

## SIMULATION OF THE STABILIZER BOOST CIRCUIT FROM A CAPACITIVE STORAGE

**S. Y. Trudnev, A. A. Marchenko**

Kamchatka State Technical University, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russian Federation

*The problem of the quality of ship electrical energy is raised in the paper. The main reasons for the low quality of electric energy compared to the quality of power supply for onshore power systems are described. Along with the main problem of quality, the issue of possible integration of alternative sources of electric energy in the future is considered. To maintain the necessary parameters of the quality of electricity generated by the alternative energy sources, such as capacitive (ionistors, supercapacitors), it is proposed to apply integrated stabilizer schemes. A schematic diagram of a booster stabilizer based on flint keys is proposed and considered. The principle of output voltage stabilization using semiconductor switches (a bipolar transistor, a field-effect transistor, and a bipolar transistor with an isolated gate) is described. A schematic diagram of the operation of a booster voltage stabilizer from a capacitive source of electrical energy is proposed on the example of an ionistor. Based on the basic laws of electrical engineering, a mathematical model of an electric power source and a voltage stabilizer based on which the variables on which the level of voltage stabilization depends are determined has been developed. Based on the mathematical model of the stabilizer and the capacitive source, a simulation model is developed and studied in the MATLAB computer simulation environment. A positive effect is revealed in the application of the basic electrical circuit of an integrated voltage stabilizer from a capacitive source. To verify the conducted model studies based on the proposed circuit diagram, mock-up tests are performed. The results of computer simulation are compared with the results of the output parameters of mock-up tests, and the feasibility of using the proposed circuit solutions is proved. Based on the research conducted on a computer and a real model, a number of main conclusions are made.*

*Keywords: booster stabilizer, capacitive source, semiconductor key, simulation, key, inductance, circuit, system, electrical equipment.*

### For citation:

Trudnev, Sergei Yu., and Aleksei A. Marchenko. "Simulation of the stabilizer boost circuit from a capacitive storage." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.6 (2020): 1118–1127. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-6-1118-1127.

УДК 621.311:629.12

## МОДЕЛИРОВАНИЕ БУСТЕРНОЙ СХЕМЫ СТАБИЛИЗАТОРА ОТ ЕМКОСТНОГО НАКОПИТЕЛЯ

**С. Ю. Труднев, А. А. Марченко**

ФГБОУ ВО «КамчатГТУ», Петропавловск-Камчатский, Российская Федерация

*В статье рассмотрена проблема качества судовой электрической энергии. Описаны основные причины низкого качества электрической энергии по сравнению с качеством питания береговых электроэнергетических систем. Наряду с основной проблемой качества рассматривается вопрос возможной интеграции альтернативных источников электрической энергии в будущем. Для поддержания необходимых параметров качества электроэнергии, вырабатываемой альтернативными источниками энергии, например, емкостными (ионисторы, суперконденсаторы), предлагается применить схемы интегральных стабилизаторов. Предложена и рассмотрена принципиальная схема бустерного стабилизатора на основе кремневых ключей. Изложен принцип стабилизации выходного напряжения при помощи полупроводниковых ключей (биполярный транзистор, полевой транзистор и биполярный транзистор с изолированным затвором). Предложена принципиальная электрическая схема работы бустерного стабилизатора напряжения от емкостного источника электрической энергии на примере ионистора. Исходя из основных законов электротехники, разработана математическая модель источника электрической энергии и стабилизатора напряжения, на основе которых определены переменные, от которых зависит уровень стабилизации напряжения. На основе математической модели стабилизатора и емкостного источника разработана и ис-*

*следована имитационная модель в компьютерной среде моделирования MATLAB. Выявлен положительный эффект в применении принципиальной электрической схемы интегрального стабилизатора напряжения от емкостного источника. Для верификации проведенных модельных исследований на основе предложенной принципиальной электрической схемы проведены макетные испытания. Сопоставлены результаты компьютерного моделирования с результатами выходных параметров макетных испытаний, доказана целесообразность применения предложенных схемных решений. На основании проведенных исследований на компьютерной и реальной модели сделан ряд основных выводов.*

*Ключевые слова: бустерный стабилизатор, емкостной источник, полупроводниковый ключ, моделирование, ключ, индуктивность, схема, система, электрооборудование.*

