

УДК 621.314

**Малышев Юрий Сергеевич**<sup>1</sup>, к.т.н., доцент, доцент кафедры электротехники и электрооборудования объектов водного транспорта,

e-mail: elektrikasp@mail.ru

**Бурмакин Олег Анатольевич**<sup>1</sup>, к.т.н., доцент, доцент кафедры электротехники и электрооборудования объектов водного транспорта,

e-mail: boa\_71@mail.ru

**Попов Сергей Васильевич**<sup>1</sup>, к.т.н., доцент, доцент кафедры электротехники и электрооборудования объектов водного транспорта,

e-mail: popovsev3@ya.ru

<sup>1</sup>Волжский государственный университет водного транспорта, г. Нижний Новгород, Россия.

## ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ СУДОВОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ СО ВСТРОЕННОЙ СЕТЬЮ ПОСТОЯННОГО ТОКА

*Аннотация.* В статье 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:* электрическая система, встроенная сеть постоянного тока, судовая электростанция, буферный накопитель.

Идея применения возобновляемых источников электрической энергии на флоте не нова. В настоящее время развитие технологий дало новый толчок традиционной и альтернативной энергетике. Применительно к судам целесообразно рассматривать ветроустановки, солнечные электростанции и валогенераторные установки переменной частоты вращения. В каждом случае следует руководствоваться наличием соответствующих ресурсов. Анализ энергоресурсов по солнечной и ветровой энергии России, нагрузочных режимов работы СЭЭС (судовая электроэнергетическая система), а также возможности установки альтернативных источников в зависимости от типа судна показал, что:

1. возможность обеспечения энергией альтернативными источниками ходового режима на сухогрузах и танкерах, а так же 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. в качестве ветродвигателя целесообразнее устанавливать спиральные ветровые турбины, вследствие их большей производительности и лучшими эксплуатационными показателями [1];

4. наиболее перспективными для применения на судах являются солнечные батареи конической формы, так как имеют большой КПД и могут устанавливаться на надстройке [2];

5. валогенераторные установки переменной частоты вращения могут применяться не только в ходовом режиме, но и на маневрах;

6. источники альтернативной энергии могут обеспечить стояночный режим большинства типов судов.

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.

Решение этой проблемы заключается в организации встроенной сети постоянного тока в системе генерирования электроэнергии [3]. Функциональная схема такой комбинированной СЭЭС представлена на Рисунке 1.

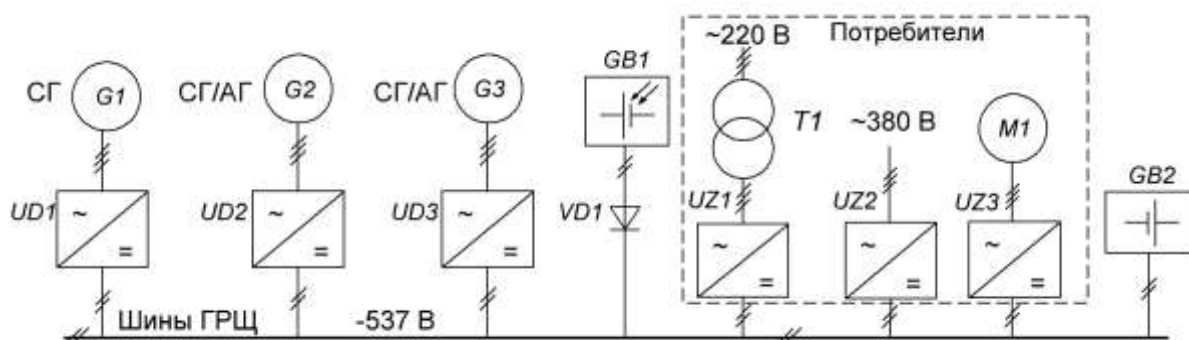


Рисунок 1 – Функциональная однолинейная схема

G1- Синхронный дизельгенератор; 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 заключаются в [3]:

- возможности более рационального размещения электрооборудования;
- повышении эффективности работы приводных двигателей и снижение затрат на их обслуживание;
- улучшении 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, которая позволяет 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 генераторами, работающими через встроенную сеть постоянного тока, осуществлялось путем изменения тока возбуждения и скорости вращения соответственно.

