

УДК 621.3

DOI 10.46960/2658-6754_2021_3_75

МОДЕЛИРОВАНИЕ СУДОВОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ СО ВСТРОЕННОЙ СЕТЬЮ ПОСТОЯННОГО ТОКА В СРЕДЕ MATLAB

О.А. Бурмакин

Волжский государственный университет водного транспорта
Нижний Новгород, Россия
e-mail: boa_71@mail.ru

В.В. Гуляев

Волжский государственный университет водного транспорта
Нижний Новгород, Россия
e-mail: eovt@mail.ru

Ю.С. Малышев

Волжский государственный университет водного транспорта
Нижний Новгород, Россия
e-mail: malyuriyserg@yandex.ru

С.В. Попов

Волжский государственный университет водного транспорта
Нижний Новгород, Россия
e-mail: popovsev3@yandex.ru

Рассмотрена целесообразность применения встроенной сети постоянного тока в судовых электроэнергетических системах при работе возобновляемых источников энергии. Предложена имитационная модель для исследования работы систем со встроенной сетью постоянного тока и возобновляемыми источниками энергии. Показана необходимость включения буферного накопителя в сеть постоянного тока для улучшения качества переходных процессов в динамических режимах работы.

Ключевые слова: буферный накопитель, встроенная сеть постоянного тока, судовая электростанция, электрическая система.

Для цитирования: Бурмакин, О.А. Моделирование судовой электростанции со встроенной сетью постоянного тока в среде MATLAB / О.А. Бурмакин, В.В. Гуляев, Ю.С. Малышев, С.В. Попов // Интеллектуальная электротехника. 2021. № 3. С. 75-84. DOI: 10.46960/2658-6754_2021_3_75

SIMULATION OF SHIP POWER PLANT WITH BUILT-IN DC NETWORK IN MATLAB

O.A. Burmakin

Volga State University of Water Transport
Nizhny Novgorod, Russia
e-mail: boa_71@mail.ru

V.V. Gulyaev

Volga State University of Water Transport
Nizhny Novgorod, Russia
e-mail: eovt@mail.ru

Yu.S. Malyshev

Volga State University of Water Transport
Nizhny Novgorod, Russia
e-mail: malyuriyserg@yandex.ru

S.V. Popov

Volga State University of Water Transport
Nizhny Novgorod, Russia
e-mail: popovsev3@yandex.ru

Abstract. The article considers the feasibility of using the built-in continuous current network in ship electric power systems when operating renewable energy sources. A simulation model is proposed for studying the operation of systems with an integrated DC network and renewable energy sources. The necessity of including a buffer storage device in a DC network to improve the quality of transients in dynamic operating modes is shown.

Keywords: buffer storage, built-in DC network, electrical system, ship power plant.

For citation: O.A. Burmakin, V.V. Gulyaev, Y.S. Malyshev, S.V. Popov, “Simulation of ship power plant with built-in DC network in Matlab”, *Smart Electrical Engineering*, no. 3, pp. 75-84, 2021. DOI: 10.46960/2658-6754_2021_3_75

I. Введение

Идея применения возобновляемых источников электрической энергии на флоте не нова. В настоящее время развитие технологий дало новый импульс традиционной и альтернативной энергетике. Применительно к судам целесообразно рассматривать ветроустановки, солнечные электростанции и валогенераторные установки переменной частоты вращения.

В период постоянного роста цен на нефтепродукты солнце и ветер являются актуальными энергоносителями для получения электроэнергии. Главным преимуществом возобновляемых источников представляется неограниченный ресурс и экологичность [1]. Поэтому исследования комбинированных систем генерирования энергии в составе судовой электроэнергетической системы (СЭЭС) являются перспективными [2]. В такие СЭЭС, кроме традиционных источников, могут входить альтернативные: ветро-генераторы и солнечные батареи.

В каждом отдельном случае следует руководствоваться наличием соответствующих ресурсов. Анализ энергоресурсов по солнечной и ветровой энергии России, нагрузочных режимов работы СЭЭС (судовых электроэнергетических систем), а также возможности установки альтернативных источников в зависимости от типа судна показал:

- 1) возможность обеспечения энергией альтернативными источниками ходового режима на сухогрузах и танкерах, а также ходовой режим судна-толкача при установке источников на наливной барже;
- 2) целесообразность применения энергии ветра в северных и восточных районах, а энергии солнца – в южных;
- 3) целесообразность установки в качестве ветродвигателя спиральных ветровых турбин вследствие их большей производительности и лучших эксплуатационных показателей [3];
- 4) наибольшую перспективность для применения на судах солнечных батарей конической формы, в силу их большего КПД и возможности устанавливаться на надстройке [4];
- 5) возможность применения валогенераторных установок переменной частоты вращения не только в ходовом режиме, но и на маневрах;
- 6) возможность обеспечения стояночного режима большинства типов судов с помощью источников альтернативной энергии.