**Для цитирования:**

*Труднев С. Ю. Моделирование бустерной схемы стабилизатора от емкостного накопителя / С. Ю. Труднев, А. А. Марченко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 6. — С. 1118–1127. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-6-1118-1127.*

### **Введение (Introduction)**

Первым судовым источником электрической энергии на морском транспорте в 1838 г. является аккумулятор, состоящий из трехсот двадцати гальванических элементов. За минувшие два столетия масса и габариты морских судов значительно увеличились, как и мощность электрических приводов. По мере развития уровня техники претерпели изменения также и источники получения электрической энергии: паровые, дизельные и атомные генераторы. С появлением дизель-генераторов гальваническая батарея перестала являться основным источником питания на судне, перейдя в категорию аварийного или резервного источника на судне.

В настоящее время глобальной проблемой является вопрос экологии. В связи с этим морским классификационным сообществом была разработана Конвенция MARPOL-73/78, требования которой направлены на предотвращение загрязнения окружающей среды судами. В альтернативных источниках питания: аккумуляторных батареях с улучшенными характеристиками, емкостных накопителях, солнечных батареях учтены необходимые экологические требования. Стоимость 1 кВт·ч производимой энергии некоторых из них даже ниже стоимости распространенных и опасных источников ядерных установок. В связи с этим во многих странах появились морские суда-электроходы. Судовая электроэнергетическая система таких судов включает минимальное количество дизельных установок, котлов, в них отсутствует главный двигатель, а движение судна (заменяя тем самым работу главного двигателя) обеспечивает сложный комплекс полупроводниковых преобразователей (стабилизаторов напряжения, инверторов), управляющих работой электродвигателей. Примером такого типа является рыболовное судно «Лагарт».

Основу современных альтернативных источников энергии составляют аккумуляторы, емкостные накопители, солнечные батареи, каждый из которых вырабатывает электроэнергию необходимого качества только в паре с различными преобразователями — инверторами или бустерными стабилизаторами. Неоспоримым является тот факт, что примерно через 30 лет альтернативные источники заменят более 40 % всех источников энергии. Основной проблемой таких источников является качество вырабатываемой ими электроэнергии. Из-за ограниченности пространства на морских судах, проектировщики вынуждены устанавливать источники электрической энергии с худшими характеристиками показателей качества по сравнению с береговыми источниками питания. Это привело к созданию Российским морским регистром судоходства требований к судовым источникам питания по параметрам качества вырабатываемой электрической энергии. К данной проблеме неоднократно обращались в своих работах ведущие специалисты в области судовой электроэнергетики: Г. Е. Кувшинов, А. П. Баранов и С. Е. Кузнецов [1]–[3]. При дальнейшем развитии альтернативных источников энергии, в частности интеграции их в судовые электроэнергетические системы, внедрение интегральных стабилизаторов в судовые сети позволит решить проблему качества судовой электроэнергии, улучшив ее параметры как минимум до параметров береговых сетей. В данной статье предлагается исследовать работу емкостного

накопителя электрической энергии через бустерный стабилизатор напряжения в режиме разряда на компьютерной модели в среде имитационного моделирования *MATLAB*.

### Методы и материалы (Methods and Materials)

Для моделирования систем конкретного назначения — электротехнических и энергетических объектов — существует специальный пакет Sim Power Systems (SPS), который является частью комплекса программ среды *MATLAB*. Область применения пакета SPS очень широкая: от анализа отдельных электрических кругов до моделирования линий электропередачи, систем электроприводов и сложных процессов в мощных энергетических системах. Пакет SPS работает на базе Simulink и органично взаимодействует с ним, используя ту же программную среду, графический интерфейс и браузер библиотек. Поэтому при моделировании электроэнергетических устройств имеется возможность использования преимуществ обоих пакетов.

Simulink создан для моделирования динамических систем, представленных в виде функциональной или структурной схемы. Модели в данном пакете могут изображать процессы любой физической природы. Один и тот же блок пакета Simulink, в зависимости от специфики решаемой задачи, может являться функциональной моделью разных устройств. Соединительные линии между блоками Simulink показывают передачу информации или сигнала от одного элемента модели к другому, поэтому они имеют направление. В пакете SPS-блоки являются моделями разных элементов электрического круга или электромеханических устройств, а соединительные линии — это модели электрических проводников, начиная с версии *MATLAB* 6.5.1. При этом внешний вид блока близок к изображению элемента на принципиальной схеме. Таким образом, пакет SPS позволяет создать виртуальную модель, которая по своим свойствам приближена к реальному физическому объекту.

