



РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА УПРАВЛЕНИЯ ПОВЫШАЮЩИМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ С ВОЗМОЖНОСТЬЮ ДИНАМИЧЕСКОЙ КОРРЕКЦИИ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

Иванов И.А., Котин Д.А.

Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия
i.a.ivanov@corp.nstu.ru, d.kotin@corp.nstu.ru

Резюме: АКТУАЛЬНОСТЬ исследования заключается в разработке алгоритма управления преобразователем постоянного напряжения, обеспечивающего качественный переходной процесс при широком изменении входных параметров объекта управления, влияющих на его нелинейные свойства. ЦЕЛЬ. Рассмотреть методы разработки непрерывных и дискретных систем управления повышающим преобразователем постоянного напряжения и получить аналитическую зависимость учета нелинейных свойств объекта управления, влияющих на качество регулирования выходного напряжения стабилизатора напряжения. МЕТОДЫ. В качестве метода расчёта коэффициентов системы управления преобразователем постоянного напряжения был выбран метод разделения движения, причем контур тока настраивается на технический оптимум, а контур напряжения на симметричный оптимум. Сравнение полученных аналитических решений математических моделей и имитационных моделей производилось в программной среде SimInTech. РЕЗУЛЬТАТЫ. Результаты моделирования показывают, что аналитическое решение математической модели системы стабилизации напряжения имеет меньшее время переходного процесса, чем результаты имитационного моделирования. Это объясняется тем, что в математической модели, по которой синтезировался непрерывный алгоритм управления, не учитывается наличие силового входного фильтра, а также степень предзаряда силовых конденсаторов. Из-за чего время переходного процесса в имитационных моделях протекает медленнее, примерно в 4 раза, чем в математической модели. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. При сравнении алгоритмов управления между собой видно, что алгоритм, полученный путем переоборудования непрерывного алгоритма методом Тустена имеет наименьшее время переходного процесса, чем остальные разработанные алгоритмы. Непрерывный алгоритм и алгоритм, полученный методом обратного преобразования Эйлера, имеют близкое к друг другу быстродействие, а самым медленным является алгоритм, полученный прямым преобразованием Эйлера.

Ключевые слова: синтез регулятора; ПИД-регулятор; самоподстройка; boost преобразователь; SimInTech; DC/DC преобразователь.

Для цитирования: Иванов И.А., Котин Д.А. Разработка алгоритма управления повышающим преобразователем с возможностью динамической коррекции параметров системы управления // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2024. Т.26. № 5. С. 79-91. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-5-79-91.

DEVELOPMENT OF A CONTROL ALGORITHM FOR A BOOST CONVERTER WITH THE POSSIBILITY OF DYNAMIC CORRECTION OF CONTROL SYSTEM PARAMETERS

Ivanov I.A., Kotin D.A.

Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia
i.a.ivanov@corp.nstu.ru, d.kotin@corp.nstu.ru

Abstract: RELEVANCE of the study lies in the development of an algorithm for controlling a DC voltage converter capable of providing a high-quality transient process with a wide

change in the input parameters of the control object, affecting its nonlinear properties. purpose. **THE PURPOSE.** To consider methods for the development of continuous and discrete control systems for a step-up DC voltage converter and to obtain an analytical dependence of accounting for the nonlinear properties of the converter that affect the quality of regulation of the output voltage of the voltage stabilizer **METHODS.** The method of the average geometric root was chosen as a method for calculating the coefficients of the DC voltage converter control system, and the current circuit is adjusted using the technical optimum method, and the voltage circuit using the symmetric optimum method. The obtained analytical solutions of mathematical models and simulation models were compared in the SimInTech software environment. results. **RESULTS.** The simulation results show that the analytical solution of the mathematical model of the voltage stabilization system has a shorter transition time than the simulation results. This is due to the fact that in the mathematical model according to which the continuous control algorithm was synthesized, the presence of a power input filter, as well as the degree of their precharge, is not taken into account. Because of this, the transition time on simulation models is slower, applied 4 times than in the mathematical model. conclusion. **CONCLUSION.** When comparing the algorithms with each other, it can be seen that the algorithm obtained by converting a continuous algorithm by the Tusten method has the shortest transition time than all other algorithms. The continuous algorithm and the algorithm obtained by the inverse Euler transformation method have a speed close to each other, and the algorithm obtained by the direct Euler transformation turns out to be the slowest.

Keywords: controller synthesis; PID controller; self-tuning; boost converter; SimInTech; DC/DC converter.

For citation: Ivanov I.A., Kotin D.A. Development of a control algorithm for a boost converter with the possibility of dynamic correction of control system parameters. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2024; 26 (5): 79-91. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-5-79-91.

Введение (Introduction)

Современные тенденции развития энергетики диктуют активное внедрение в систему электроснабжения принципов распределённой генерации с использованием возобновляемых источников энергии [1–5]. Системы электроснабжения выстроенные по выше озвученным признакам способны обеспечить высокую степень автономности и надежности функционирования системы электроснабжения. За счет использования принципа распределённой генерации и локального управления энергосистемой, выстроенной по принципу microgrid, данные комплексы могут иметь разную архитектуру. Применение возобновляемых источников энергии в системах электроснабжения вызывает необходимость в обеспечении синхронизации напряжения в узлах агрегации нескольких источников энергии [5, 6]. Наиболее популярной архитектурой microgrid является комплекс с общей шиной постоянного напряжения, пример структурной схемы которой представлен на рисунке 1.

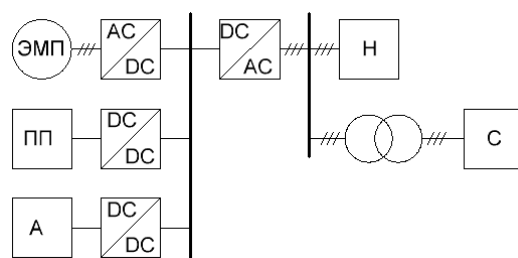


Рис. 1. Система электроснабжения с промежуточной шиной постоянного напряжения: ЭМП – электромеханический преобразователь, ПП – полупроводниковый преобразователь, А – аккумуляторная батарея, AC/DC – выпрямитель, DC/DC – преобразователь постоянного напряжения, DC/AC – инвертор, Н – нагрузка, С – сеть

Fig. 1. Power supply system with intermediate DC bus: EMF – electromechanical converter, PP – semiconductor converter, A – battery, AC/DC – rectifier, DC/DC – direct voltage converter, DC/AC – inverter, N – load, C – network

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Согласно рисунку 1, за счет того, что данная схема имеет общую шину постоянного тока, отсутствует необходимость в наличии систем управления, отвечающих за синхронизацию частоты, фазовой автоподстройки частоты. Данное решение позволяет объединять в единую энергетическую систему большое количество различных источников энергии и перераспределять между ними нагрузку, за счет чего происходит выравнивание значения выпрямленного напряжения на шине постоянного напряжения. Одной из задач при проектировании, создании и эксплуатации электротехнических комплексов, возникающей при создании энергетических агрегации, является стабилизация уровня напряжения, например, его повышение до требуемого значения.