Однако объединение таких различных источников в единую судовую электростанцию является проблематичным, так как для обеспечения бесперебойности электроснабжения судовых потребителей необходимо организовывать параллельную работу источников с различными выходными параметрами генерируемой электроэнергии.

II. Встроенная сеть постоянного тока в системе генерирования электроэнергии

Решение указанной проблемы заключается в организации встроенной сети постоянного тока в системе генерирования электроэнергии [5, 6]. Функциональная схема такой комбинированной СЭЭС представлена на рис. 1.

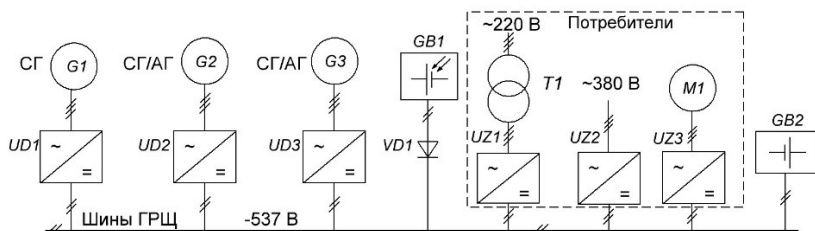


Рис. 1. Функциональная однолинейная схема

Fig. 1. Functional single-line scheme

Обозначения на рис. 1: $G1$ – синхронный дизель-генератор; $G2$ – синхронный или асинхронный ветрогенератор; $G3$ – синхронный или асинхронный валогенератор; $GB1$ – солнечная батарея; $GB2$ – аккумуляторная батарея; $UD1$ - $UD3$ выпрямители; $UZ1$, $UZ2$ – инверторы с постоянным значением частоты выходного напряжения; $UZ3$ – инвертор с регулируемым значением частоты выходного напряжения.

Задача поддержания постоянства напряжения и частоты на нагрузке решается за счет стабилизации величин напряжения в звене постоянного тока и выходной частоты инверторов.

Основные преимущества «встроенной» сети постоянного тока следующие [3]:

- возможности более рационального размещения электрооборудования;
- повышение эффективности работы приводных двигателей и снижение затрат на их обслуживание;
- улучшение динамических характеристик генераторных установок;
- возможности установки дополнительных альтернативных источников электроэнергии с включением на параллельную работу без выполнения процесса синхронизации;
- экономия топлива.

Для изучения особенностей режимов работы судовой электроэнергетической системы со встроенной сетью постоянного тока были проведены испытания на опытной установке, позволяющей выполнить параллельную работу различных источников через звено постоянного тока [4]. Разработанная установка позволила исследовать следующие режимы работы:

- ввод в параллельную работу, перевод нагрузки и вывод из работы одного из генераторов;
- распределение нагрузки между генераторами на базе синхронных и асинхронных машин.

Распределение нагрузки между синхронным и асинхронным генера-

торами, работающими через встроенную сеть постоянного тока, осуществлялось путем изменения тока возбуждения и скорости вращения соответственно.

III. Имитационная модель СЭЭС с возобновляемыми источниками электроэнергии

Для выявления дополнительных достоинств и недостатков при различных режимах, которые не может обеспечить опытная установка, была разработана имитационная модель СЭЭС с возобновляемыми источниками электроэнергии (рис. 2).

В модели использованы различные источники электроэнергии переменного тока, подключенные к сети постоянного тока через неуправляемые выпрямители, и источники постоянного тока, включенные непосредственно во встроенную сеть. Основным источником в модели является дизель-генератор, построенный на основе синхронной машины, остальные относятся к возобновляемым. Асинхронный генератор, подключенный на параллельную работу с СГ по звену постоянного тока, можно рассматривать как ветроэнергетическую или валогенераторную установку, так как закон изменения скорости вращения вала можно задавать. К встроенной сети постоянного тока включены: емкостной фильтр, солнечная батарея и буферный накопитель. Стабилизация напряжения и частоты генерируемой электроэнергии на нагрузке обеспечивается системой управления инвертором и системой поддержания напряжения в сети постоянного тока.