Соединение в одной модели блоков двух пакетов допускается при учете некоторых ограничений, а именно [1]–[3]:

1) порты Simulink-блоков предназначены для подключения только Simulink-сигнала, т. е. сигнала от другого блока пакета Simulink, при этом сигнал является безразмерным и имеет определенное направление, отмеченное стрелкой, а порт может быть или входным, или выходным;

2) порты SPS-блоков являются зажимами для включения в виртуальный электрический круг и могут быть присоединены только к соответствующим портам других SPS-блоков или к линии между этими блоками, при этом моделируется электрическое соединение элементов;

3) некоторые SPS-блоки имеют два вида портов: для SPS-сигнала и для Simulink-сигнала с соответствующей маркировкой. Такие блоки позволяют объединять элементы двух пакетов в одну общую модель.

Пакет Sim Power Systems совместно с Simulink дает возможности для создания имитационных моделей силовых полупроводниковых преобразователей и управляющих ими систем. Виртуальные модели, разработанные на основе этих двух пакетов, позволяют более детально изучить физические процессы превращения электроэнергии. Базовые элементы, предназначенные для моделирования полупроводниковых устройств, находятся в библиотеке Power Electronics.

*Режимы работы стабилизатора.* При проектировании стабилизаторов напряжения зачастую применяются линейные модели, в которых пульсирующие параметры стабилизатора заменяют усредненными значениями.

Рассмотрим схему замещения импульсного стабилизатора напряжения на рис. 1. На схеме ключ  $K$  делит работу схемы на два режима: в замкнутом и разомкнутом положении. Конденсатор  $C$ , подключенный параллельно ключу и нагрузке, работает в качестве фильтра. Дiode  $VD$  направляет энергию, накопленную в конденсаторе, непосредственно в нагрузку. Дроссель  $L$  в двух режимах работает по-разному. При замыкании ключа емкостной источник будет заряжать энергией дроссель. Ключ отсекает один контур схемы стабилизатора, поэтому в замкнутом положении источник будет взаимодействовать непосредственно с дросселем, заряжая его [4]–[7]:

$$U_L = L \frac{di_1}{dt};$$

$$di = \frac{U_L}{L} dt;$$

$$\int di = \int \frac{U_L}{L} dt;$$

$$i(t) = \frac{U_1}{L} t,$$

где  $U_L$  — напряжение на дросселе;  $i_1$  — ток заряда дросселя;  $L$  — индуктивность дросселя;  $U_1$  — напряжение заряда дросселя.

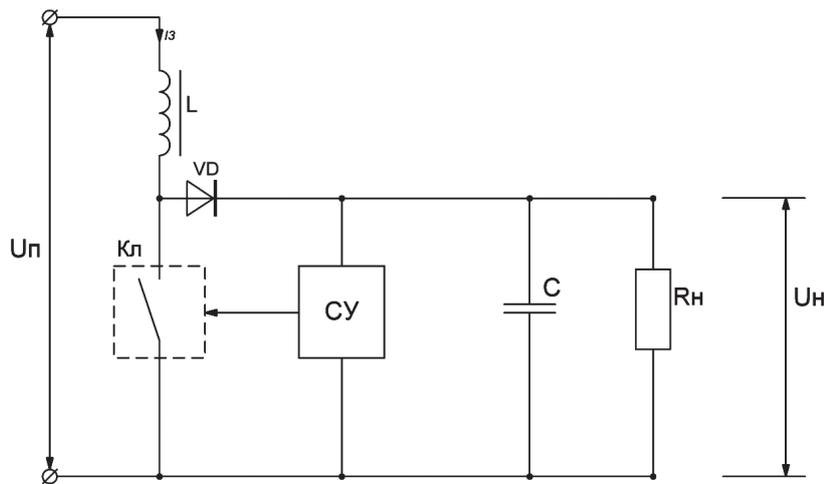


Рис. 1. Базовая схема бустерного стабилизатора

В следующем режиме работы стабилизатора ключ открывается, и энергия дросселя идет в нагрузку. Выходное напряжение суммируется с ЭДС самоиндукции, при этом выходное напряжение больше входного (рис. 2).

