хлопку» в выхлопной системе и выходу ДВС из строя. С учетом сказанного для обеспечения надежной работы электростанции в режимах малых нагрузок установленную мощность БНЭ следует выбирать на величину не менее 25 % от номинальной мощности дизеля.

Таким образом, применение БНЭ в составе дизель-генераторной электростанции позволяет повысить безаварийность работы в режимах малых нагрузок и одновременно с этим БНЭ обеспечивает работу электростанции в режимах «пиковых» нагрузок, а следовательно, снижает установленную мощность дизель-генераторного оборудования электростанции.

### Алгоритм работы автономной электростанции

На рис. 1 представлена структурная схема дизельной электростанции, состоящей из двух ДГУ и БНЭ, одна из установок работает в режиме переменной частоты вращения, т. е. является «вентильной» ДГПЧВ.

В зависимости от величины мощности нагрузки возможна различная комбинация генерирующего оборудования электростанции. Полагаем, что ДГУ и ДГПЧВ имеют одинаковую установленную мощность, равную одной условной единице (100 %). Мощность БНЭ в этом случае составляет 0,25 условных единиц (25 %) с учетом вышеприведенных условий безаварийной работы ДВС в режимах минимальных нагрузок. Номинальная мощность нагрузки, таким образом, равна двум условным единицам (200 %).

На рис. 2 представлена диаграмма, отражающая состав генераторного силового оборудования электростанции в зависимости от мощности подключенной нагрузки.

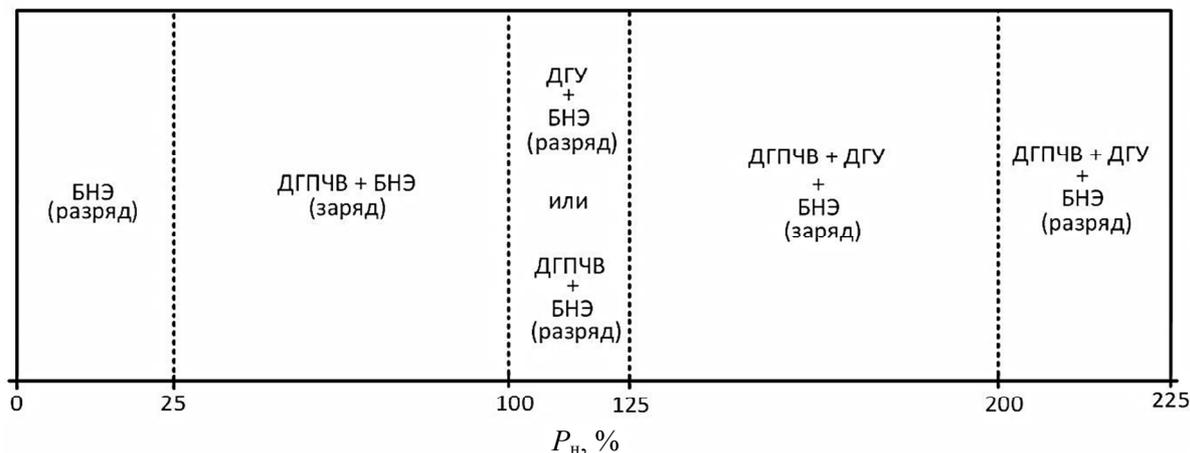


Рис. 2. Диаграмма состава электрооборудования электростанции

Алгоритм коммутации (подключение или отключения) силового электрооборудования, а также состояние силовых контактов К1, К2 и К3 в режимах автономной и параллельной работы генераторных установок с учетом мощности нагрузки представлен на рис. 3.

