

## DEVELOPMENT OF A COMPUTER MODEL OF A DC VOLTAGE SOURCE BASED ON A CAPACITIVE STORAGE

**S. Yu. Trudnev, A. A. Marchenko**

Kamchatka State Technical University, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russian Federation

*The operation of capacitive electronic storage devices of high power density in the discharge mode through a booster voltage regulator is discussed in the paper. This technical solution is proposed as a separate DC voltage source, which allows it to be used in the autonomous systems that have an alternative way of generating energy. The various booster voltage stabilizers operation, the basis of which is transistor switches, is also analyzed. The features of a step-up voltage regulator operation and the shortcomings of various circuit solutions for stabilizing the output voltage on pulsed sources are determined. The element base of the proposed circuit solution is considered in detail and the physical relationship between the elements of the circuit is described. A technical solution for the joint operation of a capacitive power source of high power density through a switching voltage stabilizer is proposed. A mathematical model of a capacitive electric energy storage device and a step-up voltage regulator based on transistor switches has been developed. Based on the mathematical model, a simulation model of the proposed system was developed and studied in the MATLAB modeling environment. The characteristics of the output voltage dependence on the operating time, as well as the load current, are investigated. The positive effect of the source and the voltage stabilizer joint work on the active load is revealed. Recommendations on the use of such systems are given. Generalized conclusions concerning the conducted research are made.*

*Keywords: capacitive storage, voltage stabilizer, filling factor, simulation, inductor, key, model, electrical energy.*

**For citation:**

Trudnev, Sergey Yu., and Aleksey A. Marchenko. "Development of a computer model of a DC voltage source based on a capacitive storage device." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 14.1 (2022): 140–149. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-1-140-149.

**УДК 621.3**

## РАЗРАБОТКА КОМПЬЮТЕРНОЙ МОДЕЛИ ИСТОЧНИКА ПОСТОЯННОГО НАПРЯЖЕНИЯ НА ОСНОВЕ ЕМКОСТНОГО НАКОПИТЕЛЯ

**С. Ю. Труднев, А. А. Марченко**

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

*В статье рассмотрена работа емкостных электронных накопителей высокой удельной мощности в режиме разряда через бустерный стабилизатор напряжения. Данное техническое решение предложено в виде отдельного источника постоянного напряжения, позволяющего применять его в автономных системах, имеющих альтернативный способ получения энергии. Проанализирована также работа различных бустерных стабилизаторов напряжения, основу работы которых составляют транзисторные ключи. Определены особенности работы повышающего стабилизатора напряжения и недостатки различных схемных решений по стабилизации выходного напряжения на импульсных источниках. Подробно рассмотрена элементная база предложенного схемного решения и описана физическая взаимосвязь между элементами схемы. Предложено техническое решение совместной работы емкостного источника питания высокой удельной мощности через импульсный стабилизатор напряжения. Разработана математическая модель емкостного накопителя электрической энергии и повышающего стабилизатора напряжения на базе транзисторных ключей. На основании математической модели разработана и исследована имитационная модель предложенной системы в среде моделирования MATLAB. Исследованы характеристики зависимости выходного напряжения от времени работы, а также ток нагрузки. Выявлен положительный эффект совместной работы источника и стабилизатора напряжения на активную*

нагрузку. Даны рекомендации по применению таких систем. Сделаны обобщенные выводы, касающиеся проведенного исследования.

*Ключевые слова:* емкостной накопитель, стабилизатор напряжения, скважность, моделирование, дроссель, ключ, модель, электрическая энергия.

**Для цитирования:**

Труднев С. Ю. Разработка компьютерной модели источника постоянного напряжения на основе емкостного накопителя / С. Ю. Труднев, А. А. Марченко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2022. — Т. 14. — № 1. — С. 140–149. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-1-140-149

**Введение (Introduction)**

Накопители электрической энергии имеют большое количество модификаций: от бумажных конденсаторов до полимерных аккумуляторов. В течение последних 20 лет спрос на автономные устройства (мобильные телефоны, планшеты, ноутбуки, альтернативные источники) значительно вырос, в связи с этим накопители электрической энергии претерпели большие изменения не только по параметрам емкости, массы, габаритов, но и по конструкции, а также по исполнению. До сих пор происходит модернизация накопителей, поскольку возможности автономных потребителей растут, а значит, растет их энергопотребление и, соответственно, разрабатываются все новые и новые накопители электрической энергии с увеличенной удельной мощностью и емкостью [1]–[4]. Одним из таких источников являются современные суперконденсаторы. Модификаций суперконденсаторов насчитывается большое количество: от бумажных до электролитических, но сопоставляя их с широко применяемой аккумуляторной батареей (данные приведены в таблице), можно сделать вывод о том, что суперконденсаторы занимают промежуточное значение.

