

УДК 620.91:621.314

EDN LKHKBV

## ПОВЫШЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК DC/DC ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЗА СЧЕТ НАСТРОЙКИ ПИ-РЕГУЛЯТОРА НАПРЯЖЕНИЯ

**Д.А. Устинов**ORCID: 0000-0002-1302-0743 e-mail: [ustinovDA@pers.spmi.ru](mailto:ustinovDA@pers.spmi.ru)

Санкт-Петербургский горный университет

Санкт-Петербург, Россия

**В. Абдалла**ORCID: 0000-0002-9666-7330 e-mail: [abdallahwael80@gmail.com](mailto:abdallahwael80@gmail.com)

Санкт-Петербургский горный университет

Санкт-Петербург, Россия

**Е.Р. Шафхатов**ORCID: 0009-0009-5828-5348 e-mail: [ershat11@mail.ru](mailto:ershat11@mail.ru)

Санкт-Петербургский горный университет

Санкт-Петербург, Россия

Статья посвящена улучшению динамических характеристик преобразователя постоянного тока *SEPIC*. Представлены три различные модели преобразователя *SEPIC* для определения его передаточной функции. Порядок передаточной функции преобразователя уменьшен с 4-го до 2-го и до 1-го. В статье представлены два метода управления преобразователем. Первый основан на методе подбора параметров преобразователя (метод Николса-Циглера), а второй – на проектировании параметров ПИ-регулятора на основе управления внутренней модели (*Internal Model Control* – *IMC*). Кроме того, предлагается усовершенствование контроллера *IMC*. За счет снижения порядка передаточной функции преобразователя до второго порядка становится возможным использование ПИ-регулирования на основе *IMC*, что приводит к улучшению и упрощению управления.

**Ключевые слова:** *SEPIC*, источник питания, модель с уменьшенным порядком, ПИ-регулятор, преобразователь постоянного тока, силовая электроника, управление внутренней модели.

**Для цитирования:** Устинов Д.А., Абдалла В., Шафхатов Е.Р. Повышение динамических характеристик DC/DC преобразователя за счет настройки ПИ-регулятора напряжения // Интеллектуальная Электротехника. 2025. № 2. С. 71-92. EDN LKHKBV

## IMPROVING THE DYNAMIC CHARACTERISTICS OF DC/DC CONVERTER BY ADJUSTING VOLTAGE PI-CONTROLLER

**D.A. Ustinov**

ORCID: 0000-0002-1302-0743 e-mail: [ustinovDA@pers.spmi.ru](mailto:ustinovDA@pers.spmi.ru)

Saint Petersburg Mining University

*Saint Petersburg, Russia*

**V. Abdallah**

ORCID: 0000-0002-9666-7330 e-mail: [abdallahwael80@gmail.com](mailto:abdallahwael80@gmail.com)

Saint Petersburg Mining University

*Saint Petersburg, Russia*

**E.R. Shafhatov**

ORCID: 0009-0009-5828-5348 e-mail: [ershat11@mail.ru](mailto:ershat11@mail.ru)

Saint Petersburg Mining University

*Saint Petersburg, Russia*

**Abstract.** The article considers improving the dynamic characteristics of the SEPIC DC/DC converter. Three different models of the SEPIC converter are presented in order to determine its transfer function. The order of the converter's transfer function has been decreased from the 4th order to the 2nd order and to the 1st order. Two main methods for controlling the converter are used. The first one is based on the inverter parameter selection method (Nichols-Ziegler method), and the second method explains the steps of getting the PI-controller parameters based on Internal Model Control (IMC). In addition, an improvement to the PI-controller (IMC-based) is proposed. Reducing the order of the converter transfer function to the 2nd order allows the use of IMC-based PI control, which leads to improved and simplified control.

**Keywords:** SEPIC, power source, reduced order model, PI-controller, DC/DC converter, power electronics, reduced order model, internal model control.