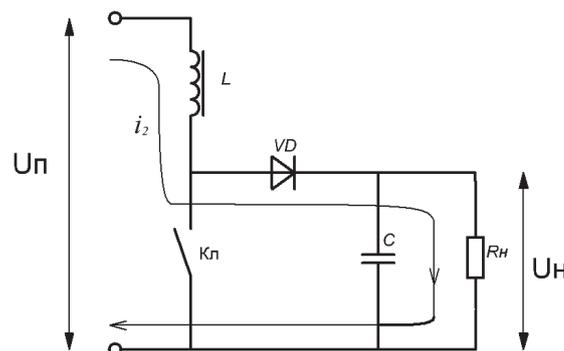


Рис. 2. Режим разряда дросселя

Таким образом, во втором режиме работы стабилизатора дроссель будет являться источником постоянного тока:

$$U_n = U_c = \frac{1}{C} \int idt = \frac{i_2 t_3}{C} + U_0.$$

где  $U_0$  — конечное напряжение заряда на конденсаторе;  $i_2$  — ток разряда;  $U_n$  — выходное напряжение.

Ток заряда  $i_1$  дросселя будет равен току разряда  $i_2$ :

$$i_1 = i_2;$$

$$\frac{U_n t_3}{L} + i_0 = \frac{(U_H - U_n) t_p}{L} + i_0;$$

$$\frac{U_n (t_3 + t_p)}{L} = \frac{U_H t_p}{L};$$

$$U_H = \frac{U_n (t_3 + t_p)}{t_p};$$

$$U_H = \frac{U_n T}{t_p}.$$

где  $U_n$  — входное напряжение;  $t_p$  — время разряда;  $t_3$  — время заряда.

Таким образом, настройка значения выходного напряжения  $U_H$  стабилизатора будет осуществляться регулированием значением индуктивности  $L$  дросселя.

*Режим разряда емкостного накопителя.* При разряде любого емкостного источника электрической энергии его напряжение изменяется [7]–[10], соответственно:

$$i = -\frac{dq}{dt}, \quad q = CU, \quad i = \frac{U}{R};$$

$$i = -C \frac{dU}{dt} = \frac{U}{R};$$

$$-C \frac{dU}{U} = \frac{dt}{R};$$

$$\int_{U_0}^U \frac{dU}{U} = -\frac{1}{RC} \int_0^t dt;$$

$$U = U_0 \cdot \exp\left(-\frac{t}{C \cdot R}\right);$$

$$U = U_0 \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right).$$

где  $q$  — заряд емкостного накопителя;  $C$  — емкость источника;  $t$  — время разряда;  $I$  — ток нагрузки;  $U_0$  — начальное напряжение.

Общая характеристика разряда емкостного накопителя на рис. 3 не позволяет применять накопитель как источник постоянного стабилизированного напряжения. При подключении к емкостному источнику энергии схемы стабилизатора выходного напряжения получится полноценный источник постоянного напряжения.

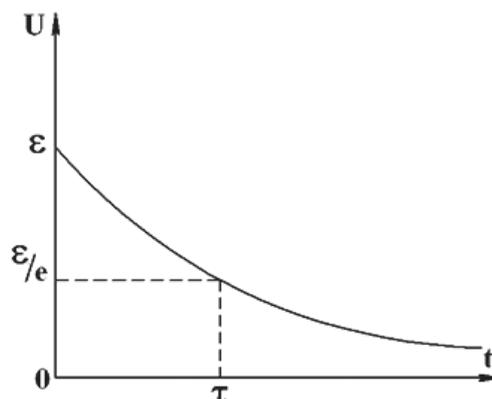


Рис. 3. Режим разряда емкостного накопителя

Анализируя выходное напряжение бустерного стабилизатора и выходное напряжение емкостного накопителя, получим

$$U_n = \frac{T}{t_p} U_0 \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right).$$

Представленные математические зависимости положены в основу компьютерной модели, реализованной в среде *MATLAB*.

### Результаты (Results)

В программе *MATLAB* Ra2007b для исследования основных режимов работы стабилизатора напряжения от емкостного накопителя разработана компьютерная модель (рис. 4). Данная модель стабилизатора напряжения собрана согласно принципиальной схеме (см. рис. 1) и состоит из следующих блоков: блока емкостного источника ( $C = 58\Phi$ ,  $U = 120$  В), IGBT, выполняющего функцию ключа, измерительных приборов и нагрузки.