**Сравнительная характеристика накопителей**

Параметры	Традиционные конденсаторы	Суперконденсаторы	Аккумуляторные батареи
1. Постоянная времени разряда $RC$ , с	Менее 0,1	0,1 ... 10	Сотни и тысячи
2. Удельная энергия, кДж/кг	До 0,5 (обычно 0,1 ... 0,2)	0,5 ... 70	> 100
3. Удельная мощность, кВт/кг	Десятки (в пиковом режиме)	До 17 (пиковая — 0,8 ... 2)	0,1 ... 0,5
4. Срок службы циклов, заряд–разряд	Млн	Млн	До 2000

Традиционные конденсаторы не накапливают достаточного количества энергии для того, чтобы обеспечить даже в небольшие промежутки времени маломощный потребитель, ввиду небольшой емкости и высоких токов саморазряда. Несмотря на то, что аккумуляторные батареи обладают высокой емкостью и низким саморазрядом, они имеют ограниченное количество циклов заряд-разряд и невысокую удельную мощность. Исходя из этого можно предположить целесообразность применения суперконденсаторов в качестве источников питания.

Однако стабильная работа потребителей зависит непосредственно от параметров выходного напряжения источника, от которого они работают [5]–[7]. Суперконденсатор относится к классу накопителей с высокой удельной мощности и в режиме разряда ток на нем необходимо ограничивать. Недостатком является спадающее выходное напряжение, поэтому для того, чтобы обеспечить суперконденсатор стабильным регулируемым выходным сигналом, необходимо подключать его через стабилизатор напряжения [6]–[9] и токовый ограничитель.

**Методы и материалы (Methods and Materials)**

*Повышающий стабилизатор постоянного напряжения.* Данный источник относится к импульсным источникам питания (ИИП) [1]–[4], которые работают за счет периодического прерывания постоянного напряжения, поступающего на вход. На рис. 1 приведена принципиальная схема ИИП. Элементом прерывания сигнала ИПП является управляемый ключ  $Sw$  (транзистор).

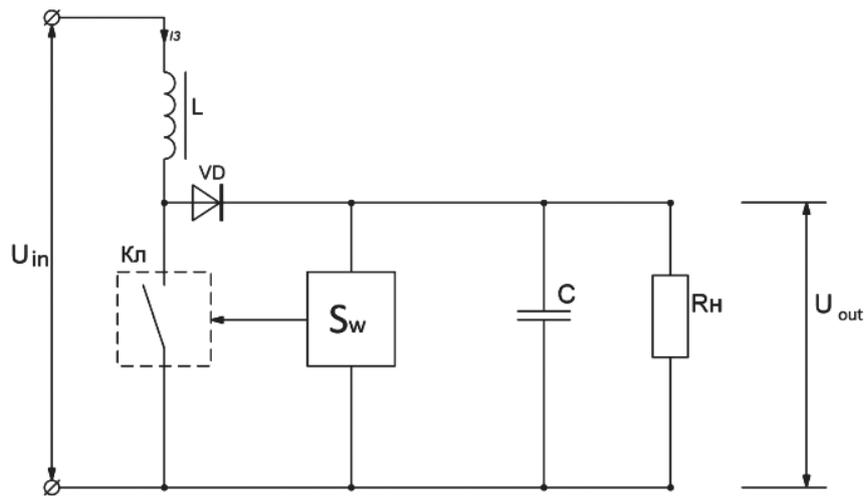


Рис. 1. Принципиальная схема повышающего ИИП

Постоянное переключение ключа на замыкание и размыкание создает на дросселе скачкообразное изменение напряжения, в результате чего возникает импульсный ток. На выходе схемы создается пульсирующее напряжение, значение которого растет гораздо выше входного. Соотношение длительности замкнутого состояния к длительности открытого состояния ключа определяется частотой работы воздействия на ключ.