В такого рода задачах используют стабилизатор напряжения, которым, например, может выступать преобразователь постоянного напряжения, выполненный по схеме boost преобразователя, представленной на рисунке 2 [7, 8].

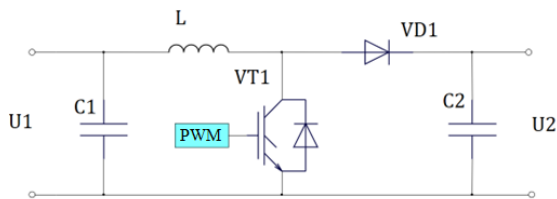


Рис. 2. Повышающий DC/DC преобразователь *Fig. 2. Boost DC/DC converter*

*Источник: Составлено авторами *Source: compiled by the author.*

Преимущество данной схемы перед другими схемами повышающих преобразователей заключается в простоте схемы, за счет чего упрощается организация управления полупроводниками и снижаются потери в системе [9, 10].

Литературный обзор (Literature Review)

Главной трудностью при использовании преобразователя постоянного напряжения является не топология схемы преобразователя, а метод выбора синтеза системы управления. Существует большое разнообразие методов синтеза системы управления преобразователем, но многие из них являются недостаточным в функциональном плане, с точки зрения организации качественных переходных процессов, а другие избыточными с точки зрения соотношения сложности расчета системы управления и требуемых вычислительных мощностей микропроцессора. Рассмотрим ряд методов синтеза систем управления для повышающего преобразователя, для более глубокого понимания степени развития методов синтеза. В большинстве случаев система управления для boost преобразователя основывается на применении ПИД регулятора, а именно, на ПИ-регуляторе [7, 11-15]. Главным отличием рассмотренных работ [7, 8, 11-15] является использование различных методик определения параметров регуляторов системы управления или обеспечение адаптивности системы управления. Так в работе [11] описана методика использования нечеткой логики для определения параметров регулятора алгоритма управления, что позволяет обеспечить работу регулятора в широком диапазоне изменений входного напряжения. В [12, 13] авторам предлагаются более традиционные способы определения коэффициентов регуляторов системы управления. В данных работах предлагается синтезировать регулятор классическим способом с использованием различных подходов к линеаризации объекта управления. А в работах [7, 11-15] рассматриваются более сложные методики, предполагающие наличие адаптивных подсистем в системе управления, определяющих режимы работы всей системы для корректировки параметров регулятора, например, функцией Ляпунова. Также в большом количестве работ рассматриваются разработки дискретных регуляторов [16-23]. Так, например, в работах [24-28] предлагаются к рассмотрению дискретные адаптивные регуляторы, полученные путем переоборудования линейного регулятора и его модификации.

Существует большое разнообразие вариантов синтеза регуляторов для систем стабилизации напряжения, начиная от простых одноконтурных систем, имеющих только контур стабилизации уровня напряжения, до многоконтурных с дополнительными подсистемами самонастройки, коррекции и контурами оптимизации.

В данной работе целью исследования предлагается рассмотреть разработку контура тока и контура напряжения boost преобразователя. Научной и практической значимостью работы являются анализ функционирования цифровых регуляторов, полученных путем переоборудования непрерывного регулятора, а также методика и

алгоритмы самонастройки регулятора для учета влияние нелинейного характера поведения стабилизатора.

Материалы и методы (Materials and methods)

Для реализации структурного и параметрического синтеза алгоритмов управления компонента электротехнического комплекса был произведен анализ поведения системы, а именно, проведя анализ поведения тока от соотношения длительности промежутков времени и величин напряжений была получена регулировочная характеристика, описывающая среднее значение тока, протекающего через дроссель [7, 8, 29-31]:

$$I_2 = \frac{1}{2lf_{\text{ШИМ}}} \frac{U_1^2}{U_2 - U_1} D^2, \quad (1)$$

где l – значение индуктивности дросселя,
 $f_{\text{ШИМ}}$ – частота ШИМ сигнала,
 D – скважность.

Из формулы (1) видно, что среднее значение тока имеет нелинейную зависимость от значения скважности транзистора. Для того чтобы учесть нелинейность в параметрах регулятора, можно использовать метод линеаризации малым приращением, который заключается в определении производной функции в рабочей точке:

$$K_{\text{лин}} = \left. \frac{dI_2}{dD} \right|_{D_0} = \frac{1}{lf_{\text{ШИМ}}} \frac{U_1^2}{U_2 - U_1} D_0, \quad (2)$$

где D_0 – значение скважности рабочей точки.

С учётом (2) и зависимостей, определяющих рабочую точку [2, 3], передаточная функция объекта управления будет представлять из себя пропорциональное звено:

$$W_{I_2}(s) = \frac{I_2(s)}{D(s)} = \frac{D_0}{lf_{\text{ШИМ}}} \frac{U_1^2}{U_2 - U_1} = \frac{1}{lf_{\text{ШИМ}}} \frac{U_1^2}{U_2}. \quad (3)$$

Для расчета системы управления произведём настройки по желаемой передаточной функции. Так как объект управления представлен в виде коэффициент пропорциональности, то для реализации астатический системы управления достаточно, чтобы регулятор представлял из себя только И-регулятор. На основании выше сказанного построим структурную схему контура тока (рис. 3).

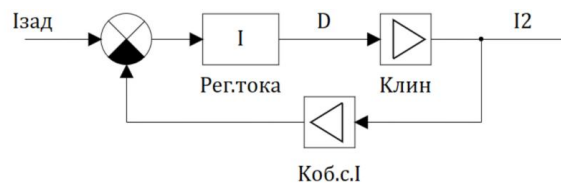


Рис. 3. Структурная схема регулятора тока

Fig. 3. Block diagram of the current regulator

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Помимо этого, так как данная система является дискретной системой регулирования, за счет использования в системе ШИМ, то необходимо выполнить условие теоремы Котельникова, или теоремы отсчёта, которая определяет соотношение постоянных времени системы регулирования с частотой ШИМ сигнала. Выполнение данной теоремы позволяет произвести расчет коэффициентов регуляторов, считая, что вся система линейна.

Передаточная функция контура имеет вид:

$$W_I(s) = \frac{K_{I2}^{-1}}{(K_{\text{лин}} K_{\text{ИИ}} K_{I2})^{-1} s + 1}, \quad (4)$$

где K_{I2} – коэффициент обратной связи по току,

$K_{\text{ИИ}}$ – коэффициент интегральной части регулятора.

Для выполнения теоремы отсчета определим новую частоту сопряжения системы управления:

$$\omega_{\text{ШИМ}} = 2\pi f_{\text{ШИМ}}, \quad (5)$$

$$\omega_I = \omega_{\text{ШИМ}} K_I^{-1} \quad (6)$$

где $\omega_{\text{ШИМ}}$ – циклическая частота ШИМ,

ω_I – частота сопряжения контура управления,

K_I – коэффициент разделения частот сопряжения, выбираемый при настройке регулятора.