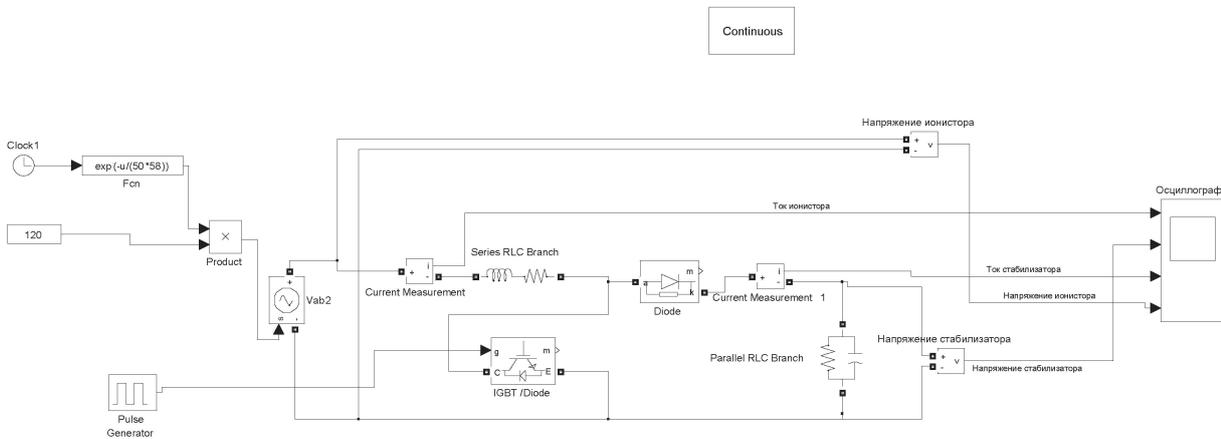


Рис. 4. Компьютерная модель бустерного стабилизатора

На рис. 5 приведены результаты моделирования.

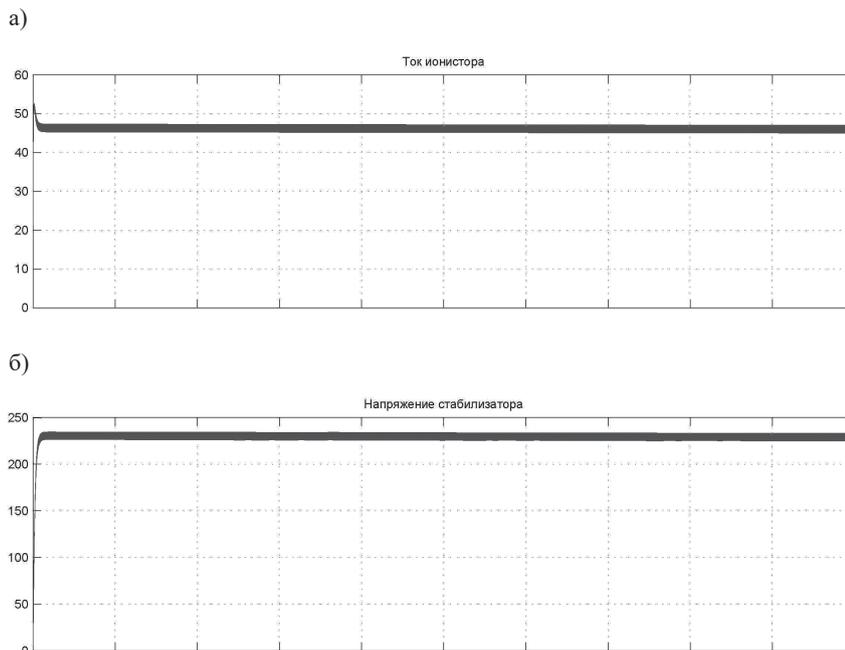


Рис. 5. Выходные характеристики стабилизатора напряжения от емкостного накопителя (Начало)