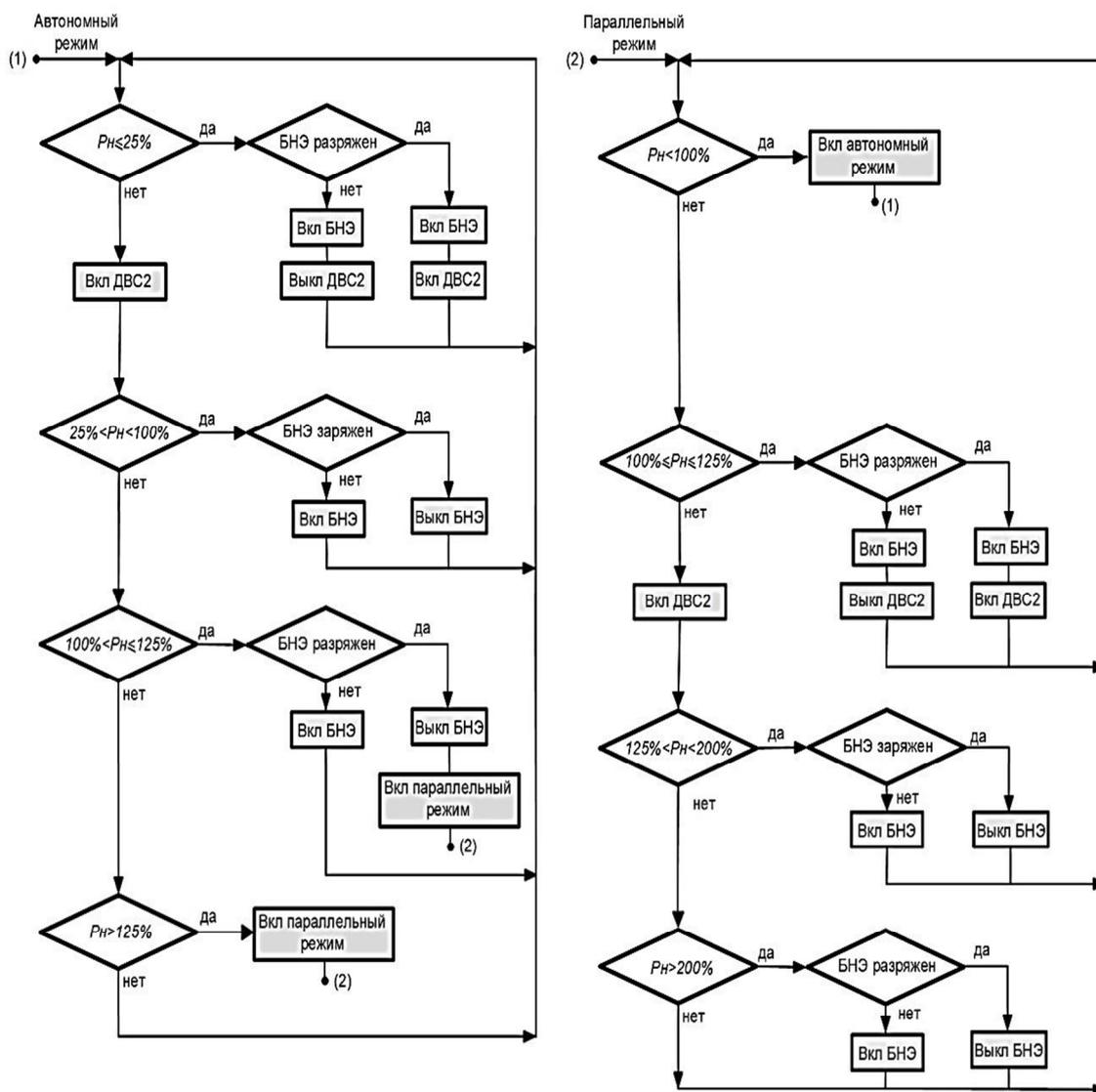


Рис. 3. Блок-схема управления электростанцией с ДГПЧВ и БНЭ

Приведенный алгоритм коммутации ДГУ, ДГПЧВ и БНЭ зависит от величины мощности нагрузки и степени заряда БНЭ. Например, при параллельной работе ДГУ с ДГПЧВ и разряженным БНЭ зарядка последнего осуществляется от ДГПЧВ. Согласно рис. 2 данный режим соответствует диапазону нагрузок от 1,25 (125 %) до 2 (200 %) условных единиц мощности. Диапазон нагрузок менее 0,25 (25 %) условных единиц мощности может быть обеспечен средствами только БНЭ. Если БНЭ разряжен, параллельно ему подключают ДГПЧВ, который одновременно обеспечивает электроэнергией как нагрузку, так и заряд БНЭ.

**Моделирование переходных процессов**

На основе разработанной в компьютерной среде MatLab Simulink имитационной модели электростанции с ДГПЧВ и БНЭ проведено моделирование динамических режимов коммутации нагрузки. В качестве модели дизельного ДВС выбран блок Generic engine. Параметры модели дизельного ДВС приведены в табл. 1.

Таблица 1

**Параметры дизельных ДВС1 и ДВС2**

| Мощность $P_{max}$ , кВт | Частота $n_{ном}$ , об/мин | Частота $n_{max}$ , об/мин | Частота $n_{хв}$ , об/мин | Удельное потребление топлива $g_{с2}$ , мг/об |
|--------------------------|----------------------------|----------------------------|---------------------------|---|
| 40                       | 1 500                      | 2 000                      | 400                       | 0,163   |

В качестве модели СГ1 выбран блок Synchronous machine pu standard, а в качестве модели СГ2 – блок Permanent magnet synchronous machine. Технические характеристики СГ1 и СГ2 приведены в табл. 2, 3 (некоторые параметры указаны в относительных единицах (о. е.)).

Таблица 2

Параметры СГ1

| Частота сети $f$ , Гц | Напряжение $U_{ном}$ , В | Мощность $S_{ном}$ , кВА | Частота $n_{ном}$ , об/мин | Сопротивление $R_s$ , о. е. | Сопротивление $X_d$ , о. е. | Сопротивление $X_q$ , о. е. | Момент инерции вала $J$ , кг·м <sup>2</sup> | Число пар полюсов $p$ |
|-----------------------|--------------------------|--------------------------|----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|---|-----------------------|
| 50                    | 400                      | 31,3                     | 1 500                      | 0,042                       | 1,56                        | 0,78                        | 0,087                                       | 2                     |