После определения новой частоты сопряжения определим желаемую передаточную функцию:

$$W_I(s) = \frac{1}{\omega_I^{-1}s + 1}. \quad (7)$$

Приравняв соответствующие друг другу коэффициенты из (4) и (7), определим коэффициент интегрального звена

$$K_{II} = \omega_I (K_{I2} K_{лин})^{-1}. \quad (8)$$

Для определения $K_{лин}$, можно как произвести расчет его значения из функции, так и построить регулировочную характеристику и определить тангенс угла наклона касательной, используя уравнения (1) – (3).

Опираясь на все вышеописанные принципы и условия синтеза контура регулирования, проведем анализ данного контура. Так как постоянная времени у передаточной функции выходного фильтра (C2) преобразователя значительно больше постоянной времени контура тока, то исключив влияние аperiodической составляющей контура тока, можно оставить только пропорциональную часть данного звена, а именно значение коэффициента передачи звена.

В получившейся системе при использовании настройки на желаемую передаточную функцию можно воспользоваться ПИ-регулятором. С учётом этого получим структурную схему контура напряжения (рис. 4).

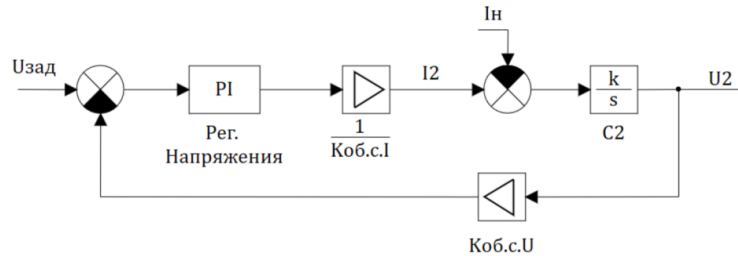


Рис. 4. Структурная схема контура напряжения Fig. 4. Block diagram of the voltage circuit

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Тогда передаточная функция контура напряжения имеет вид:

$$W_U(s) = \frac{K_{УП}(C_2 K_{I2})^{-1}s + K_{УИ}(C_2 K_{I2})^{-1}}{s^2 + K_{УП}K_{U2}(C_2 K_{I2})^{-1}s + K_{УИ}K_{U2}(C_2 K_{I2})^{-1}}, \quad (9)$$

где K_{U2} – коэффициент обратной связи по напряжению.

Для определения значения коэффициентов регулятора напряжения приравняем знаменатель передаточной функции (11) к нормированному полиному:

$$N(s) = s + A\omega_n s + \omega_n^2, \quad (10)$$

где A – коэффициент формы переходного процесса.

При использовании стандартной биномиальной настройки:

$$\omega_n = \omega_I K_U^{-1}, \quad (11)$$

$$A = 2. \quad (12)$$

На основании (9) – (12) производится расчет коэффициентов регулятора, приравниванием коэффициентов стоящий при s с одинаковыми степенями, получим:

$$K_{УИ} = K_{I2} C_2 \omega_n^2 K_{U2}^{-1}, \quad (13)$$

$$K_{УП} = A K_{I2} \omega_n K_{U2}^{-1}. \quad (14)$$

На основе зависимостей (13) и (14) произведём разработку регулятора напряжения.

Для компенсации возникновения нуля в системе, воспользуемся фильтром, где постоянная времени рассчитывается следующим образом:

$$K_\phi = K_{УП} K_{УИ}^{-1}. \quad (15)$$

Согласно описанной методике и зависимостям (9) – (15) был разработан регулятор уровня напряжения.

Для получения цифрового регулятора с учётом выше сказанного достаточно воспользоваться методом переоборудования. Данный метод заключается в том, что производится аппроксимация непрерывной функции, для получения точек решётчатой функции. В таблице 1 представлены формулы для расчёта параметров исследуемых регуляторов.

Таблица 1

Table 1

Параметры регуляторов

Parameters of regulators

Тип системы	Регулятор тока	Регулятор напряжения	
	И	П	И
Непрерывный регулятор	$\omega_I(K_{I2}K_{\text{лин}})^{-1}$	$A^2K_{I2}\omega_n K_{U2}^{-1}$	$K_{I2}C_2\omega_n^2 K_{U2}^{-1}$
Прямой метод Эйлера	$T_{\text{ШИМ}}\omega_I(K_{I2}K_{\text{лин}})^{-1}$	$A^2K_{I2}\omega_n K_{U2}^{-1}$	$T_{\text{ШИМ}}K_{I2}C_2\omega_n^2 K_{U2}^{-1}$
Обратный метод Эйлера	$T_{\text{ШИМ}}\omega_I(K_{I2}K_{\text{лин}})^{-1}$	$A^2K_{I2}\omega_n K_{U2}^{-1}$	$T_{\text{ШИМ}}K_{I2}C_2\omega_n^2 K_{U2}^{-1}$
Метод Тустена	$0,5T_{\text{ШИМ}}\omega_I(K_{I2}K_{\text{лин}})^{-1}$	$A^2K_{I2}\omega_n K_{U2}^{-1}$	$0,5T_{\text{ШИМ}}K_{I2}C_2\omega_n^2 K_{U2}^{-1}$

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author

Для того чтобы минимизировать ошибки измерения, вызванные наличием помех в канале обратной связи, было принято решение использовать усреднённое восьмикратное значение АЦП. Усреднение позволяет исключить как системную ошибку, так и псевдослучайную. Дискретная передаточная функция АЦП примет вид:

$$W_{\text{АЦП}} = 0,125 \times (1 + z^{-1} + z^{-2} + z^{-3} + z^{-4} + z^{-5} + z^{-6} + z^{-7}), \quad (16)$$

Использование дискретной передаточной функции АЦП (16) можно и в линейной системе, для достижения той же цели.

Проведя анализ синтеза системы управления для полупроводникового преобразователя, видно, что отсутствуют свойственный данным системам ограничивающие элементы, представленные виде звена насыщения. Наличие таких звеньев в системах с интегральными составляющими регулятора могут вызвать накопление ошибки на входе нелинейного звена, что в свою очередь может вызвать значительное ухудшение быстродействия системы. Поэтому было принято решение разработки компенсирующих и исключающих связей интегрального насыщения.

С учетом модификации регуляторов методами компенсирующих и исключающих связей интегральной составляющей, получим структуру регулятора, представленную на рисунке 5.