Имитационная модель позволяет исследовать работу перечисленных блоков в едином комплексе при изменении величины и характера нагрузки, при переводе нагрузки с одного источника на другой и т.д. Наличие буферного накопителя большой емкости приводит к улучшению качества переходных процессов при динамических режимах (рис. 3-5).

Из приведенных осциллограмм переходных процессов напряжения в сети постоянного тока видно, что при подключении на второй секунде нагрузки, вдвое превышающей номинальную мощность дизель-генератора, в цепь переменного тока, произошел провал напряжения в сети постоянного тока в связи с перегрузкой генератора. На четвертой секунде в звено постоянного тока подключается асинхронный генератор, что приводит к восстановлению напряжения (рис. 3).

Подобные провалы напряжения в сети могут возникать при пуске двигателей с потребляемой мощностью соизмеримой с мощностью генератора. Для исключения или уменьшения провала следует в звено постоянного тока подключить буферный накопитель в виде конденсатора большой емкости либо аккумуляторной батареи. Для оценки влияния буферного накопителя на параметры сети было проведено моделирование с подключением нагрузки той же величины.

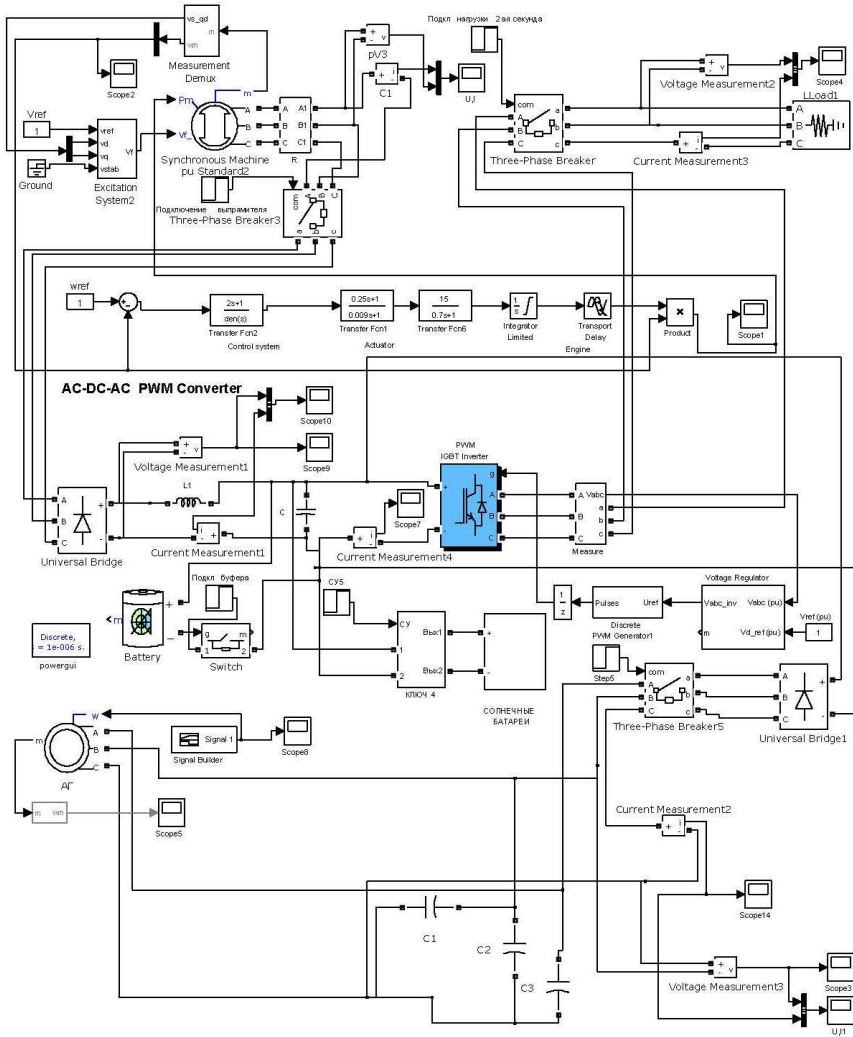


Рис. 2. Имитационная модель СЭЭС

Fig. 2. Simulation model of the ship's electric power system

Осциллограмма напряжения в звене постоянного тока с буферным накопителем приведена на рис. 5. Из осциллограммы видно, что в момент подключения (2 с) нагрузки напряжение в цепи постоянного тока практически не изменилось. Подключение дополнительно АГ к встроенной сети

постоянного тока (4 с) также не оказало значительного влияния на величину напряжения. Постоянство напряжения было достигнуто путем подбора емкости аккумуляторной батареи.