*Идентификация параметров емкостного накопителя.* Рассмотрим схему разряда конденсатора (рис. 2), которая будет служить источником входного напряжения  $U_{in}$ .

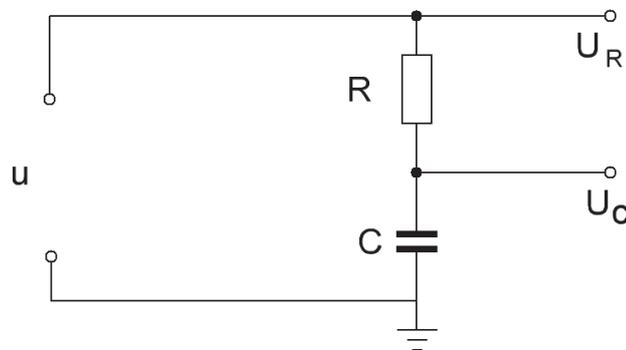


Рис. 2. Схема разряда емкостного накопителя

Разряд конденсатора регулируется через сопротивление  $R$ . Опишем математическую модель разряда емкостного накопителя. Исходя из принципиальной схемы на рис. 2, по закону Кирхгофа запишем

$$iR + U_C = u. \quad (1)$$

Напряжение на конденсаторе будет изменяться в зависимости от параметров заряда  $q$  и емкости конденсатора  $C$ :

$$U_C = \frac{q}{C}, \quad (2)$$

ток будет зависеть от изменения заряда во времени:

$$i = \frac{dq}{dt}. \quad (3)$$

Тогда

$$R \frac{dq}{dt} + U_c = u; \quad (4)$$

$$RC \frac{dU_c}{dt} + U_c = u. \quad (5)$$

Напряжение заряженного емкостного накопителя не изменяется, поэтому выполним его замену:

$$U = U_c - u; \quad (6)$$

$$RC \frac{dU}{dt} + U = 0; \quad (7)$$

$$\int RC \frac{dU}{U} = \int dt. \quad (8)$$

Проинтегрировав уравнение, получим

$$U_c(t) = U_0 \exp\left(-\frac{t}{CR}\right). \quad (9)$$

Параметр неопределенного коэффициента будет зависеть от начальных условий принципиальной схемы и равен начальному напряжению  $U_0$ . Тогда

$$U(t) = U_0 \exp\left(-\frac{t}{CR}\right), \quad (10)$$

После получения математической модели разряда емкостного накопителя можно перейти к разработке его компьютерной модели.

*Идентификация параметров бустерного стабилизатора.* Основными элементами, от которых будет зависеть работа стабилизатора напряжения, являются дроссель  $L$ , конденсатор  $C$ , диод  $VD$  и транзисторный ключ.

#### 1. Определение параметров дросселя $L$

Бустерный стабилизатор работает по двум фазам: заряд дросселя и его разряд на нагрузку. При разряде дросселя в цепь отдается мощность

$$P_n = i_n U_n = \frac{i U_n}{2}, \quad (11)$$

где  $U_n$  — напряжение, В;

$i_n$  — ток нагрузки, А.

Ток нагрузки зависит от значения тока заряда дросселя, ограниченного током  $i_3$ , изменяемого линейно по закону:

$$i_3 = \frac{t_3 U_n}{L}. \quad (12)$$

После преобразований получим

$$L_{\max} = \frac{U_n t_3^{\max} U_n}{2P_n}. \quad (13)$$

Исходя их формулы (13) видно, что значение  $L$  ограничивается мощностью нагрузки, поэтому значение индуктивности дросселя должно быть небольшим.