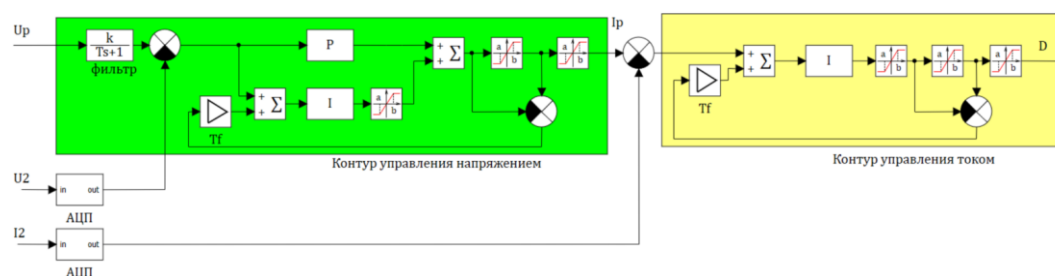


Рис. 5. Модифицированная система управления стабилизатором напряжения Fig. 5. Modified voltage stabilizer control system

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Результаты и обсуждение (Results and Discussions)

Для исследования работоспособности и качества функционирования компонента электротехнического комплекса, в различных режимах. работы предложенных алгоритмов управления в системе с повышающим стабилизатором напряжения была произведена разработка имитационной (математической) модели в программной среде SimInTech. Имитационная модель, представленная на рисунке 2, имеет следующие параметры: индуктивность дросселя равна 10 мкГн, ёмкости входного и выходного силовых фильтров равны 6000 мкФ, частота ШИМ 6 кГц, а номинальная активная мощность 60 кВт.

Рассмотрим работу системы с идеальным источником напряжения. Задача данного стабилизатора напряжения при значениях напряжения нижней стороны равных 140 В, 200 В, 260 В, 320 В, 380 В, 440 В поддерживать на вторичной стороне преобразователя 540 В при настройке длительности переходного процесса на 0,005 секунды. Предлагается рассмотреть два варианта функционирования преобразователя. Первый случай, система запускается с минимального значения напряжения нижней стороны равному 140 В и повышается с шагом в 60 В каждые 0.2 секунды с начального значения до максимального при величине полной нагрузки. Второй вариант

осуществляется при тех же условиях, но на каждом участке напряжения система вначале функционирует при мощности нагрузки равной половине от номинальной мощности (30 кВт), а спустя 0.1 секунды ступенчато переключается на полную мощность (60 кВт)

Результаты моделирования переходных процессов параметров системы представлены на рисунках 6-8.

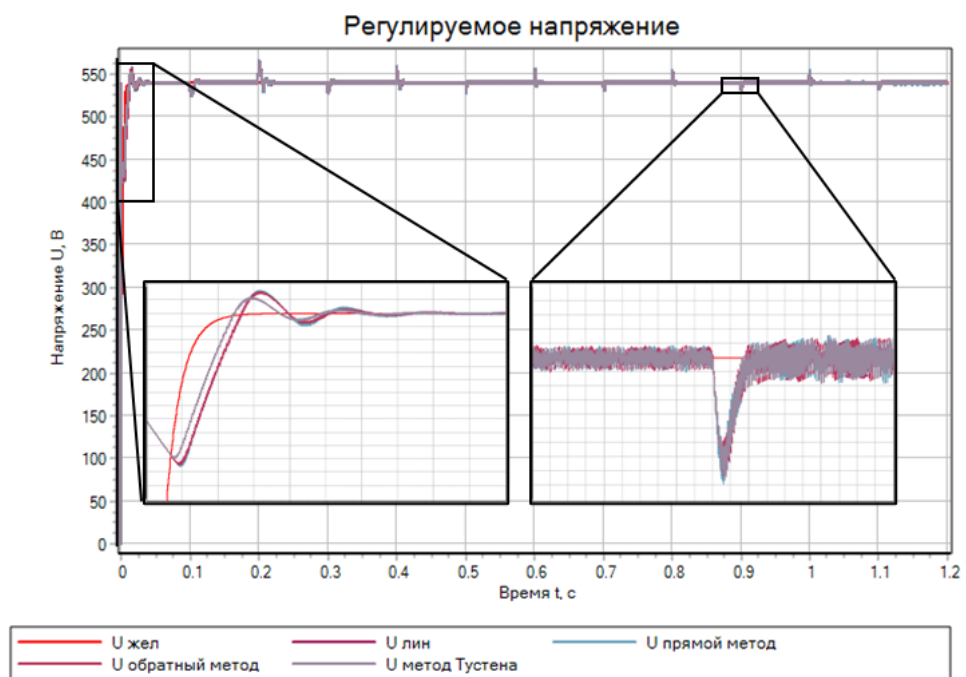
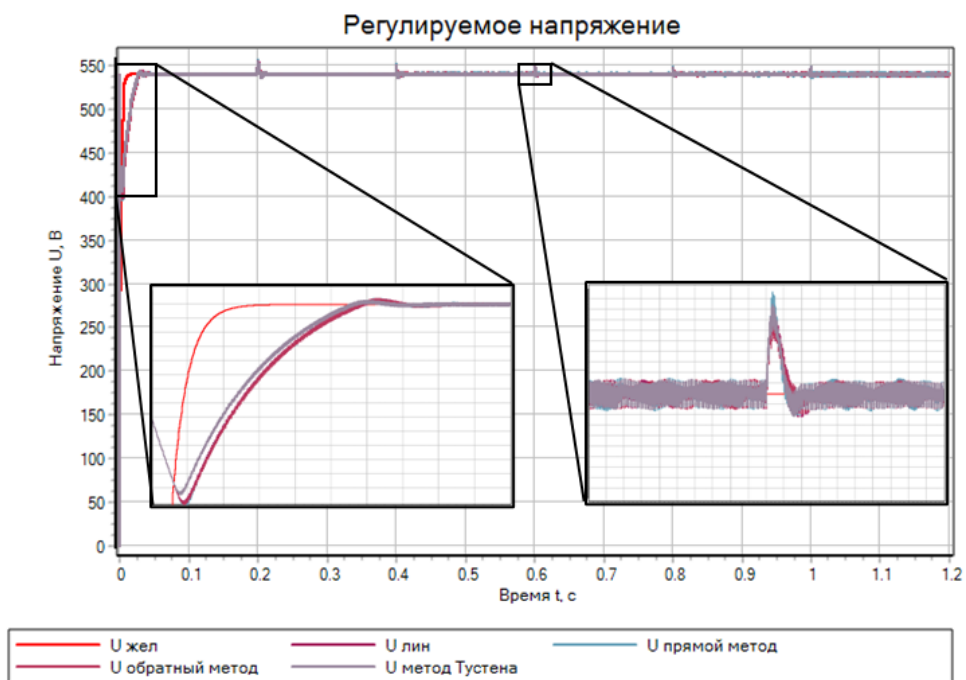