Таблица 3

Параметры СГ2

| Частота сети $f$ , Гц | Напряжение $U_{ном}$ , В | Мощность $S_{ном}$ , кВА | Частота $n_{ном}$ , об/мин | Сопротивление $R_{сф}$ , Ом | Сопротивление $L_{сф}$ , Гн | Постоянная линейного напряжения, В/1 000 об/мин | Тип ротора      | Число пар полюсов $p$ |
|-----------------------|--------------------------|--------------------------|----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|---|-----------------|-----------------------|
| 50                    | 400                      | 30                       | 1 500                      | 0,18                        | 0,000835                    | 380   | Неявно-полюсный | 2                     |

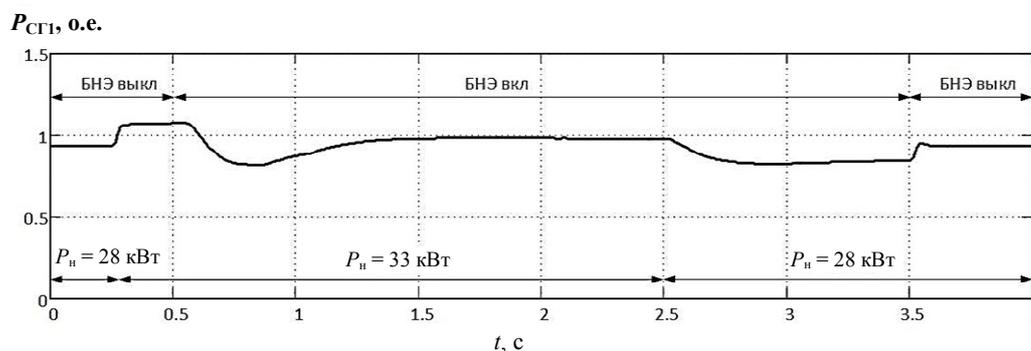
В качестве модели БНЭ выбран стандартный блок Battery. Параметры блока представлены в табл. 4.

Таблица 4

Параметры БНЭ

| Тип                | Напряжение $U_{ном}$ , В | Мощность $S_{ном}$ , А·ч | Начальный уровень заряда, % |
|--------------------|--------------------------|--------------------------|-----------------------------|
| Свинцово-кислотный | 650                      | 10                       | 70                          |

Рассмотрен процесс включения БНЭ на шину постоянного тока при работе электростанции в автономном режиме (ключ К1 замкнут, ключ К2 разомкнут). Эксперимент состоит из следующих этапов. В начале ДГПЧВ работает с нагрузкой, равной 28 кВт. В момент времени 0,25 с нагрузка увеличивается до 33 кВт. На 0,5 с к звену постоянного тока подключается БНЭ. Затем в момент времени 2,5 с нагрузка снижается до первоначального значения 28 кВт, и на 3,5 с происходит отключение БНЭ. На рис. 4, а представлена осциллограмма активной мощности СГ1 ( $P_{СГ1}$ ); на рис. 4, б приведен график тока разряда БНЭ ( $I_{БНЭ}$ ) и тока, понижающего ШИП; на рис. 4, в – осциллограммы фазного ( $U_a$ ) и действующего ( $U_{rms}$ ) выходного напряжения и фазного тока ( $I_a$ ) на выходе электростанции.