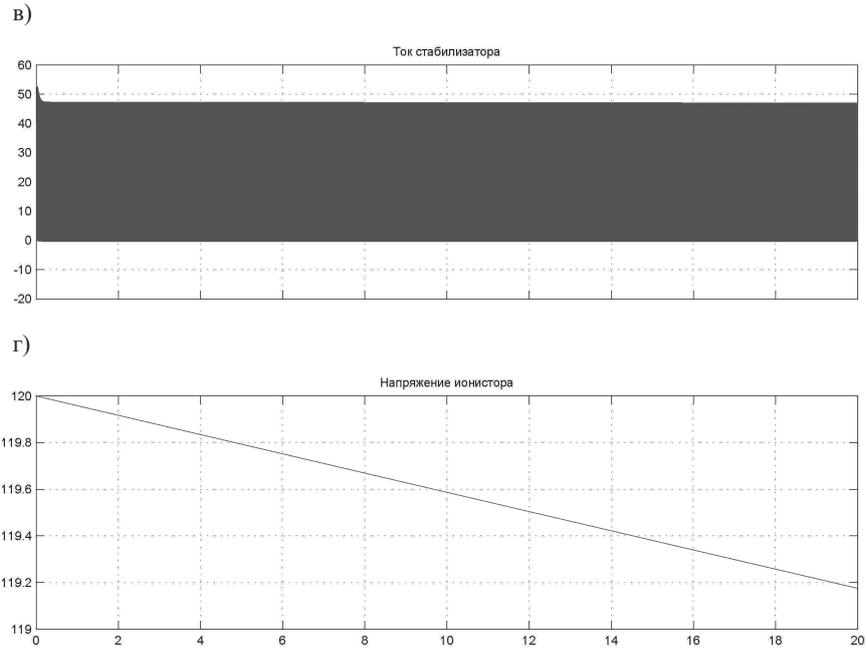
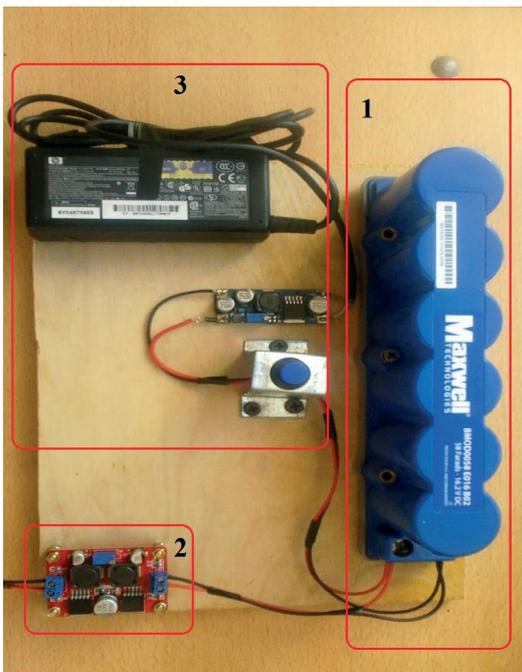


Рис. 5. Выходные характеристики стабилизатора напряжения от емкостного накопителя:  
а — ток источника; б — выходное напряжения стабилизатора;  
в — выходной ток стабилизатора; г — выходной ток источника

На основании результатов моделирования можно сделать вывод о работоспособности компьютерной модели. При снижении напряжения емкостного источника, поступающего на вход стабилизатора, напряжение на нагрузке практически не меняется и поддерживается на одном уровне, равном 230 В.

а)



б)

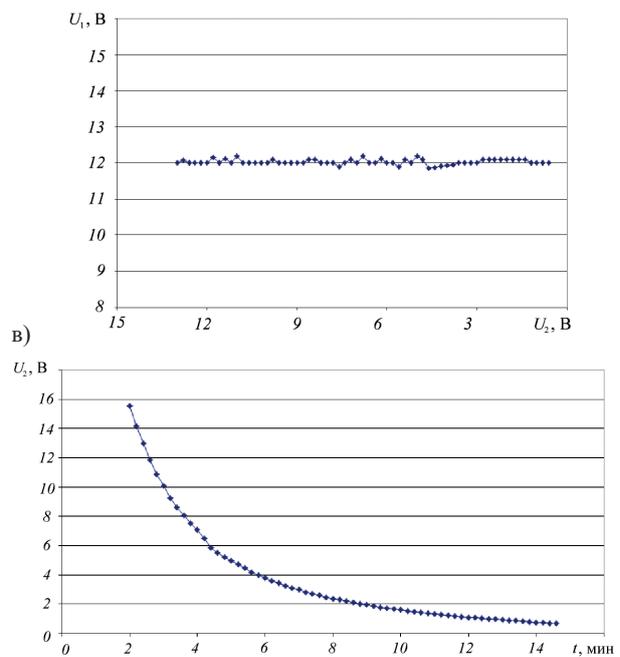


Рис. 6. Работа стабилизатора от емкостного накопителя: а — макет стабилизатора (1 — ионистор; 2 — бустерный стабилизатор напряжения; 3 — система заряда ионистора); б — выходная характеристика напряжения стабилизатора; в — напряжение на ионисторе