Рис 6. Выходное напряжение преобразователя
а) первый случай, б) второй случай

Fig.6 Converter output voltage
a) first case, b) second case

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

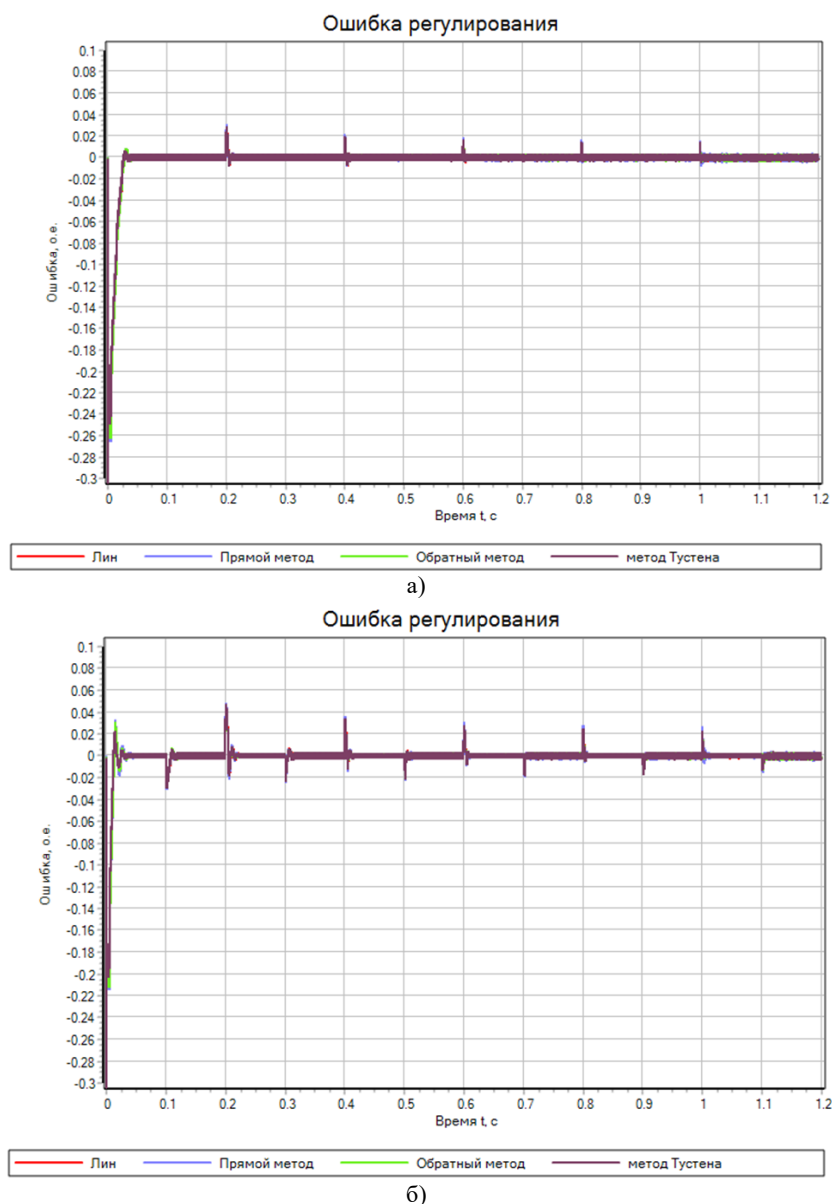


Рис 7. Ошибка регулирования
а) первый случай, б) второй случай

Fig. 7. Regulation Error
a) first case, b) second case

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Как видно из рисунков 6-8, время переходного процесса увеличилось в четыре раза относительно настроенного времени и стало достигать примерно 0.02 секунды. Это вызвано необходимостью системы обеспечить заряд как входного, так и выходного фильтра. Но в дальнейшем, когда система переходит в режим стабилизации напряжения, время переходного процесса стало стремиться к выбранному при настройке, согласно рисунку 6б, 7б, 8б.

Обеспечение одинакового быстродействия системы достигается тем, что происходит коррекция значения регулятора напряжения. Оно пересчитывается в зависимости от значений входного и выходного напряжения. Данная модификация системы управления позволяет использовать предложенные регуляторы в системах стабилизации напряжения, в которых присутствуют значительные колебания напряжений на входе преобразователя. Причем данный эффект достигается путем использования типового регулятора, без использования специфических сложных алгоритмов, которые приводят к усложнению системы.

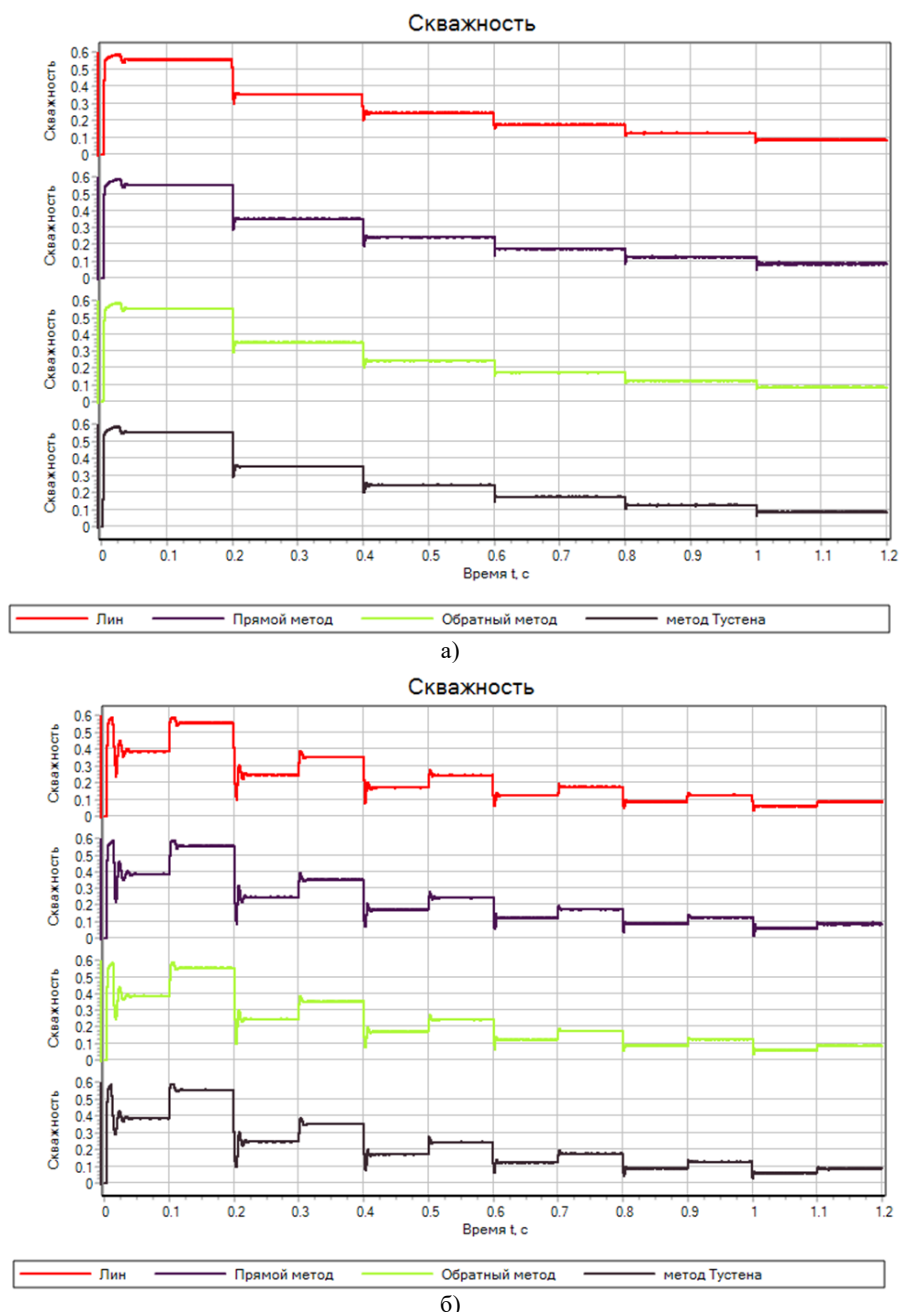


Рис 8. Задание на сквозность транзистора

а) первый случай, б) второй случай

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Fig. 8. Duty cycle of the transistor

a) first case, b) second case

Заклучение (Conclusions)