а

Рис. 4. Осциллограммы переходных процессов:  
а – активная мощность СГ1

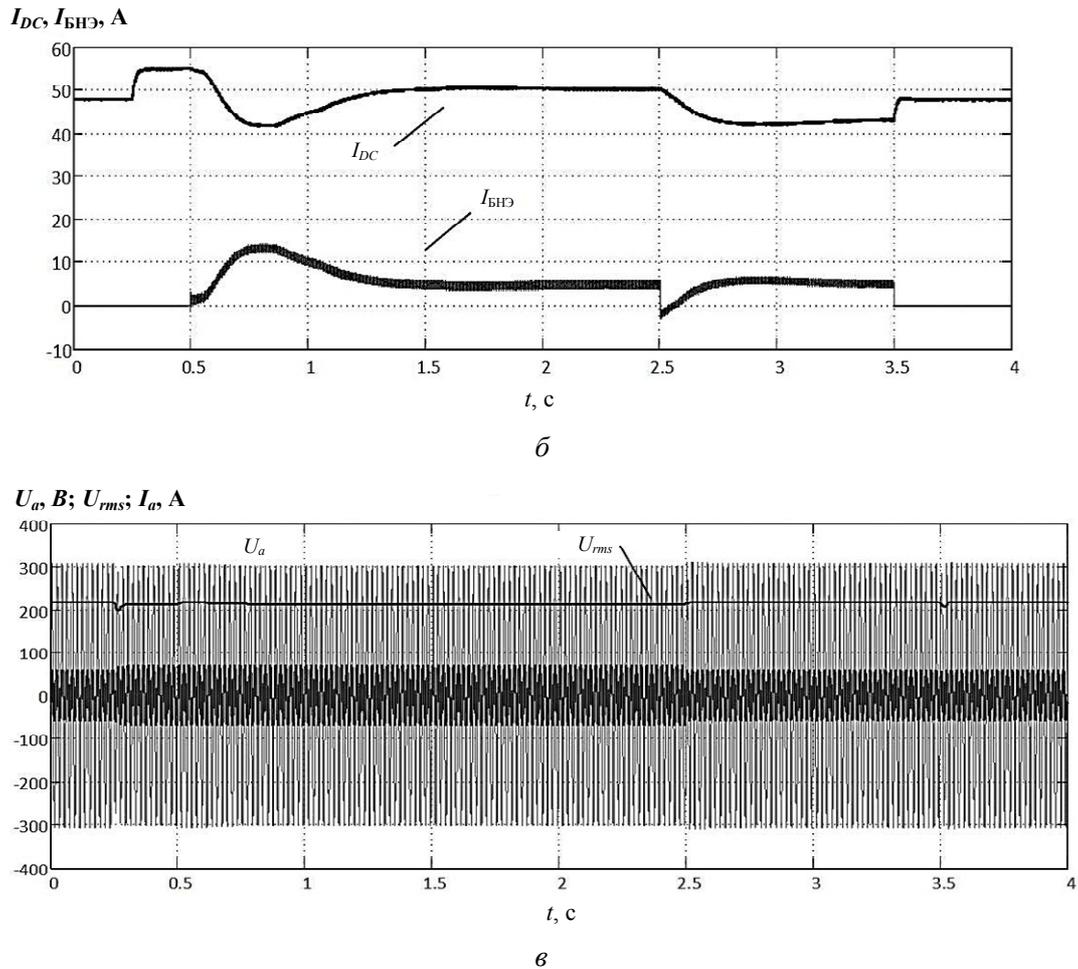


Рис. 4. Окончание. Осциллограммы переходных процессов:

б – ток разряда БНЭ и ток, понижающий ШИП;

в – фазное и действующее выходное напряжение, фазный ток на выходе электростанций

### Экспериментальная установка

На базе рассмотренной выше силовой топологии ДГПЧВ с понижающим ШИП был разработан экспериментальный стенд «вентильного» генераторного комплекса мощностью 3,2 кВт. Принципиальная электрическая схема экспериментального стенда приведена на рис. 5.

В качестве дизель-генератора была выбрана бензиновая электростанция SDMO HX 4000. Эксперимент выполняется в следующей последовательности. В начальный момент времени ДГПЧВ работает с активной нагрузкой 1 кВт, частота вращения ДВС составляет 2 200 об/мин. В момент времени  $t_1$  нагрузка увеличивается до 2 кВт. При этом напряжение звена постоянного тока кратковременно снижается на 8 %. После затухания переходных процессов (момент времени  $t_2$ ) ЗЭР фиксирует новый уровень нагрузки и вычисляет оптимальное значение частоты вращения ДВС. Частота вращения вала ДВС плавно увеличивается до 2 750 об/мин (момент времени  $t_3$ ). Осциллограмма напряжения звена постоянного тока представлена на рис. 6.

Стабилизация уровня напряжения звена постоянного тока обеспечивается контуром напряжения в ШИП, а также за счет обратной связи по частоте вращения вала ДВС в системе управления двигателем. На рис. 7 и 8 представлены осциллограммы напряжения СГ и выходного напряжения инвертора (ДГПЧВ) соответственно.