**For citation:** D.A. Ustinov, V. Abdalla and E.R. Shafhatov, "Improving the dynamic characteristics of DC/DC converter by adjusting voltage PI-controller", *Smart Electrical Engineering*, no. 2, pp. 71-92, 2025. EDN LKHKBV

### I. Введение

Известно, что *DC/DC* преобразователи используются для регулирования входного напряжения постоянного тока, таким образом поддерживая стабильное выходное напряжение постоянного тока. Эти преобразователи с переключаемым режимом (*Switched Mode Power Supplies – SMPS*) намного эффективнее линейных источников питания и способны обеспечивать более высокую удельную мощность. Область применения

*SMPS* имеет широкий диапазон: от встроенных слаботочных систем до промышленных энергетических установок, комплексов возобновляемых источников энергии, а также в распределенной генерации и интеллектуальных электрических сетях. Например, для обеспечения электроснабжения территориально-удаленных объектов предприятий минерально-сырьевого комплекса: для геологоразведочных, геодезических и других видов работ, проводимых по разведке и подготовке месторождений полезных ископаемых [1-4]. Авторы [1, 2] рассматривают использование ИБП (источник бесперебойного питания) для горнодобывающих предприятий на основе их объединения с альтернативными и возобновляемыми источниками энергии и многоступенчатыми системами автоматического переключения резерва для обеспечения бесперебойного энергоснабжения потребителей горнодобывающих предприятий. Более того, с интеграцией возобновляемых источников энергии и развитием распределенной генерации объединение различных типов источников энергии в одну систему становится более распространенным [5, 6].

*DC/DC* преобразователи могут быть реализованы с помощью различных топологий схем [7]. Среди них основные и наиболее часто используемые преобразователи: *CUK*, *ZETA* и *SEPIC*. Различные типы топологий безмостовых преобразователей обсуждаются в [8-12], большинство из которых основаны на конфигурациях повышающих преобразователей. Их главное преимущество – невысокая стоимость. Однако у них есть следующие недостатки [13]: отсутствие изоляции ввода-вывода; высокий пульсирующий ток.

Главная особенность преобразователей *CUK*, *ZETA* и *SEPIC* состоит в том, что они могут работать в повышающем и понижающем режимах. В [14] приведены результаты сравнения указанных преобразователей. Показано, что преобразователь *CUK* имеет более высокий уровень импульсных шумов и длительность переходного процесса. Результаты *SEPIC* и *ZETA* практически идентичны.

В [13], [15] обсуждались преобразователи на основе различных топологий *SEPIC* и показана их способность преодолевать указанные выше проблемы с повышающими преобразователями. При сравнительном анализе работы различных *DC/DC* преобразователей в широком диапазоне мощностей в [14] выявлено, что при применении преобразователя *SEPIC* снижаются значения пульсаций, выбросов напряжения и обеспечивается изоляция ввода/вывода [16].

Регулирование выходного напряжения преобразователя *SEPIC* происходит путем управления рабочим циклом транзистора  $Q_1$  (рис. 1).

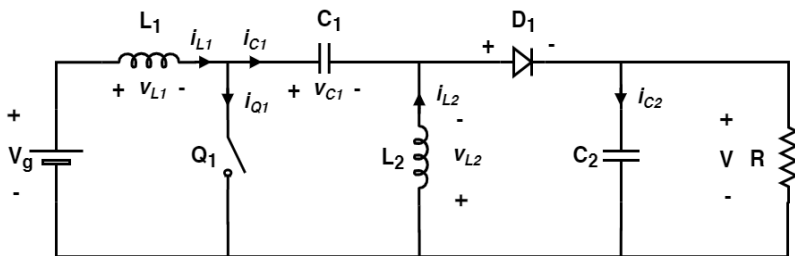


Рис. 1. Схема преобразователя SEPIC

Fig. 1. SEPIC converter schematic

ПИ- и ПИД-регуляторы успешно применяются при управлении *DC/DC* преобразователями. Параметры таких регуляторов рассчитываются с применением методики усредненной модели слабого сигнала, представленной в [17]. Параметры ПИ регулятора, представленного в работе, рассчитывается с помощью метода управления внутренней моделью.

Основная идея заключается в том, что достижение оптимального управления возможно, если система управления является представлением системы под управлением. При этом приведенная передаточная функция пониженного порядка будет использоваться ПИ-регулятором на основе *IMC* для получения своих параметров.

## II. Материалы и методы

Основная идея предлагаемого решения состоит в том, чтобы уменьшить порядок передаточной функции исходной модели преобразователя *SEPIC* и использовать ее характеристики для вывода параметров контроллера на основе *PI-IMC*. Для реализации этой стратегии анализируются операции под-интервалов работы преобразователя на основе метода, указанного в [17]. Затем выводится усредненная модель малого сигнала путем линеаризации модели пространства состояний преобразователя. После определения параметра конструкции, и использования *Matlab/Simulink* выводится передаточная функция модели. Используя аппроксимацию Паде, эта передаточная функция сводится к второму и первому порядкам. Были реализованы диаграмма Боде, корневой годограф и сравнение переходной характеристики между исходной передаточной функцией и выведенной.