В данной работе предлагается методика синтеза двухконтурной системы управления для обеспечения стабилизации уровня напряжения на выходе повышающего преобразователя, выполненного по схеме boost преобразователя. Разработанный регулятор имеет в своей структуре две подсистемы. Первая подсистема отвечает за стабилизацию значения тока, вторая за стабилизацию значение напряжения на выходе преобразователя. Также реализована функция позволяющая учесть изменения значений входного и выходного напряжений для определения нового значения коэффициента линеаризации системы. За счет этого возможно применение данного регулятора в широком диапазоне изменения входного напряжения при обеспечении схожей динамики переходного процесса. Также рассмотрены дискретные модели регуляторов, полученные путём переоборудования непрерывного регулятора методом прямого и обратного преобразования Эйлера, а также методом Тустена. Было получено, что данные регуляторы глобально обеспечивают схожий переходной процесс по форме и по быстродействию, но, в частности, с точки зрения быстродействия, наилучшим результатом обладает регулятор, рассчитанный методом Тустена.

Литература

1. Olivares D.E. et al. Trends in Microgrid Control // IEEE Trans. Smart Grid. 2014. Vol. 5, № 4. P. 1905–1919.
2. Rezkallah M. et al. Microgrid: Configurations, Control and Applications // IEEE Trans. Smart Grid. 2019. Vol. 10, № 2. P. 1290–1302.
3. El-Shahat A., Sumaiya S. DC-Microgrid System Design, Control, and Analysis // Electronics. 2019. Vol. 8, № 2. P. 124.
4. Лукутин Б.В., Муравьев Д.И. Перспективы децентрализованных систем электроснабжения постоянного тока с распределённой солнечной генерацией // ИЗВЕСТИЯ ТОМСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА ИНЖИНИРИНГ ГЕОРЕСУРСОВ. 2020. Vol. 331, № 6. P. 184–196.
5. Муровский С.П., Курзо А.Н. Система Автономного Электроснабжения Удаленных Потребителей На Базе Возобновляемых Источников Энергии // УСПЕХИ СОВРЕМЕННОЙ НАУКИ. 2017. Vol. 6, № 3. P. 54–57.
6. Бычков О.В., Степанов Е.Е., Васенин С.Е. Стабилизированные энергоисточники для линейных потребителей нефтегазопроводов // ОПЕРАТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ ПОДГОТОВКА ПЕРСОНАЛА И ПОДДЕРЖАНИЕ ЕГО КВАЛИФИКАЦИИ. 2021. № 5. P. 25–36.
7. M. S. Simoiu, V. Calofir, S. S. Ilescu, I. Fagarasan and N. Arghira, "BOOST converter modelling as a subsystem of a photovoltaic panel control system," 2020 IEEE International Conference on Automation, Quality and Testing, Robotics (AQTR), Cluj-Napoca, Romania, 2020, pp. 1-6, doi: 10.1109/AQTR49680.2020.9129963.
8. D. P. Nam, B. M. Thang and N. T. Thanh, "Adaptive Tracking Control for a Boost DC – DC Converter: A Switched Systems Approach," 2018 4th International Conference on Green Technology and Sustainable Development (GTSD), Ho Chi Minh City, Vietnam, 2018, pp. 702-705, doi: 10.1109/GTSD.2018.8595580.
9. Gadekar S.D., Murali M. Optimizing Electric Vehicle Charging with Moth Flame Control Algorithm of Boost-KY Converter // Probl. Reg. Energ. 2023. № 4 (60). P. 126–140.
10. Hamasaki S., Mukai R., Tsuji M. Control of power leveling unit with super capacitor using bidirectional buck/boost DC/DC converter // 2012 International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA). 2012. P. 1–6.
11. M. Zerouali, A. El Ougli, B. Tidhaf and H. Zroui, "Fuzzy logic MPPT and battery charging control for photovoltaic system under real weather conditions," 2020 IEEE 2nd International Conference on Electronics, Control, Optimization and Computer Science (ICECOC), Kenitra, Morocco, 2020, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICECOC50124.2020.9314531.
12. Y. I. Son and I. H. Kim, "Complementary PID Controller to Passivity-Based Nonlinear Control of Boost Converters With Inductor Resistance," in IEEE Transactions on Control Systems Technology, vol. 20, N 3, pp. 826-834, May 2012, doi: 10.1109/TCST.2011.2134099.
13. J. Wang, S. Li, J. Fan and Q. Li, "Nonlinear disturbance observer based sliding mode control for PWM-based DC-DC boost converter systems," The 27th Chinese Control and Decision Conference (2015 CCDC), Qingdao, China, 2015, pp. 2479-2484, doi: 10.1109/CCDC.2015.7162338.
14. L. Roggia, F. Beltrame, J. E. Baggio and J. R. Pinheiro, "Digital control system applied to a PFC boost converter operating in mixed conduction mode," 2009 Brazilian Power Electronics Conference, Bonito-Mato Grosso do Sul, Brazil, 2009, pp. 698-704, doi: 10.1109/COBEP.2009.5347724.
15. M. Mosin, N. Popov, V. Anibroev, M. Vilberger, E. Domakhin, Engine power distribution system for four-wheel drive autonomous electric vehicle, Energy Reports, Volume 9, Supplement 1, 2023, Pages 115-122, ISSN 2352-4847, <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.10.388>.
16. M. Jang, M. Ciobotaru and V. G. Agelidis, "Design and Implementation of Digital Control in a Fuel Cell System," in IEEE Transactions on Industrial Informatics, vol. 9, N 2, pp. 1158-1166, May 2013, doi: 10.1109/TII.2012.2221724.
17. S. -K. Kim and C. K. Ahn, "Proportional-Derivative Voltage Control With Active Damping for DC/DC Boost Converters via Current Sensorless Approach," in IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, vol. 68, no. 2, pp. 737-741, Feb. 2021, doi: 10.1109/TCSII.2020.3008432.
18. D. Maksimovic and R. Zane, "Small-Signal Discrete-Time Modeling of Digitally Controlled PWM Converters," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 22, N 6, pp. 2552-2556, Nov. 2007, doi: 10.1109/TPEL.2007.909776.
19. L. V. Bellinaso, H. H. Figueira, M. F. Basquera, R. P. Vieira, H. A. Gründling and L. Michels, "Cascade Control With Adaptive Voltage Controller Applied to Photovoltaic Boost Converters," in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 55, N 2, pp. 1903-1912, March-April 2019, doi: 10.1109/TIA.2018.2884904.
20. Сафарзода, А. Х. Система управления напряжением автономной микросети

постоянного тока / А. Х. Сафарзода // Международный технико-экономический журнал. – 2019. – N 6. – С. 26-32. – DOI 10.34286/1995-4646-2019-69-6-26-32. – EDN XBSVTL.