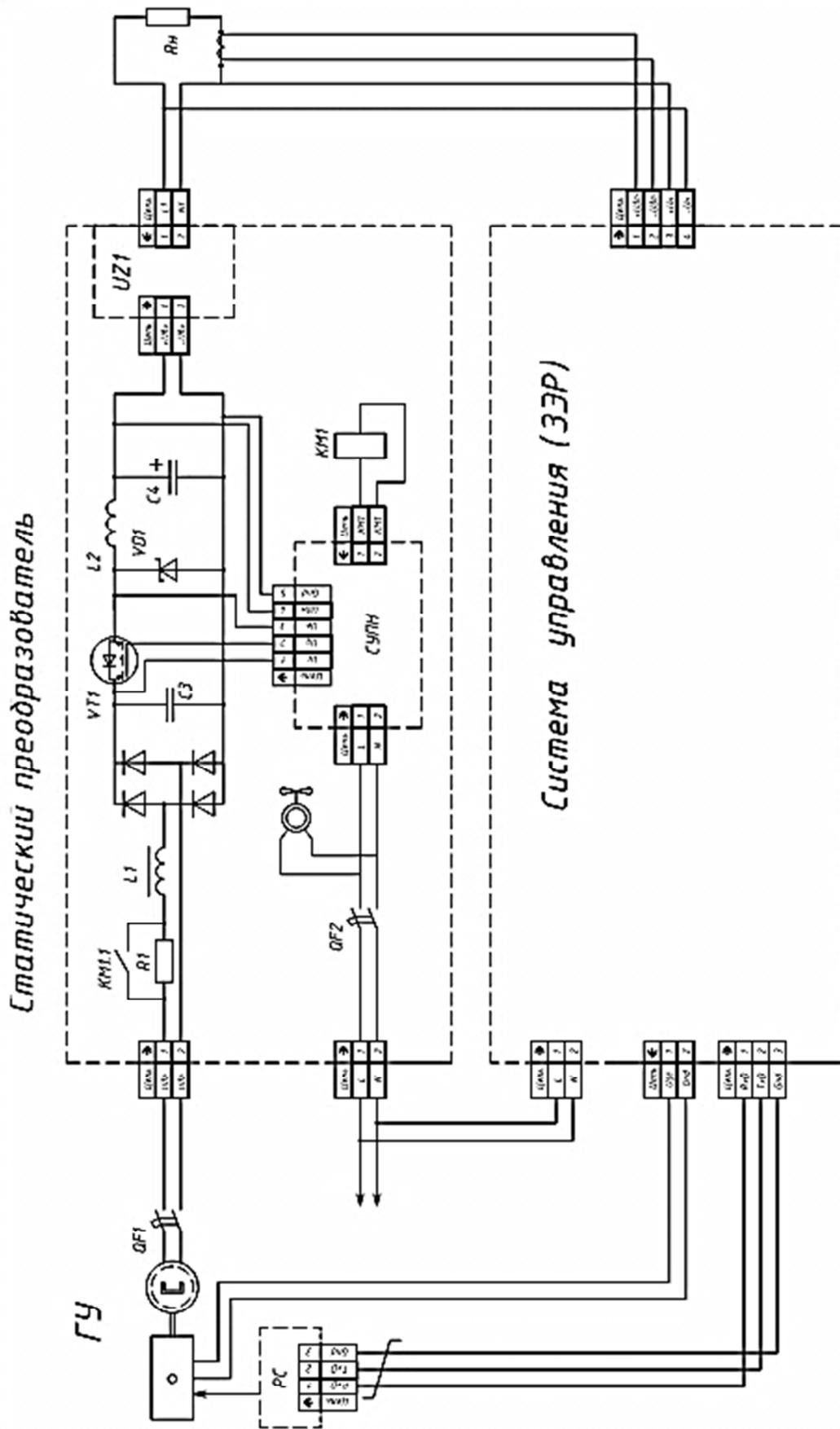


Рис. 5. Принципиальная электрическая схема экспериментального стенда ДППЧВ

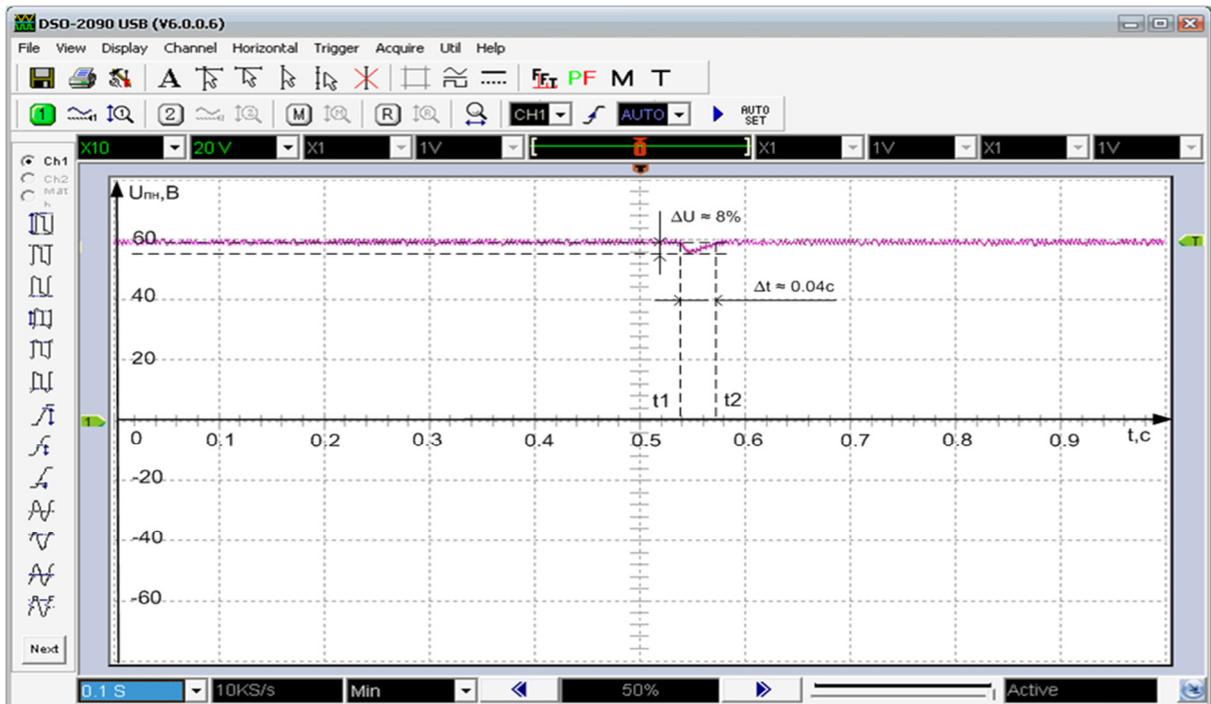


Рис. 6. Напряжение в звене постоянного тока при набросе нагрузки  $P = 1,0$  кВт

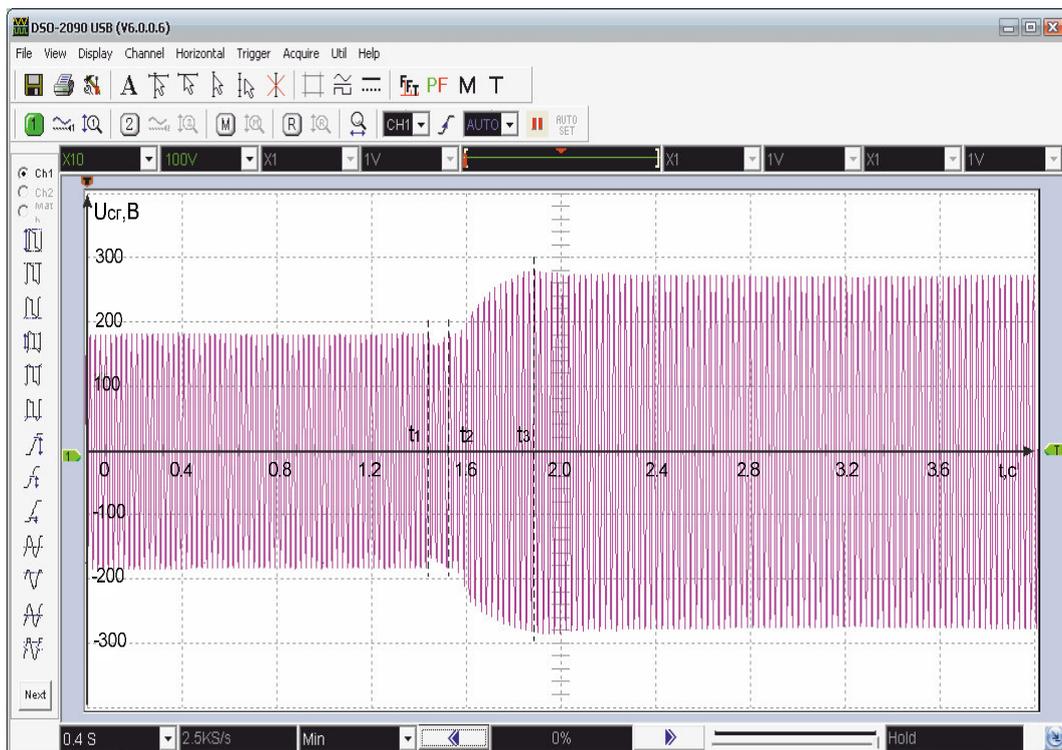