После получения параметров контроллера с использованием метода Николса-Циглера и метода на основе *PI-IMC* проводится дальнейшее их сравнение с использованием *Matlab/Simulink*, чтобы показать, что поведение преобразователя с использованием предлагаемого метода более стабильно при изменениях входного напряжения.

### Модели конвертера

Рассмотрим три модели преобразователя *SEPIC*:

- 1) усредненную модель большого сигнала;
- 2) стационарную модель или модель сигнала постоянного тока;
- 3) усредненную модель слабого сигнала.

Получение этих моделей помогает нам оценить, как работает преобразователь, и, следовательно, позволяет нам решить, как им управлять. Построение этих моделей поможет в оценке взаимосвязи между различными переменными и даст четкое представление о том, какой будет схема управления. Рассмотрим следующие условные обозначения:

$$\dot{u}_1 = \frac{du_{c1}}{dt}, \dot{u}_2 = \frac{du_{c2}}{dt}, \dot{i}_1 = \frac{di_{l1}}{dt}, \dot{i}_2 = \frac{di_{l2}}{dt}; \quad (1)$$

$$u_2 = u = \text{Выходное напряжение}; \quad (2)$$

$$d = D + \hat{d}; \quad (3)$$

$$u_g = U_g + \hat{u}_g; \quad (4)$$

$$u_1 = U_1 + \hat{u}_1; \quad (5)$$

$$u_2 = U_2 + \hat{u}_2; \quad (6)$$

$$i_1 = I_1 + \hat{i}_1; \quad (7)$$

$$i_2 = I_2 + \hat{i}_2, \quad (8)$$

где  $d, D$  и  $\hat{d}$  представляют соответственно большую, постоянную и малую часть сигнала.

#### 1. Усредненная модель большого сигнала

Используя схему преобразователя *SEPIC* (рис. 1), получаем представление модели пространства состояний:

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_1 \\ \dot{i}_2 \\ u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{-1(1-d)}{L_1} & \frac{-1(1-d)}{L_1} \\ 0 & 0 & \frac{d}{L_2} & \frac{-1(1-d)}{L_2} \\ \frac{1-d}{C_1} & \frac{-d}{C_1} & 0 & 0 \\ \frac{1-d}{C_2} & \frac{1-d}{C_2} & 0 & \frac{-1}{RC_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_1} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_g \\ U \end{bmatrix}; \quad (9)$$

$$\begin{pmatrix} u \\ Y \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ & C & & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ D \\ U \end{bmatrix} \begin{pmatrix} u_g \\ U \end{pmatrix}. \quad (10)$$

$X$

## 2. Стационарная модель или модель сигнала постоянного тока

Следует отметить, что указанные выше меняющиеся во времени матрицы зависят от « $d$ » и представляют собой нелинейную модель, которую трудно контролировать. По этой причине целесообразно их линеаризовать. Следовательно, произведем возмущение сигнала, используя (3) – (8), разделим матрицы, удалим часть установившегося состояния и линеаризуем модель, рассматривая часть  $\hat{d}$  в качестве другого входа. Соответственно, если мы хотим управлять преобразователем, будем рассчитывать на слабый сигнал  $\hat{d}$ .

В установившемся состоянии считаем, что все компоненты имеют постоянные и неизменные значения, что делает все производные равными нулю. Следовательно:

$$\begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} = 0; \quad X \quad (11)$$

$$d = D, \quad u_g = U_g, \quad u_1 = U_1, \quad u_2 = U_2, \quad i_1 = I_1, \quad i_2 = I_2. \quad (12)$$

Таким образом, решение модели установившегося состояния можно записать в виде:

$$\begin{pmatrix} U \\ Y \end{pmatrix} = - \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ & C & & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{-1(1-D)}{L_1} & \frac{-1(1-D)}{L_1} \\ 0 & 0 & \frac{D}{L_2} & \frac{-1(1-D)}{L_2} \\ \frac{1-D}{C_1} & \frac{-D}{C_1} & 0 & 0 \\ \frac{1-D}{C_2} & \frac{1-D}{C_2} & 0 & \frac{-1}{RC_2} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \frac{1}{L_1} \\ \frac{1}{L_2} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} U_g \\ U \end{pmatrix}. \quad (13)$$