21. Морозов, В. П. Система стабилизации постоянного напряжения для источника питания высотной привязной платформы-носителя / В. П. Морозов // Датчики и системы. – 2019. – N 2(233). – С. 57-64. – EDN VJMFCCG.

22. Красноборов, В. В. Моделирование работы системы вспомогательных машин с устройством стабилизации напряжения / В. В. Красноборов, С. В. Власевский // Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона. – 2020. – N 3(24). – С. 59-63. – EDN HTXXNU.

23. Маслов, А. Е. Система стабилизации напряжения в вентильном магнитоэлектрическом генераторе с реверсивным вольтодобавочным каналом / А. Е. Маслов, Г. С. Мыцык // Практическая силовая электроника. – 2021. – N 2(82). – С. 2-7. – EDN MZDIKA.

24. Коробко, Г. И. Разработка систем управления преобразователем частоты для дизель-генератора с изменяемой частотой вращения и их сравнительный анализ / Г. И. Коробко, М. П. Шилов, И. Г. Коробко // Вестник Чувашского университета. – 2019. – N 3. – С. 97-109. – EDN ZAQLAP.

25. Джендубаев, А. З. Р. Моделирование автономной электроэнергетической системы постоянного тока с полупроводниковыми трансформаторами / А. З. Р. Джендубаев, Ю. Г. Кононов, Э. А. З. Джендубаев // Электричество. – 2022. – N 7. – С. 24-39. – DOI 10.24160/0013-5380-2022-7-24-39. – EDN RBEOLN.

26. Автономная электроэнергетическая система на основе синхронного генератора с постоянными магнитами / Ю. Т. Портной, А. С. Авдеев, Е. В. Володин [и др.] // Электричество. – 2023. – N 4. – С. 17-28. – DOI 10.24160/0013-5380-2023-4-17-28. – EDN ZLHALU.

27. Системы стабилизации выходного напряжения синхронных генераторов / Е. А. Бирюкова, М. А. Подгузова, Д. А. Шевцов [и др.] // Практическая силовая электроника. – 2022. – N 2(86). – С. 26-31. – EDN XOSVFI.

28. Портной, Ю. Т. Регулировочная характеристика активного выпрямителя напряжения в составе автономной электроэнергетической системы при стабилизации напряжения синхронного генератора с постоянными магнитами / Ю. Т. Портной, А. С. Абдурагимов, Д. Э. Доброхотов // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – 2021. – Т. 182, N 3. – С. 3-6. – EDN WFBGYV.

29. Малёв Н.А., Мухаметшин А.И., Погодицкий О.В., Чичков П.В. Сравнительный анализ аппаратно-программного обеспечения метода контроля функционирования электромеханических преобразователей постоянного тока. Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2020;22(5):142-154. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2020-22-5-142-154>

30. Никулин О.В., Шабанов В.А. Компьютерная модель регулятора подачи долота на основе электродвигателя постоянного тока и ферропорошкового тормоза. Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2017;19(3-4):184-194. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2017-19-3-4-184-194>

31. Малёв Н.А., Погодицкий О.В., Козелков О.В., Малацион А.С. Цифровой алгоритм контроля функционирования электромеханического преобразователя постоянного тока. Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022;24(1):126-140. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2022-24-1-126-140>

Авторы публикации

Иванов Илья Алексеевич – ассистент кафедры Электропривода и автоматизации промышленных установок (ЭАПУ), Новосибирский государственный технический университет (НГТУ), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7189-8178>, i.a.ivanov@corp.nstu.ru

Котин Денис Алексеевич – канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедры Электропривода и автоматизации промышленных установок (ЭАПУ), Новосибирский государственный технический университет (НГТУ), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3879-3029>, d.kotin@corp.nstu.ru

References

1. Olivares D.E. et al. Trends in Microgrid Control // IEEE Trans. Smart Grid. 2014. Vol. 5, № 4. P. 1905–1919.

2. Rezkallah M. et al. Microgrid: Configurations, Control and Applications // IEEE Trans. Smart Grid. 2019. Vol. 10, № 2. P. 1290–1302.