Для проверки адекватности компьютерной модели был разработан испытательный макет (рис. 6), включающий емкостной накопитель (ионистор) емкостью  $C = 58 \text{ Ф}$ , номинальным напряжением  $U = 12 \text{ В}$ , бустерный стабилизатор с максимальным входным и выходным напряжением,  $U = 40 \text{ В}$  и активно-индуктивной нагрузки (двигатель постоянного тока от системы охлаждения компьютера) потребляемой напряжением  $12 \text{ В}$ .

Из приведенных выходных характеристик стабилизатора и ионистора видно, что при даже при снижении напряжения на входе стабилизатора на  $10 \text{ В}$ , напряжение на выходе почти не изменилось. Натурный эксперимент подтверждает работоспособность компьютерной модели (см. рис. 4), собранной в *MATLAB*.

### Заключение (Conclusion)

В настоящее время существует множество программных пакетов, в том числе *MATLAB*, позволяющих разработать компьютерную модель практически любого электротехнического устройства. Разработанные компьютерные модели дают возможность заранее произвести сборку и запуск оборудования и на ранних этапах выявить недостатки, устранив их без материальных затрат. Особенно такие модели актуальны при проектировании дорогостоящих электротехнических систем. Результаты экспериментов в полной мере подтверждают адекватность работы предложенных моделей в программном пакете *MATLAB*.

На основании проведенных исследований компьютерных экспериментов можно сделать следующие выводы:

1. Приведенный в статье теоретический материал, а также изложенные математические выкладки дают возможность построить принципиальную схему полупроводниковых преобразователей в среде моделирования *MATLAB* при помощи программных пакетов Simulink и Sim Power Systems.
2. Разработанные компьютерные модели позволяют исследовать особенности работы в среде моделирования *MATLAB* при помощи пакетов Simulink и Sim Power Systems и устранить недостатки перед созданием реального макета.
3. Разработанные компьютерные модели в дальнейшем могут быть использованы при углубленном изучении современных бустерных стабилизаторов, что дает возможность провести испытания альтернативных схемных решений, оптимизировав и улучшив параметры схемы бустерного стабилизатора.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузнецов С. Е. Оценка качества электроэнергии на судне в процессе эксплуатации / С. Е. Кузнецов, Ю. В. Кудрявцев, А. А. Виноградов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 6. — С. 1320–1329. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-6-1320-1329.
2. Баранов А. П. Использование пакета Simulink для изучения и исследования переходных процессов в судовых электроэнергетических системах / А. П. Баранов, В. А. Федоренко // Эксплуатация морского транспорта. — 2007. — № 2 (48). — С. 46–47.
3. Горбенко Ю. М. Принцип действия и выбор параметров устройства для распределения реактивных токов судовых синхронных генераторов по методу ведущего генератора / Ю. М. Горбенко [и др.] // Научные труды Дальрыбвтуза. — 2007. — № 19. — С. 71–79.
4. Труднев С. Ю. Исследование параллельной работы ШИМ-инвертора и однофазной сети / С. Ю. Труднев // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 6 (28). — С. 60–66.
5. Труднев С. Ю. Исследование работы импульсного стабилизатора напряжения для питания катодной защиты морских платформ / С. Ю. Труднев, А. О. Шуваева // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 4. — С. 818–827. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-4-818-827.

6. Романовский В. В. Разработка гребного вентильно-индукторного двигателя для систем электро-движения большой мощности / В. В. Романовский, Б. В. Никифоров, А. М. Макаров // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 2. — С. 357–366. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-2-357-366.

7. Беляков А. И. Электрохимические суперконденсаторы: текущее состояние и проблемы развития / А. И. Беляков // Электрохимическая энергетика. — 2006. — Т. 6. — № 3. — С. 146–149.

8. Коробко Г. И. Накопители электроэнергии в стабилизаторах переменного напряжения для специальных судовых потребителей / Г. И. Коробко, С. В. Попов // Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. — 2005. — № 13. — С. 54–57.

9. Дубов С. Л. Регулирование напряжения и экономия электроэнергии в сетях низкого напряжения потребителей / С. Л. Дубов, В. М. Кириченко-Мишкин, К. Д. Курбанмагомедов // Системные технологии. — 2017. — № 1 (22). — С. 33–39.