Рис. 7. Выходное напряжение СГ при набросе нагрузки  $P = 1,0$  кВт (разгон ДВС до  $n = 2750$  об/мин)

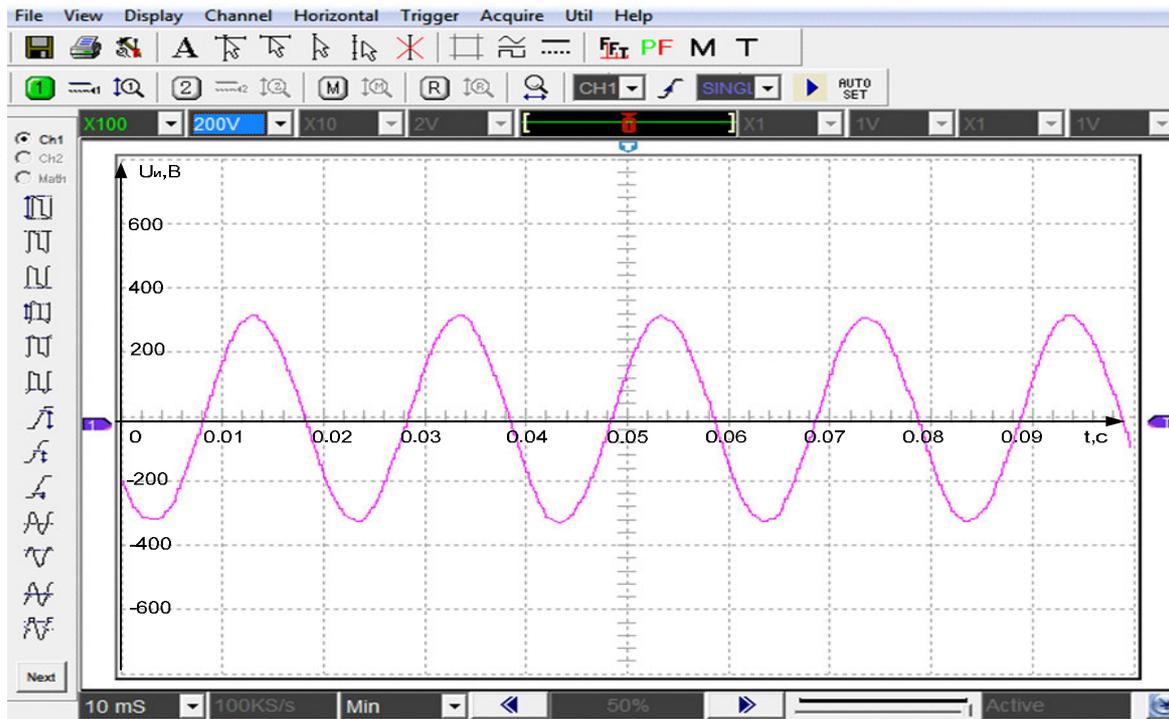


Рис. 8. Выходное напряжение инвертора ДГПЧВ

Оси времени на рис. 6–8 не совпадают друг с другом из-за различной развертки оси времени осциллографа.