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.

Для выявления дополнительных достоинств и недостатков системы, работающей в различных режимах, которые не может обеспечить опытная установка, была разработана имитационная модель СЭЭС с возобновляемыми источниками электроэнергии (Рисунок 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 (Рисунок 3).

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 4 секунде в звено постоянного тока подключается асинхронный генератор, что приводит к восстановлению напряжения (Рисунок 3,а).

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. Осциллограмма напряжения в звене постоянного тока с буферным накопителем приведена на Рисунке 3, б. Из осциллограммы видно, что в момент подключения (2 сек.) нагрузки напряжение в цепи постоянного тока практически не изменилось. Подключение дополнительно АГ, к встроенной сети постоянного тока (4 секунда) так же не оказало значительного влияния на величину напряжения. Следует отметить что постоянство напряжения было достигнуто путем подбора емкости аккумуляторной батареи.

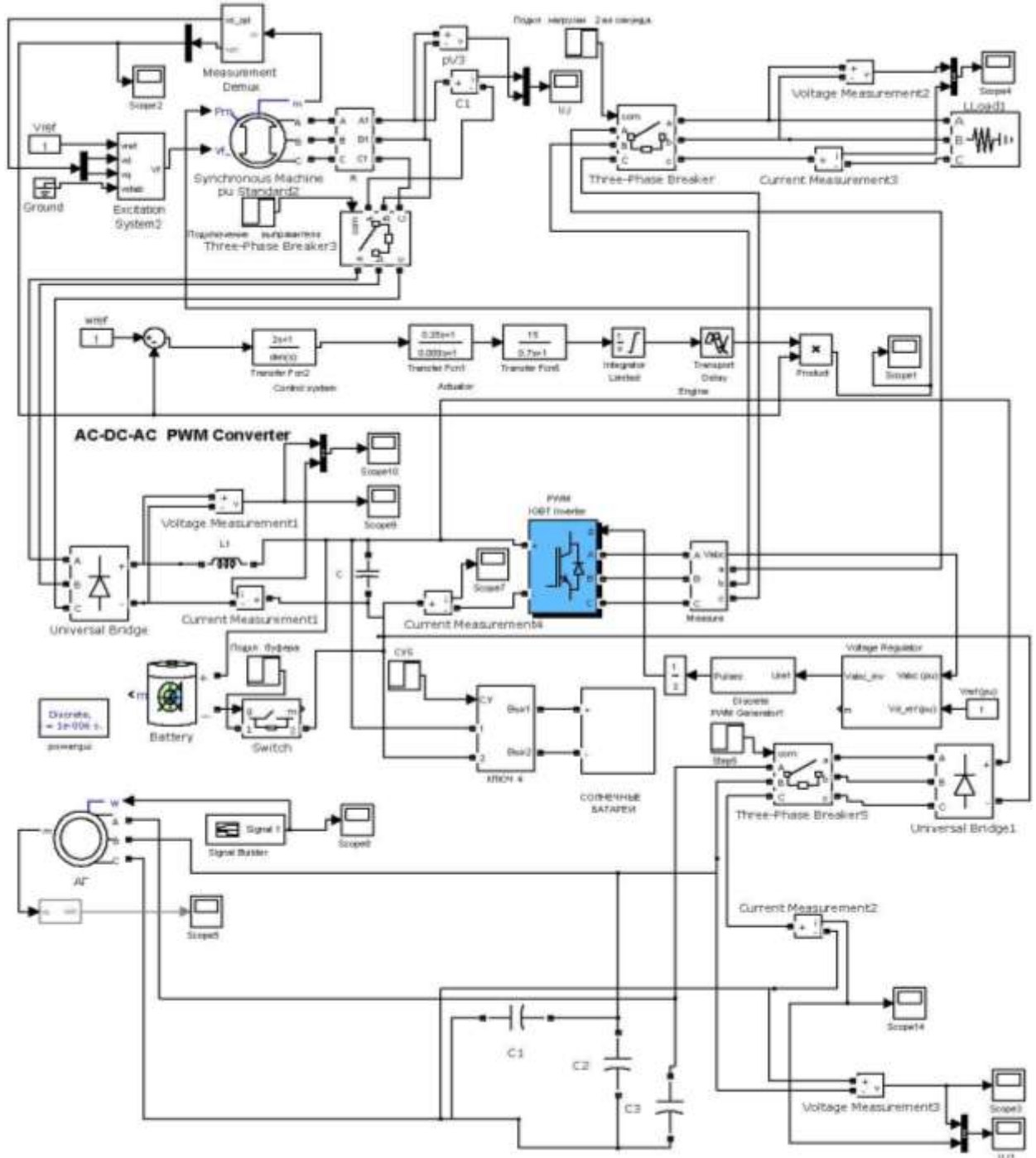


Рисунок 2 – Имитационная модель СЭЭС

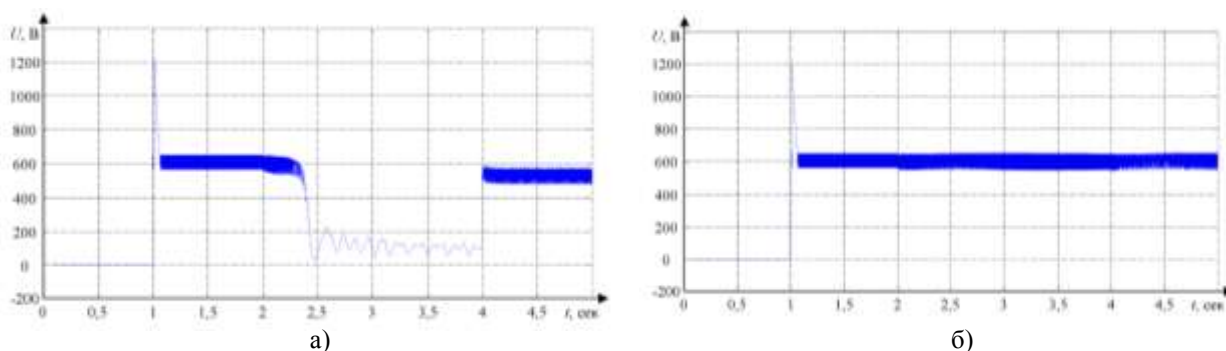


Рисунок 3 – Диаграммы напряжений в звене постоянного тока без буферного накопителя (а) и с буферным накопителем (б)

Таким образом, 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.