На рис. 3 дан график амперной характеристики дросселя. Поскольку ток  $i_0$  не изменяется, максимальный ток:

$$i_L^{\max} = i_0 + \frac{U_n^{\min} t_3^{\max}}{L_{\min}}. \quad (14)$$

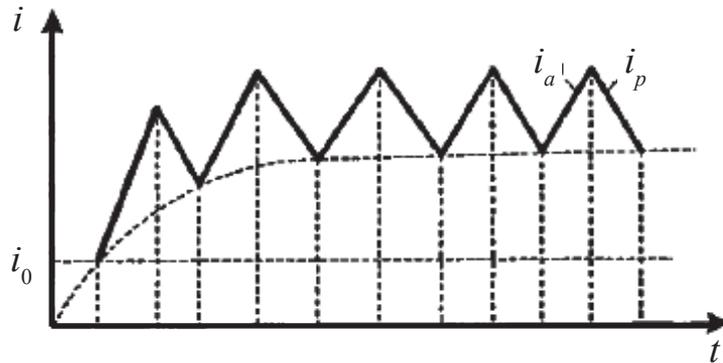


Рис. 3. Ток разряда дросселя

Пренебрегая током, получим

$$L_{\min} = \frac{U_n^{\min} t_3^{\max}}{i_L^{\max}}, \quad (15)$$

где  $i_L^{\max} = 2i_H i^{\max}$ .

Анализируя математическую модель зависимости индуктивности  $L$ , можно сделать вывод о том, что величина индуктивности дросселя имеет не только максимальный, но и минимальный порог и ограничивается параметрами транзисторного ключа в схеме стабилизатора. Мощность транзистора определяется формулой, исходя из его технических характеристик, согласно данным, приведенным в работах [1], [5]:

$$I_{VT} = i_L \sqrt{\frac{\gamma}{2}}, \quad (16)$$

Максимальная мощность стабилизатора определяется минимальным значением дросселя и мощностью транзисторного ключа. При определении параметров дросселя необходимо соблюдение следующих условий:

- максимальное значение  $L_{\max}$  зависит от  $t_3^{\max}$ ,  $U_H$ ,  $f$ ,  $P_H$ ,  $U_H^{\min}$ ;
- минимальное значение  $L_{\min}$  зависит от  $U_H^{\min}$ ,  $t_3^{\max}$ ,  $i_H$ ;
- значение  $L$  рекомендуется минимальным.

## 2. Определение параметров емкости $C$

Выходное напряжение формируется импульсами ключа и дросселя. В связи с этим в схеме стабилизатора наблюдается большое количество пульсаций, для устранения которых необходим емкостной фильтр  $C$ . Величина конденсатора будет зависеть от разряда дросселя  $L$ :

$$\Delta U_Q = \frac{Q}{C}, \quad (17)$$

где  $Q$  — величина заряда дросселя во время первой фазы;  
 $C$  — значение емкости конденсатора.

Величину заряда дросселя определим по формуле

$$Q = t_p i_p, \quad (18)$$

Зарядный ток определяется по формуле

$$i_3 = \frac{t_3 U_H}{LC}. \quad (19)$$

Тогда уровень пульсаций

$$\Delta U_Q = \frac{U_H t_3 t_p}{LC}. \quad (20)$$

Пренебрегая потерями, рассчитаем коэффициент пульсаций:

$$K_H = \frac{\Delta U_Q}{U_H} = \frac{U_H t_3 t_p}{U_H LC}, \quad (21)$$

Находим  $C$ :

$$C = \frac{U_H t_3 t_p}{U_H L K_H}, \quad (22)$$

Как видно из формулы (22), значение конденсатора не будет иметь порогового значения и задается в основном значением индуктивности дросселя.

### 3. Определение параметров диода VD

В качестве рабочего блокирующего диода в схеме стабилизатора используется диод Шоттки, технические характеристики которого зависят от рабочего тока и обратного напряжения.

### 4. Транзисторный ключ

В качестве транзисторного ключа бустерной схемы стабилизатора могут применяться полевые транзисторы *MOSFET* или биполярный транзистор *IGBT* [8], [10]. Технические характеристики транзистора будут определяться мощностью стабилизатора и значением индуктивности дросселя.

В процессе разработки компьютерной модели емкостного накопителя в большинстве случаев используются специализированные блоки пакета *Sim Power Systems*, расположенные в библиотеке *Extra Library*. Однако при анализе уравнения (10) составляем компьютерную модель накопителя при помощи функциональных элементов Clock, Fcn, Constant, Product пакета *Simulink* (рис. 4). Для моделирования постоянная времени  $\tau = 2900$  с, напряжение заряда накопителя  $U_0 = 100$  В.