### Заключение

Предложен вариант дизель-генераторной электростанции, состоящей из классической ДГУ и ДГПЧВ на базе понижающего ШИП [9, 10] с БНЭ. Разработан алгоритм управления генераторным оборудованием данной электростанции и приведена ее математическая имитационная модель, позволяющая исследовать динамические режимы коммутации нагрузки.

Представлены результаты экспериментальных исследований динамических режимов работы, снятые на созданной генераторной установке ДГПЧВ мощностью 3,2 кВт.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Артюхов И. И., Степанов С. Ф., Бочкарев Д. А., Ербаев Е. Т.* Особенности построения автономных систем электропитания на основе генераторов с изменяемой скоростью вращения вала // *Вопр. электротехнологии*. 2015. № 1. С. 58–64.
2. *Обухов С. Г., Плотников И. А.* Сравнительный анализ схем автономных электростанций, использующих установки возобновляемой энергетики // *Пром. энергетика*. 2012. № 7. С. 46–51.
3. *Delgado C., Dominguez-Navarro J. A.* Optimal design of a hybrid renewable energy system ecological vehicles and renewable energies // *Ninth international conference on publication year (EVER)*. 2014. P. 1–8.
4. *Гельман М. В., Дудкин М. М., Преображенский К. А.* Преобразовательная техника: учеб. пособие. Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2009. 425 с.
5. *Sylvain L. S.* Voltage oriented control of three-phase boost pwm converters. Göteborg: Chalmers University of Technology, 2010. 114 с.
6. *Маклаков А. С., Родионов А. А.* Влияние на сеть трехфазного мостового двухуровневого активно-выпрямителя напряжения при различных видах ШИМ. Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2013. 8 с.
7. *Хватов О. С., Кобяков Д. С.* Моделирование переходных процессов дизель-генераторной установки переменной частоты вращения на базе активного выпрямителя напряжения // *Вестн. Астрахан. гос. техн. ун-та. Сер.: Морская техника и технология*. 2019. № 3. С. 94–104.
8. *Шрейнер Р. Т., Ефимов А. А.* Активные преобразователи в регулируемых электроприводах. Новоуральск: Изд-во НГТИ, 2001. 250 с.

9. *Хватов О. С., Дарьенков А. Б.* Единая электростанция транспортного объекта с электродвижением на базе дизель-генераторной установки переменной частоты вращения // *Электротехника*. 2016. № 3. С. 35–40.

10. *Хватов О. С., Дарьенков А. Б., Самоявчев И. С.* Топливная экономичность единой электростанции автономного объекта на базе двигателя внутреннего сгорания переменной скорости вращения // *Эксплуатация мор. трансп.* 2012. № 1 (71). С. 47–50.

Статья поступила в редакцию 01.06.2020

### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Хватов Олег Станиславович* – Россия, 603950, Нижний Новгород; Волжский государственный университет водного транспорта; д-р техн. наук, профессор; зав. кафедрой электротехники и электрооборудования объектов водного транспорта; khvatov\_oleg@mail.ru.

*Кобяков Дмитрий Сергеевич* – Россия, 603950, Нижний Новгород; Волжский государственный университет водного транспорта; аспирант кафедры электротехники и электрооборудования объектов водного транспорта; era-guitar@mail.ru.

*Юрлов Михаил Евгеньевич* – Россия, 603950, Нижний Новгород; Волжский государственный университет водного транспорта; аспирант кафедры электротехники и электрооборудования объектов водного транспорта; yurlov.m.e@gmail.com.



## POWER STATION BASED ON VARIABLE SPEED DIESEL GENERATOR AND BUFFER STORAGE DEVICE

*O. S. Khvatov, D. S. Kobayakov, M. E. Yurlov*

*Volga State University of Water Transport,  
Nizhny Novgorod, Russian Federation*

**Abstract.** The article describes the diesel generator complex which consists of two diesel generators. In order to save fuel, it is advisable to choose one diesel generator of inverter type, i.e. to switch it to a variable speed mode. The buffer storage device is used as a part of the power plant in order to ensure the required parameters of the generated electricity under peak loads, as well as when the generator is operating at the limit of rated power. There has been given the control algorithm and transient processes of the charge / discharge of the buffer storage device in a diesel generator power plant. The power plant that consists of a classic diesel generator and a variable speed diesel generator unit (valved generator) has been chosen as an object research. A block diagram of the power plant conducting is proposed, as well as a power transformer topology of a variable-speed diesel generator based on a step-down pulse-width converter. There has been presented an algorithm for controlling the connection of a buffer storage device depending on its charge and the load power value both in stand-alone mode and in parallel operation of generator sets. In the MatLab Simulink computer environment a simulation model of a power plant was developed and transient processes of load switching, as well as charge / discharge of a buffer energy storage device were studied. An electrical circuit diagram of an experimental bench of a variable-speed diesel generator set is illustrated. The results of experimental studies of dynamic modes of operation on a prototype variable speed diesel generator with a power of 3.2 kW are also presented.