#### Список литературы:

1. Современные тенденции использования энергии ветра на судах О.С.Хватов, О.А. Бурмакин, Ю.С. Малышев, Ю.В. Варечкин / труды 15-го Международного научно-промышленного форума «Великие реки - 2013». Труды конгресса. -Н.Новгород: ФБОУ ВПО "ВГАВТ", 2013.- Т.2.- с. 386-390.
2. Возобновляемые источники энергии в судовой электроэнергетической системе/ О.А. Бурмакин, Ю.В. Варечкин, Ю.С. Малышев / Вестник ВГАВТ.- Н.Новгород.- 2015.- №42.- С. 263-268.
3. Hansen, J. F., Lindtjorn, J. O., Myklebust T. A., Vanska, K. Onboard DC Grid., [https://library.e.abb.com/public/b4f3f099e9d21360c1257a8a003beac2/ABB%20Generations\\_20%20Onboard%20DC%20grid.pdf](https://library.e.abb.com/public/b4f3f099e9d21360c1257a8a003beac2/ABB%20Generations_20%20Onboard%20DC%20grid.pdf).
4. Исследование режимов работы судовой электроэнергетической системы двойного рода тока. / О.А. Бурмакин, Ю.С. Малышев, С.В. Попов, В.В. Гуляев. //Великие реки 2018: Материалы международной научно-методической конференции. ФГБОУ ВО «ВГУВТ». – Н.Новгород: ФБОУ ВПО "ВГАВТ", 2018.- Т.2.

## IMITATION MODEL OF SHIPPING POWER PLANT WITH INTEGRATED DC MAINS

Yuriy. S. Malyshev, Oleg.A. Burmakin, Sergey.V. Popov

*Abstract. The article discusses the feasibility of using a built-in DC network in ship power systems when operating renewable energy sources. A simulation model is proposed to study the operation of systems with a built-in DC network and renewable energy sources. It is shown the need to connect the buffer storage to the DC network to improve the quality of transients in dynamic modes.*

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