$A$

### 3. Получение модели слабого сигнала

Подставляя (3) – (8) в (9) – (10), получаем модель малого сигнала, записанную в терминах  $\hat{d}$  и  $\hat{v}_g$ .

$$\begin{bmatrix} \hat{i}_1 \\ \hat{i}_2 \\ \hat{u}_1 \\ \hat{u}_2 \\ X \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{-1(1-D)}{L_1} & \frac{-1(1-D)}{L_1} \\ 0 & 0 & \frac{D}{L_2} & \frac{-1(1-D)}{L_2} \\ \frac{1-D}{C_1} & \frac{-D}{C_1} & 0 & 0 \\ \frac{1-D}{C_2} & \frac{1-D}{C_2} & 0 & \frac{-1}{RC_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{i}_1 \\ \hat{i}_2 \\ \hat{u}_1 \\ \hat{u}_2 \\ X \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{U_1+U_2}{L_1} & \frac{1}{L_1} \\ \frac{U_1+U_2}{L_2} & 0 \\ \frac{-I_1-I_2}{C_1} & 0 \\ \frac{-I_1-I_2}{C_2} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{d} \\ \hat{u}_g \end{bmatrix}; \quad (14)$$

$A$   $B_{du}$

$$\begin{pmatrix} \hat{u} \\ Y \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ C & D & U \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{i}_1 \\ \hat{i}_2 \\ \hat{u}_1 \\ \hat{u}_2 \\ X \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ D \\ U \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \hat{u}_g \end{pmatrix}. \quad (15)$$

Получив уравнение пространства состояний модели малого сигнала, можем теперь изучить поведение системы в переходный момент времени:

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu \\ \dot{y} = Cx + Du \end{cases} \quad (16)$$

Преобразование вышеуказанной системы в форму Лапласа:

$$\begin{cases} sX(s) = A \cdot X(s) + B \cdot U(s) \\ Y(s) = C \cdot X(s) + D \cdot U(s) \end{cases}; \quad (17)$$

$$\begin{cases} X(s) = [sI - A]^{-1} \cdot B \cdot U(s) \\ Y(s) = C \cdot [sI - A]^{-1} \cdot B \cdot U(s) + D \cdot U(s) \end{cases} \quad (18)$$

Получим передаточную функцию разомкнутого контура выходного напряжения  $\hat{v}$  преобразователя относительно коэффициента заполнения  $\hat{d}$ :

$$\frac{\hat{u}}{\hat{d}} = C \cdot [sI - A]^{-1} \cdot B_d, \quad (19)$$

где:

$$B_d = \begin{bmatrix} \frac{U_1 + U_2}{L_1} \\ \frac{U_1 + U_2}{L_2} \\ \frac{-I_1 - I_2}{C_1} \\ \frac{-I_1 - I_2}{C_2} \end{bmatrix}. \quad (20)$$

Модель двунаправленного преобразователя *SEPIC* в *Matlab/Simulink* показана на рис. 2.

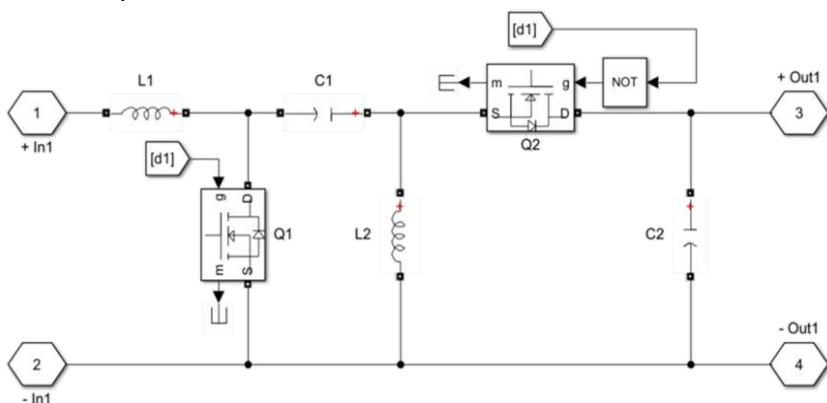


Рис. 2. Схема двунаправленного *SEPIC* преобразователя

Fig. 2. Scheme of the bidirectional *SEPIC* converter

### III. Моделирование конвертера *SEPIC*

Рассматриваемая система состоит в основном из набора батарей и/или суперконденсаторов, питающих отдельный преобразователь с напряжением 625 В постоянного тока. Роль преобразователя *SEPIC* состоит в том, чтобы повысить входное напряжение до 800 В и, таким образом, поддерживать максимальную нагрузку 110 кВт на шине звена постоянного тока. Основные расчетные параметры приведены в табл. 1.