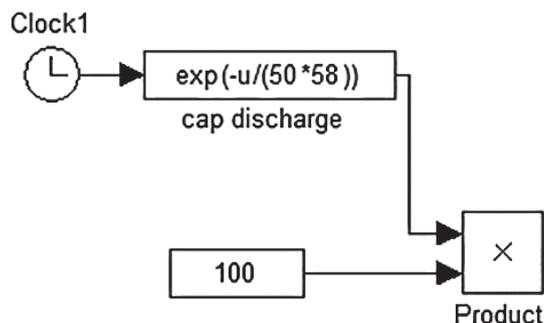


Рис. 4. Компьютерная модель емкостного накопителя

При запуске компьютерной модели с указанными характеристиками была получена осциллограмма выходного напряжения (рис. 5), из которой видно, что напряжение при разряде емкостного элемента изменяется экспоненциально, снижаясь более чем на 60 %.

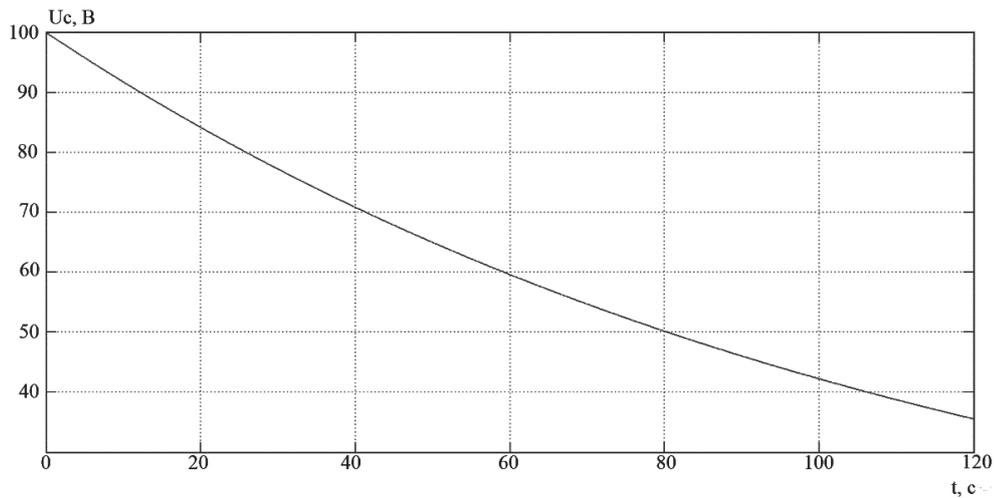


Рис. 5. Выходные характеристики емкостного элемента

### Результаты (Results)

При создании модели полупроводниковых преобразователей в роли систем управления можно использовать специализированные блоки пакета *Sim Power Systems*, расположенные в библиотеке *Control Blocks*. В некоторых случаях, когда ни один из готовых блоков не подходит, можно сложить систему из функциональных элементов пакета *Simulink*, задав математическую зависимость согласно физическому закону, по которому работает система.

Рассмотрим различные варианты реализации систем управления на примерах моделей нескольких наиболее распространенных превращающих устройств.

*Системы управления на основе Simulink-моделей.* Компьютерная схема ИПП с IGBT приведена на рис. 6.