**Key words:** diesel generator power plant, variable speed diesel generator, buffer storage device, dynamic mode modeling, test bench.

**For citation:** Khvatov O. S., Kobayakov D. S., Yurlov M. E. Power station based on variable speed diesel generator and buffer storage device. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies*. 2020;3:71-81. (In Russ.) DOI: 10.24143/2073-1574-2020-3-71-81.

#### REFERENCES

1. Artiukhov I. I., Stepanov S. F., Bochkarev D. A., Erbaev E. T. Osobennosti postroeniia avtonomnykh sistem elektropitaniia na osnove generatorov s izmeniaemoi skorost'iu vrashcheniia vala [Characteristics of construction of autonomous power supply systems based on generators with variable shaft rotation speed]. *Voprosy elektrotekhnologii*, 2015, no. 1, pp. 58-64.
2. Obukhov S. G., Plotnikov I. A. Sravnitel'nyi analiz skhem avtonomnykh elektrostantsii, ispol'zuiushchikh ustanovki vozobnovliaemoi energetiki [Comparative analysis of autonomous power plants using renewable energy plants]. *Promyshlennaia energetika*, 2012, no. 7, pp. 46-51.
3. Delgado C., Dominguez-Navarro J. A. Optimal design of a hybrid renewable energy system ecological vehicles and renewable energies. *Ninth international conference on publication year (EVER)*. 2014. Pp. 1-8.
4. Gel'man M. V., Dudkin M. M., Preobrazhenskii K. A. *Preobrazovatel'naia tekhnika: uchebnoe posobie* [Converting equipment: teaching guide]. Cheliabinsk, Izd-vo IuUrGU, 2009. 425 p.
5. Sylvain L. S. *Voltage oriented control of three-phase boost pwm converters*. Göteborg, Chalmers University of Technology, 2010. 114 p.
6. Maklakov A. S., Rodionov A. A. *Vliianie na set' trekhfaznogo mostovogo dvukhurovneвого aktivnogo vypriamitel'ia napriazheniia pri razlichnykh vidakh ShIM* [Effect on network of three-phase bridge two-level active voltage rectifier for various types of PWM]. Cheliabinsk, Izd-vo IuUrGU, 2013. 8 p.
7. Khvatov O. S., Kobiakov D. S. Modelirovanie perekhodnykh protsessov dizel'-generatornoi ustanovki peremennoi chastoty vrashcheniia na baze aktivnogo vypriamitel'ia napriazheniia [Transient simulation of variable speed diesel generator set based on active voltage rectifier]. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Morskaiia tekhnika i tekhnologiia*, 2019, no. 3, pp. 94-104.
8. Shreiner R. T., Efimov A. A. *Aktivnye preobrazovateli v reguliruemymkh elektroprivodakh* [Active converters in variable speed drives]. Novoural'sk, Izd-vo NGTI, 2001. 250 p.
9. Khvatov O. S., Dar'enkov A. B. Edinaia elektrostantsiia transportnogo ob'ekta s elektrodvizheniem na baze dizel'-generatornoi ustanovki peremennoi chastoty vrashcheniia [Unified power plant of transport facility with electric movement on the basis of variable speed diesel generator]. *Elektrotekhnika*, 2016, no. 3, pp. 35-40.
10. Khvatov O. S., Dar'enkov A. B., Samoiavchev I. S. Toplivnaia ekonomichnost' edinoi elektrostantsii avtonomnogo ob'ekta na baze dvigatel'ia vnutrennego sgoraniia peremennoi skorosti vrashcheniia [Fuel efficiency of unified power plant of autonomous facility based on variable-speed internal combustion engine]. *Ekspluatatsiia morskogo transporta*, 2012, no. 1 (71), pp. 47-50.

The article submitted to the editors 01.06.2020

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Khvatov Oleg Stanislavovich** – Russia, 603950, Nizhny Novgorod; Volga State University of Water Transport; Doctor of Technical Sciences, Professor; Head of the Department of Electric Engineering and Electric Equipment of Water Transport; khvatov\_oleg@mail.ru.

**Kobayakov Dmitry Sergeevich** – Russia, 603950, Nizhny Novgorod; Volga State University of Water Transport; Postgraduate Student of the Department of Electric Engineering and Electric Equipment of Water Transport; epa-guitar@mail.ru.

**Yurlov Mikhail Evgenievich** – Russia, 603950, Nizhny Novgorod; Volga State University of Water Transport; Postgraduate Student of the Department of Electric Engineering and Electric Equipment of Water Transport; yurlov.m.e@gmail.com.