**Таблица 1.**  
**Расчетные параметры**  
**Table 1.**  
**Design parameters**

| Параметр                                  | Значение                 |
|-------------------------------------------|--------------------------|
| Частота переключения                      | 20 кГц                   |
| Входное напряжение                        | 625 В                    |
| Выходное напряжение                       | 800 В                    |
| Соппротивление нагрузки (при 110 кВт)     | 5,818 Ом                 |
| Установившийся коэффициент заполнения $D$ | 0,5614                   |
| $\Delta i_{L1}$                           | 15 % $I_{L1}$            |
| $\Delta i_{L2}$                           | 15 % $I_{L2}$            |
| $L_1$                                     | $3,322 \cdot 10^{-4}$ Гн |
| $L_2$                                     | $4,253 \cdot 10^{-4}$ Гн |
| $\Delta u_{C1}$                           | 1 % $U_{C1}$             |
| $\Delta u_{C2}$                           | 1 % $U_{C2}$             |
| $C_1$                                     | $3,087 \cdot 10^{-4}$ Ф  |
| $C_2$                                     | $2,412 \cdot 10^{-4}$ Ф  |

Коэффициент заполнения  $D$  рассчитывается с использованием следующего соотношения:

$$U = \frac{D}{1-D} \cdot U_g. \quad (21)$$

С помощью компьютерного моделирования в *Matlab*, указанные выше значения параметров и полученные уравнения используются для получения передаточной функции разомкнутого контура выходного напряжения  $\hat{u}$  преобразователя относительно коэффициента заполнения  $\hat{d}$ :

$$\frac{\hat{u}}{\hat{d}}(s) = \frac{-1,352 \cdot 10^6 s^3 + 1,389 \cdot 10^{10} s^2 - 5,556 \cdot 10^{12} s + 5,938 \cdot 10^{16}}{s^4 + 712,5 s^3 + 8,55 \cdot 10^6 s^2 + 3,046 \cdot 10^9 s + 1,828 \cdot 10^{13}}. \quad (22)$$

Видим, что передаточная функция имеет 4-й порядок. Анализ нулей и полюсов этого уравнения показывает, что она имеет 4 полюса и 3 нуля. Один из нулей расположен в правой половине  $s$ -плоскости. Для оценки устойчивости передаточной функции анализа диаграммы Боде в данном случае недостаточно. Поэтому используем анализ корневого годографа (рис. 3), который описывает, как распределяются полюсы и нули.

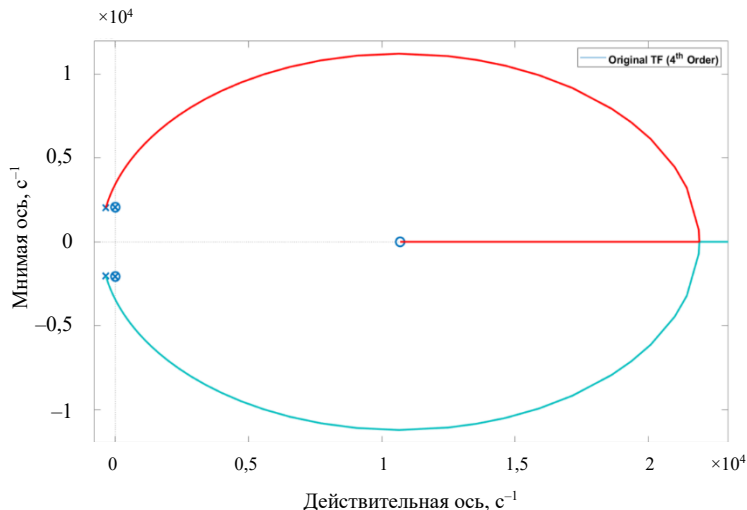


Рис. 3. График корневого годографа передаточной функции преобразователя

Fig. 3. Root locus plot of the converter transfer function

### Уменьшение порядка передаточной функции и приближение Паде

Производная передаточной функции представляет собой полное описание динамики системы. Однако, поскольку его трудно контролировать, мы постараемся минимизировать его порядок, используя приближение Паде для передаточных функций с одним входом и одним выходом (*Single Input Single Output – SISO*). Уменьшая порядок с 4-й степени до 2-го и 1-го порядка, можем использовать результаты для получения пропорционального и интегрального параметра ПИ-регулятора.