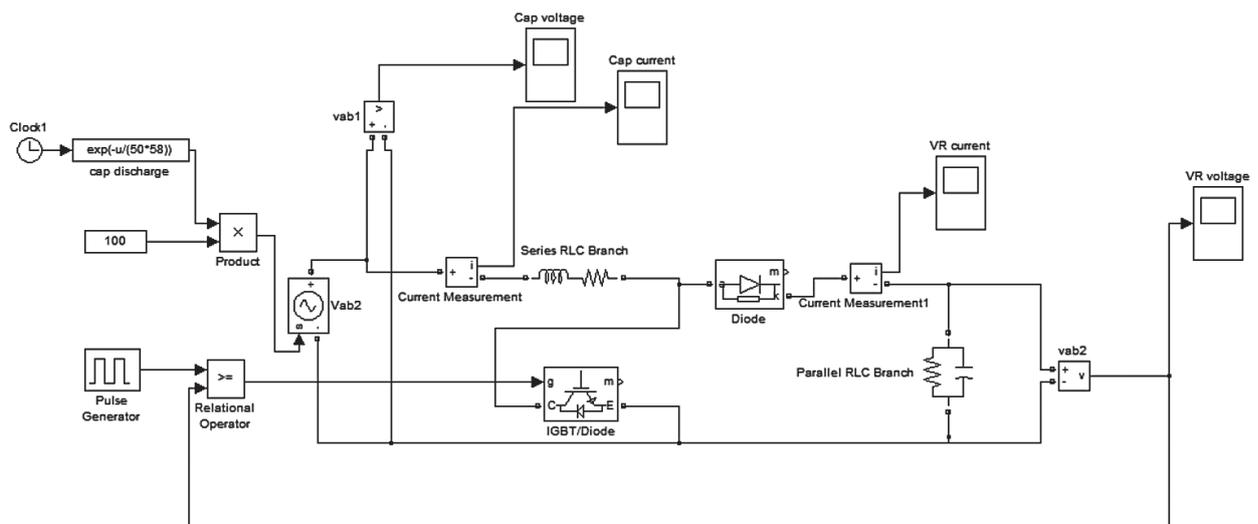


Рис. 6. Модель повышающего стабилизатора напряжения

В схеме рассматривается вариант преобразователя, в котором необходимо стабилизировать напряжение на выходе в пределах 210–240 В при спадающем напряжении на входе. В таком варианте в системе управления используется блок *Pulse Generator* [6], [7], который создает импульсы заданной частоты и ширины блок *Relational Operator*, выполняющий функцию обратной связи

с выходным напряжением и обрезает импульс, подаваемый на полупроводниковый ключ. В окне настройки блока задается период *Period* и ширина импульсов *Pulse Width*. Далее вычисляется частота  $f$  как величина, обратная периоду  $T$ , скважность сигнала задается в процентах в зависимости от периода. Тогда коэффициент определяется следующим образом:

$$\gamma = \frac{t_i}{t_i + t_n} = \frac{t_i}{T}, \quad (23)$$

где  $t_i$  — длительность импульса;

$t_n$  — длительность паузы.

Зависимость исходного напряжения  $U_{out}$  при заданном входном  $U_{in}$  рассчитывается согласно выражению:

$$\gamma = 1 - \frac{U_{in}}{U_{out}}. \quad (24)$$

В данном случае  $\gamma = 0,4$ . Следовательно, 40 % длительности всего периода транзистор находится в ведущем состоянии. Значение Phase Delay дает задержку генерирования определенного количества импульсов, на модели установлено значение «0». На рис. 7 показан ток дросселя и напряжение на нагрузке. Приведенные результаты моделирования показывают, что исходное напряжение  $U_{out}$  поддерживается стабилизатором на уровне 230 В при спадающем входном напряжении  $U_{in}$  = от 100 В до 30 В, что подтверждает работоспособность имитационной модели.