10. Денисенко Е. А. Источники бесперебойного и автономного электроснабжения / Е. А. Денисенко, М. М. Тарасов, А. А. Кривошей, А. В. Бондарчук // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. — 2016. — № 115. — С. 1337–1349.

## REFERENCES

1. Kuznetsov, Sergey Ye., Yurii V. Kudryavtsev, and Andrei A. Vinogradov. “Estimation of electricity quality at the vessel in the operation process.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Mararova* 9.6 (2017): 1320–1329. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-6-1320-1329.

2. Baranov, A. P., and V. A. Fedorenko. “Ispol’zovanie paketa Simulink dlya izucheniya i issledovaniya perekhodnykh protsessov v sudovykh elektroenergeticheskikh sistemakh.” *Ekspluatatsiya morskogo transporta* 2(48) (2007): 46–47.

3. Gorbenko, Yu. M., V. V. Kiryukha, G. E. Kuvshinov, N. N. Mozaleva, and V. V. Mikhanoshin. “Printsip deistviya i vybor parametrov ustroystva dlya raspredeleniya reaktivnykh tokov sudovykh sinkhronnykh generatorov po metodu vedushchego generatora.” *Nauchnye trudy Dal’rybvтуza* 19 (2007): 71–79.

4. Trudnev, S. Yu. “Research of parallel work of PWM inverter and single-phase network.” *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova* 6(28) (2014): 60–66.

5. Trudnev, Sergey Yu., and Alena O. Shuvaeva. “The investigation of operation pulse voltage regulator for supplying cathodic protection of offshore rigs.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova* 10.4 (2018): 818–827. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-4-818-827.

6. Romanovsky, Viktor V., Boris V. Nikiforov, and Arsenii M. Makarov. “Development of the propulsion switched reluctance drive for the vessels with high power electric propulsion systems”. *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova* 11.2 (2019): 357–366. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-2-357-366.

7. Belyakov, A. I. “Elektrokhimicheskie superkondensatory: tekushchee sostoyanie i problemy razvitiya.” *Elektrokhimicheskaya energetika* 6.3 (2006): 146–149.

8. Korobko, G. I., and S. V. Popov. “Stores of the electric power in stabilizers of variable voltage for special ship consumers.” *Bulletin of VSAWT* 13 (2005): 54–57.

9. Dubov, S. L., V. M. Kirichenko-Mishkin, and K. D. Kurbanmagomedov. “Voltage regulation and energy saving in low voltage consumer networks.” *System Technologies* 1(22) (2017): 33–39.

10. Denisenko, Evgeniy Alexandrovich, Maxim Mihaylovich Tarasov, Alexandr Alexandrovich Krivoshey, and Andrey Viktorovich Bondarchuk. “Sources of uninterrupted and autonomous power supply.” *Polythematic online scientific journal of Kuban State Agrarian University* 115 (2016): 1337–1349.

**Труднев Сергей Юрьевич** —  
кандидат технических наук  
ФГБОУ ВО «КамчатГТУ»  
683980, Российская Федерация,  
г. Петропавловск-Камчатский, ул. Ключевская, 35  
e-mail: [trudnev@mail.ru](mailto:trudnev@mail.ru)

**Trudnev, Sergei Yu.** —  
PhD  
Kamchatka State Technical University  
35 Kluchevskaia Str., Petropavlovsk-Kamchatsky,  
683980, Russian Federation  
e-mail: [trudnev@mail.ru](mailto:trudnev@mail.ru)

**Марченко Алексей Александрович** —  
кандидат технических наук  
ФГБОУ ВО « КамчатГТУ»  
683980, Российская Федерация,  
г. Петропавловск-Камчатский, ул. Ключевская, 35  
e-mail: [Marchenko\\_alx@inbox.ru](mailto:Marchenko_alx@inbox.ru)

**Marchenko, Aleksei A.** —  
PhD  
Kamchatka State Technical University  
35 Kluchevskaia Str., Petropavlovsk-Kamchatsky,  
683980, Russian Federation  
e-mail: [Marchenko\\_alx@inbox.ru](mailto:Marchenko_alx@inbox.ru)

*Статья поступила в редакцию 6 ноября 2020 г.  
Received: November 6, 2020.*