3. El-Shahat A., Sumaiya S. DC-Microgrid System Design, Control, and Analysis // Electronics. 2019. Vol. 8, № 2. P. 124.

4. Lukutin B.V., Muravyov D.I. Prospects for decentralized DC power supply systems with distributed solar generation // NEWS OF THE TOMSK POLYTECHNIC UNIVERSITY GEORESOURCES ENGINEERING. 2020. Vol. 331, no. 6. pp. 184–196. (In Russ.)
5. Murovsky S.P., Kurzo A.N. System of Autonomous Power Supply to Remote Consumers Based on Possible Energy Sources // SUCCESS OF MODERN SCIENCE. 2017. Vol. 6, no. 3. pp. 54–57. (In Russ.)
6. Bychkov O.V., Stepanov E.E., Vasenin S.E. Stabilized energy sources for linear consumers of oil and gas pipelines // OPERATIONAL MANAGEMENT IN ELECTRIC POWER INDUSTRY TRAINING OF PERSONNEL AND MAINTAINING ITS QUALIFICATIONS. 2021. No. 5. pp. 25–36.7. (In Russ.)
7. M. S. Simoiu, V. Calofir, S. S. Iliescu, I. Fagarasan and N. Arghira, "BOOST converter modelling as a subsystem of a photovoltaic panel control system," 2020 IEEE International Conference on Automation, Quality and Testing, Robotics (AQTR), Cluj-Napoca, Romania, 2020, pp. 1-6, doi: 10.1109/AQTR49680.2020.9129963.
8. D. P. Nam, B. M. Thang and N. T. Thanh, "Adaptive Tracking Control for a Boost DC – DC Converter: A Switched Systems Approach," 2018 4th International Conference on Green Technology and Sustainable Development (GTSD), Ho Chi Minh City, Vietnam, 2018, pp. 702-705, doi: 10.1109/GTSD.2018.8595580.
9. Gadekar S.D., Murali M. Optimizing Electric Vehicle Charging with Moth Flame Control Algorithm of Boost-KY Converter // Probl. Reg. Energ. 2023. № 4 (60). P. 126–140.
10. Hamasaki S., Mukai R., Tsuji M. Control of power leveling unit with super capacitor using bidirectional buck/boost DC/DC converter // 2012 International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA). 2012. P. 1–6.
11. M. Zerouali, A. El Ougli, B. Tidfah and H. Zroui, "Fuzzy logic MPPT and battery charging control for photovoltaic system under real weather conditions," 2020 IEEE 2nd International Conference on Electronics, Control, Optimization and Computer Science (ICECOCS), Kenitra, Morocco, 2020, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICECOCS50124.2020.9314531.
12. Y. I. Son and I. H. Kim, "Complementary PID Controller to Passivity-Based Nonlinear Control of Boost Converters With Inductor Resistance," in IEEE Transactions on Control Systems Technology, vol. 20, N 3, pp. 826-834, May 2012, doi: 10.1109/TCST.2011.2134099.
13. J. Wang, S. Li, J. Fan and Q. Li, "Nonlinear disturbance observer based sliding mode control for PWM-based DC-DC boost converter systems," The 27th Chinese Control and Decision Conference (2015 CCDC), Qingdao, China, 2015, pp. 2479-2484, doi: 10.1109/CCDC.2015.7162338.
14. L. Roggia, F. Beltrame, J. E. Baggio and J. R. Pinheiro, "Digital control system applied to a PFC boost converter operating in mixed conduction mode," 2009 Brazilian Power Electronics Conference, Bonito-Mato Grosso do Sul, Brazil, 2009, pp. 698-704, doi: 10.1109/COBEP.2009.5347724.
15. M. Mosin, N. Popov, V. Anibroev, M. Vilberger, E. Domakhin, Engine power distribution system for four-wheel drive autonomous electric vehicle, Energy Reports, Volume 9, Supplement 1, 2023, Pages 115-122, ISSN 2352-4847, <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.10.388>.
16. M. Jang, M. Ciobotaru and V. G. Agelidis, "Design and Implementation of Digital Control in a Fuel Cell System," in IEEE Transactions on Industrial Informatics, vol. 9, N 2, pp. 1158-1166, May 2013, doi: 10.1109/TII.2012.2221724.
17. S. -K. Kim and C. K. Ahn, "Proportional-Derivative Voltage Control With Active Damping for DC/DC Boost Converters via Current Sensorless Approach," in IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, vol. 68, N 2, pp. 737-741, Feb. 2021, doi: 10.1109/TCSII.2020.3008432.
18. D. Maksimovic and R. Zane, "Small-Signal Discrete-Time Modeling of Digitally Controlled PWM Converters," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 22, N 6, pp. 2552-2556, Nov. 2007, doi: 10.1109/TPEL.2007.909776.
19. L. V. Bellinaso, H. H. Figueira, M. F. Basquera, R. P. Vieira, H. A. Gründling and L. Michels, "Cascade Control With Adaptive Voltage Controller Applied to Photovoltaic Boost Converters," in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 55, N 2, pp. 1903-1912, March-April 2019, doi: 10.1109/TIA.2018.2884904.
20. Safarzoda, A. Kh. Voltage control system for an autonomous DC microgrid / A. Kh. Safarzoda // International Technical and Economic Journal. – 2019. – N 6. – P. 26-32. – DOI 10.34286/1995-4646-2019-69-6-26-32. – EDN XBSVTL. (In Russ.)
21. Morozov, V. P. DC voltage stabilization system for the power source of a high-altitude tethered carrier platform / V. P. Morozov // Sensors and systems. – 2019. – N 2(233). – pp. 57-64. – EDN VJMFCG. (In Russ.)
22. Krasnoborov, V.V. Modeling the operation of a system of auxiliary machines with a voltage stabilization device / V.V. Krasnoborov, S.V. Vlasevsky // Transport of the Asia-Pacific Region. – 2020. – N 3(24). – pp. 59-63. – EDN HTXXNU. (In Russ.)

23. Maslov, A. E. Voltage stabilization system in a valve magnetoelectric generator with a reversible voltage boost channel / A. E. Maslov, G. S. Mytsyk // Practical power electronics. – 2021. – N 2(82). – P. 2-7. – EDN MZDIKA. (In Russ.)

24. Korobko, G. I. Development of control systems for a frequency converter for a diesel generator with variable speed and their comparative analysis / G. I. Korobko, M. P. Shilov, I. G. Korobko // Bulletin of the Chuvash University. – 2019. – N 3. – P. 97-109. – EDN ZAQLAP. (In Russ.)

25. Dzhendubaev, A. Z. R. Modeling of an autonomous electric power system of direct current with semiconductor transformers / A. Z. R. Dzhendubaev, Yu. G. Kononov, E. A. Z. Dzhendubaev // Electricity. – 2022. – N 7. – P. 24-39. – DOI 10.24160/0013-5380-2022-7-24-39. – EDN RBEOLN. (In Russ.)

26. Autonomous electric power system based on a synchronous generator with permanent magnets / Yu. T. Portnoy, A. S. Avdeev, E. V. Volodin [etc.] // Electricity. – 2023. – N 4. – P. 17-28. – DOI 10.24160/0013-5380-2023-4-17-28. – EDN ZLHALU. (In Russ.)

27. Systems for stabilizing the output voltage of synchronous generators / E. A. Biryukova, M. A. Podguzova, D. A. Shevtsov [et al.] // Practical power electronics. – 2022. – N 2(86). – P. 26-31. – EDN XOSVFI. (In Russ.)

28. Portnoy, Yu. T. Regulating characteristics of an active voltage rectifier as part of an autonomous electric power system when stabilizing the voltage of a synchronous generator with permanent magnets / Yu. T. Portnoy, A. S. Abduragimov, D. E. Dobrokhotov // Issues of Electromechanics. Proceedings of VNIEM. – 2021. – T. 182, N 3. – P. 3-6. – EDN WFBGYV. (In Russ.)

29. Malev N.A., Mukhametshin A.I., Pogoditsky O.V., Chichkov P.V. Comparative analysis of hardware and software of the monitoring method of functioning electromechanical DC converters. Power engineering: research, equipment, technology. 2020;22(5):142-154. (In Russ.) <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2020-22-5-142-154>

30. Nikulin O.V., Shabanov V.A. Computer simulation of a drilling bit feed rate regulator comprising of a dc motor. Power engineering: research, equipment, technology. 2017;19(3-4):184-194. (In Russ.) <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2017-19-3-4-184-194>

31. Malev N.A., Pogoditsky O.V., Kozelkov O.V., Malacion A.S. Digital algorithm monitoring functioning of electromechanical dc converter. Power engineering: research, equipment, technology. 2022;24(1):126-140. (In Russ.) <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2022-24-1-126-140>

Authors of the publication

Илья А. Иванов – Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia. *ORCID:* <https://orcid.org/0000-0001-7189-8178>, i.a.ivanov@corp.nstu.ru

Денис А. Котин – Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia. *ORCID:* <https://orcid.org/0000-0003-3879-3029>, d.kotin@corp.nstu.ru

Шифр научной специальности: 2.4.5. Энергетические системы и комплексы

Получено **16.05.2024 г.**

Отредактировано **22.07.2024 г.**

Принято **02.09.2024 г.**