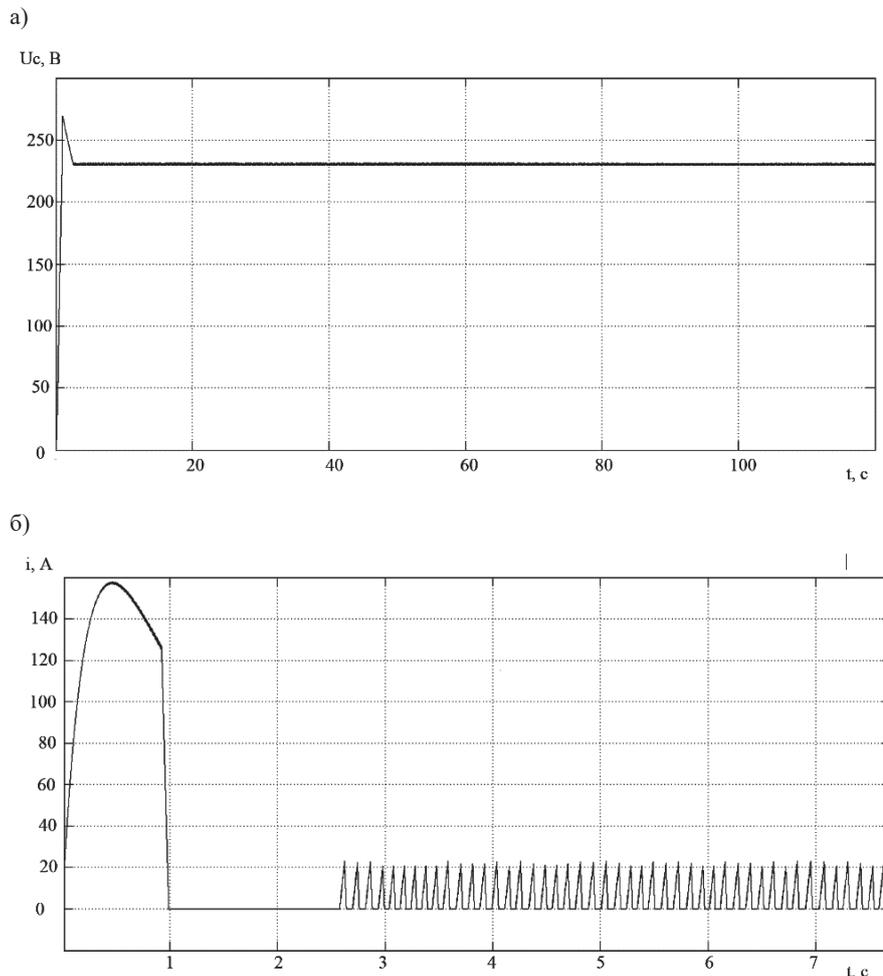


Рис. 7. Осциллограммы выходного сигнала:  
 а — напряжение на конденсаторе; б — ток дросселя

### Выводы (Summary)

Современные средства моделирования позволяют разработать компьютерную модель любого электронного или электротехнического прибора либо сложной системы. В ходе проведенных исследований были сформулированы дополнительные выводы:

1. Математический анализ теоретических положений и физических законов электротехники и электроники дают возможность смоделировать источник постоянного напряжения на основе мощного емкостного накопителя при помощи различных прикладных программ, в том числе среды моделирования *Matlab*.

2. Создание компьютерных моделей позволяет исследовать работу различных дорогостоящих или массогабаритных устройств и систем электроники, не прибегая к созданию реальных макетов, что дает возможность адекватно оценить недостатки и преимущества от устройства до сложного технического комплекса.

3. Разработанные компьютерные модели в дальнейшем могут быть использованы в учебном процессе обучающимися по электротехническим специальностям при изучении современных систем электроники.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Приходько В. М. Оценка интегральных характеристик электропотребления в судовых электроэнергетических системах с полупроводниковыми преобразователями / В. М. Приходько, И. В. Приходько // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 4. — С. 838–848. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-4-838-848.

2. Григораш О. В. Стабилизаторы напряжения постоянного тока / О. В. Григораш, М. А. Попучиева // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. — 2017. — № 129. — С. 1043–1056. DOI: 10.21515/1990-4665-129-074.

3. Баранов А. М. Сравнительный анализ современных стабилизаторов напряжения / А. М. Баранов // NovaInfo.Ru. — 2016. — Т. 2. — № 49. — С. 15–18.

4. Икромов М. М. Обзор стабилизатора напряжения на основе транзисторов в системах электроснабжения / М. М. Икромов, М. Я. Ибайдуллаев, Р. Ч. Каримов // Universum: технические науки. — 2021. — № 4–4 (85). — С. 89–92. DOI: 10.32743/UniTech.2021.85.4-4.89-92.

5. Григорьев А. В. Решение проблемы электромагнитной совместимости в электроэнергетических системах с полупроводниковыми преобразователями / А. В. Григорьев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2021. — Т. 13. — № 5. — С. 753–763. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-5-753-763.

6. Межаков О. Г. Математическая модель понижающего преобразователя напряжения / О. Г. Межаков // Молодой ученый. — 2015. — № 5 (85). — С. 171–176.

7. Norkhadzhayevich R. A. Operating mode of the stabilizer of current on active and inductive loading / R. A. Norkhadzhayevich, K. R. Choriyevich // European science review. — 2015. — № 9–10. — С. 140–143.