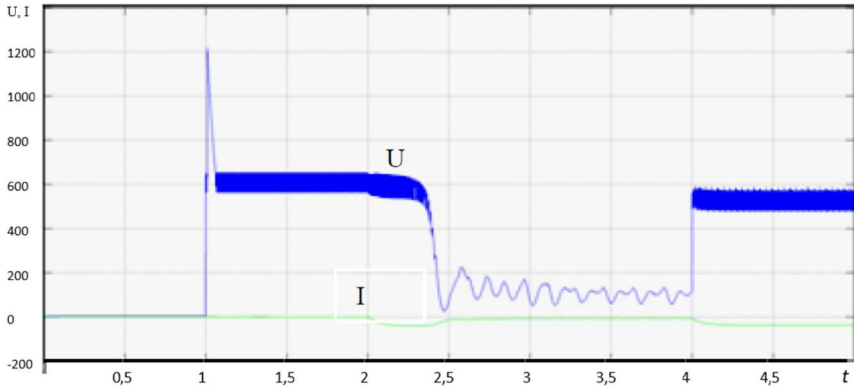


Рис. 3. Ток и напряжение в звене постоянного тока без буферного накопителя

Fig. 3. Current and voltage in the DC link without a buffer storage

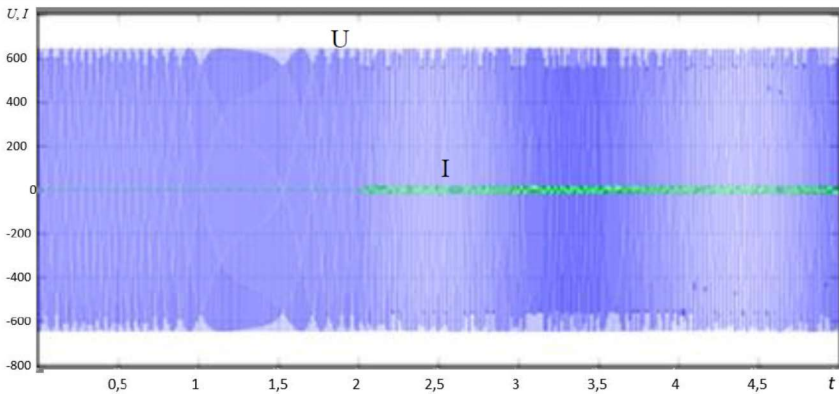


Рис. 4. Ток и напряжение синхронного генератора

Fig. 4. Current and voltage of the synchronous generator

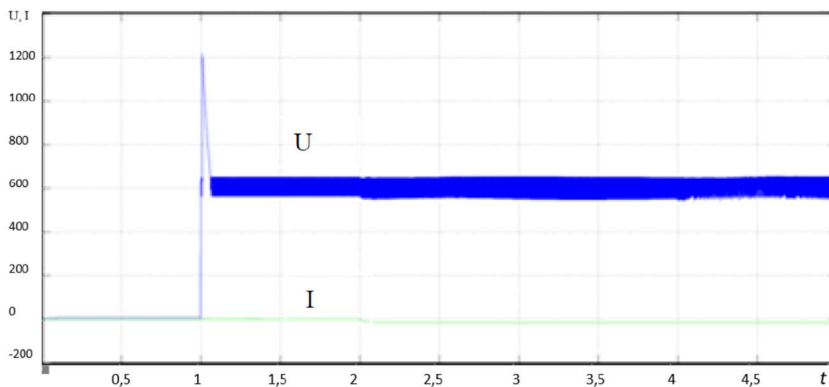


Рис. 5. Ток и напряжение в звене постоянного тока с буферным накопителем

Fig. 5. Current and voltage in a DC link with a buffer storage

IV. Заключение

Применение встроенной сети постоянного тока позволяет обеспечить длительную параллельную работу различных источников электроэнергии, а установка буферного накопителя достаточной емкости снижает влияние на сеть мощных потребителей.

Испытания показали возможность подключения источников электроэнергии, отличающихся по мощности, статизму и роду тока, без необходимости выполнения условий синхронизации и защиты от обратной мощности. Регулирование загрузки асинхронных генераторов изменением момента на валу приводного двигателя, осуществляется в диапазоне изменения частоты вращения менее 7 %, что приводит к экономии топлива. Важным достоинством подобных систем является более простая автоматизация и возможность подключения возобновляемых источников энергии.