8. Choriyevich K. R. Research of the stabilizer of current taking into account the highest harmonics in systems of power supply / K. R. Choriyevich // European science review. — 2015. — № 9–10. — С. 144–146.

9. Приходько В. М. Резонансные явления в электроэнергетических системах с полупроводниковыми преобразователями при питании судов с берега / В. М. Приходько, М. Л. Ивлеев, И. В. Приходько // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2013. — № 3. — С. 28–34.

10. Балыкшов А. Ионисторы / А. Балыкшов // Электронные компоненты-Украина. — 2005. — № 11. — С. 91–97.

### REFERENCES

1. Prikhodko, Valentin M., and Irina V. Prikhodko. “Estimation of integral characteristics of energy consumption in marine power systems with semiconductor converters.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 9.4 (2017): 838–848. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-4-838-848.

2. Grigorash, Oleg Vladimirovich, and Maria Alexandrovna Popuchieva. "DC voltage stabilizers." *Polythematic online scientific journal of Kuban State Agrarian University* 129 (2017): 1043–1056. DOI: 10.21515/1990-4665-129-074.
3. Baranov, A.M. "Sravnitel'nyi analiz sovremennykh stabilizatorov napryazheniya." *NovaInfo.Ru* 2.49 (2016): 15–18.
4. Ikromov, Muslimbek, Mahmudjon Ibaydullaev, and Rakhmatillo Karimov. "Overview of voltage stabilizer based on transistors in power supply systems." *Universum: tekhnicheskije nauki* 4–4(85) (2021): 89–92. DOI: 10.32743/UniTech.2021.85.4-4.89-92.
5. Grigoryev, Andrey V. "Solving the problem of electromagnetic compatibility in electric power systems with semiconductor converters." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 13.5 (2021): 753–763. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-5-753-763.
6. Mezhakov, O. G. "Matematicheskaya model' ponizhayushchego preobrazovatelya napryazheniya." *Molodoi uchenyi* 5(85) (2015): 171–176.
7. Norkhadzhayevich, Rasulov Abdulkhay, and Karimov Rakhmatillo Choriyevich. "Operating mode of the stabilizer of current on active and inductive loading." *European science review* 9–10 (2015): 140–143.
8. Choriyevich, Karimov Rakhmatillo. "Research of the stabilizer of current taking into account the highest harmonicas in systems of power supply." *European science review* 9–10 (2015): 144–146.
9. Prikhod'ko, V. M., M. L. Ivleev, and I. V. Prikhod'ko. "The resonant phenomena in electrical power systems with semiconductor converters at platny of vessels from the coast." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 3 (2013): 28–34.
10. Balykshov, A. "Ionistory." *Elektronnye komponenty-Ukraina* 11 (2005): 91–97.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Труднев Сергей Юрьевич** —  
кандидат технических наук, доцент  
ФГБОУ ВО «КамчатГТУ»  
683003, Российская Федерация,  
г. Петропавловск-Камчатский, ул. Ключевская, 35  
e-mail: [trudnev@mail.ru](mailto:trudnev@mail.ru)  
**Марченко Алексей Александрович** —  
кандидат технических наук  
ФГБОУ ВО «КамчатГТУ»  
683003, Российская Федерация,  
г. Петропавловск-Камчатский, ул. Ключевская, 35  
e-mail: [Marchenko\\_alx@inbox.ru](mailto:Marchenko_alx@inbox.ru)

#### INFORMATION ABOUT AUTHORS

**Trudnev, Sergey Yu.** —  
PhD, associate professor  
Kamchatka State Technical University  
35 Klyuchevskaya Str., Petropavlovsk-Kamchatsky,  
683003, Russian Federation  
e-mail: [trudnev@mail.ru](mailto:trudnev@mail.ru)  
**Marchenko, Aleksey A.** —  
PhD  
Kamchatka State Technical University  
35 Klyuchevskaya Str., Petropavlovsk-Kamchatsky,  
683003, Russian Federation  
e-mail: [Marchenko\\_alx@inbox.ru](mailto:Marchenko_alx@inbox.ru)

Статья поступила в редакцию 3 февраля 2022 г.  
Received: February 3, 2022.