© Бурмакин О.А., 2021

© Гуляев В.В., 2021

© Мальшев Ю.С., 2021

© Попов С.В., 2021

Поступила в редакцию 10.09.2021

Received 10.09.2021

Библиографический список

- [1] Бурмакин О.А., Малышев Ю.С., Варечкин Ю.В. Современные тенденции использования энергии ветра на судах // Труды 15-го Межд. науч.-пром. форума «Великие реки – 2013». Н. Новгород, Россия. 2013. Т. 2. С. 388-392.
- [2] Бурмакин О.А., Малышев Ю.С., Варечкин Ю.В. Возобновляемые источники энергии в судовой электроэнергетической системе // Вестник ВГАВТ. 2015. № 42. С. 263-268.
- [3] Hansen J.F., Lindtjørn J.O., Myklebust T.A., Vanska K. Onboard DC Grid. The newest design for marine power and propulsion systems // ABB review. 2012. No. 2. P. 28-33.
- [4] Бурмакин О.А., Малышев Ю.С., Попов С.В., Гуляев В.В. Исследование режимов работы судовой электроэнергетической системы двойного рода тока // Вестник Астраханского Государственного Технического Университета. Серия: Морская Техника и Технологии. 2019. № 1. С. 97-104.
DOI: 10.24143/2073-1574-2019-1-97-104
- [5] Бурмакин О.А., Малышев Ю.С. Комбинированная СЭЭС с применением возобновляемых источников энергии // Труды 16-го Межд. науч.-пром. форума «Великие реки – 2014». Н. Новгород, Россия. 2014. Т. 2. С. 199-202.
- [6] Иванчура В.И., Чубарь А.В., Пост С.С. Энергетические модели элементов автономных систем электропитания // Журнал Сибирского Федерального Университета. Серия: Техника и Технологии. 2012. Т. 5. № 2. С. 179-190.

References

- [1] O.A. Burmakin, Yu.S. Malyshev and Yu.V. Varechkin, “Sovremennye tendencii ispol'zovaniya energii vetra na sudah [Current trends in the use of wind energy on ships]”, in proc. *15th Int. scient. and ind. forum “Velikie reki – 2013 [Great Rivers – 2013]”*, 2013, Nizhny Novgorod, Russia. Vol. 2, pp. 386-390 (in Russian).
- [2] O.A. Burmakin, Yu.S. Malyshev and Yu.V. Varechkin, “Renewable energy in ship electric power system”, *Bulletin of VSAWT*, no. 42, pp. 263-268, 2015.
- [3] J.F. Hansen, J.O. Lindtjørn, T.A. Myklebust and K. Vanska, “Onboard DC Grid. The newest design for marine power and propulsion systems”, *ABB review*, no. 2, pp. 28-33, 2012.
- [4] O.A. Burmakin, Yu.S. Malyshev, S.V. Popov and V.V. Gulyaev, “Analysis of the operation modes of the ship dual current system”, *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies*, no. 1, pp. 97-104, 2019. DOI: 10.24143/2073-1574-2019-1-97-104
- [5] O.A. Burmakin and Yu.S. Malyshev, “Kombinirovannaya SEES s primeneniem vozobnovlyaemykh istochnikov energii [Combined marine electric power system with the use of renewable energy sources]”, in proc. *16th Int. scient. and ind. forum “Velikie reki – 2014 [Great Rivers – 2014]”*, 2014, Nizhny Novgorod, Russia. Vol. 2, pp. 199-202 (in Russian).
- [6] V.I. Ivanchura, A.V. Chubar and S.S. Post, “Energy prototypes of units in autonomous power supply systems”, *Journal of Siberian Federal University. Engineering and Technology*, vol. 5, no. 2, pp. 179-190, 2012.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ
INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Бурмакин Олег Анатольевич, кандидат технических наук, доцент Волжского государственного университета водного транспорта, г. Нижний Новгород, Российская Федерация

Oleg A. Burmakin, Cand. Sci. (Eng.), associate professor of the Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russian Federation

Гуляев Владимир Викторович, кандидат технических наук, доцент Волжского государственного университета водного транспорта, г. Нижний Новгород, Российская Федерация

Vladimir V. Gulyaev, Cand. Sci. (Eng.), associate professor of the Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russian Federation

Мальшев Юрий Сергеевич, кандидат технических наук, доцент Волжского государственного университета водного транспорта, г. Нижний Новгород, Российская Федерация

Yuriy S. Malyshev, Cand. Sci. (Eng.), associate professor of the Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russian Federation

Попов Сергей Васильевич, кандидат технических наук, доцент Волжского государственного университета водного транспорта, г. Нижний Новгород, Российская Федерация

Sergey V. Popov, Cand. Sci. (Eng.), associate professor of the Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russian Federation