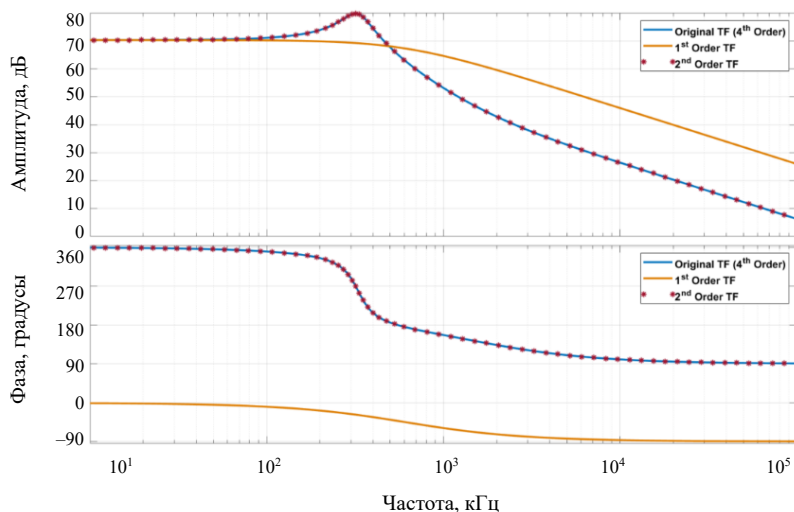
Аппроксимация Паде к уравнению 2-го порядка:

$$\frac{\hat{v}}{\hat{d}}(s) = \frac{-1,3 \cdot 10^6 s + 1,389 \cdot 10^{10}}{s^2 + 712,5s + 4,275 \cdot 10^6}. \quad (23)$$

Аппроксимация Паде к уравнению 1-го порядка:

$$\frac{\hat{v}}{\hat{d}}(s) = \frac{1,248 \cdot 10^7}{s + 3843}. \quad (24)$$

Боде диаграммы всех полученных передаточных функций схематически изображены на рис. 4.

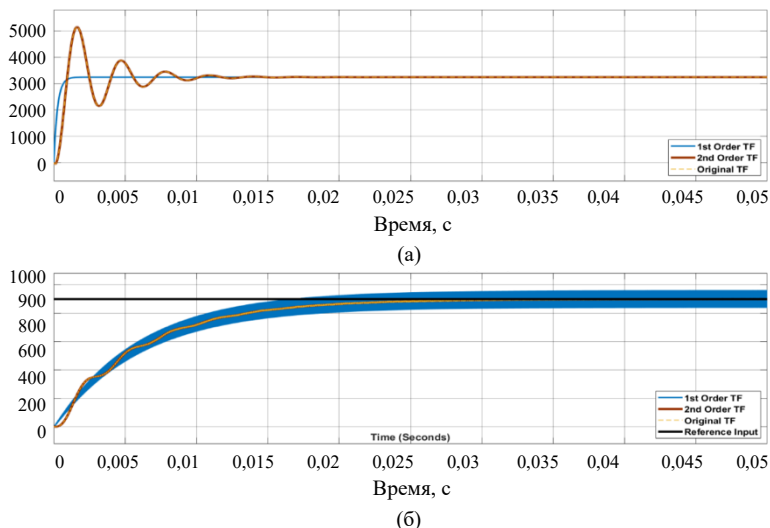


**Рис. 4. Диаграмма Бode главной передаточной функции преобразователя и ее приведенных порядков**

**Fig. 4. Bode plot diagrams of the converter main transfer function and its reduced orders**

Все передаточные функции разомкнутого контура достигают стабильности в течение короткого периода времени. Исходная передаточная функция и пониженная передаточная функция до 2-го порядка имеют положительный полюс, в отличие от пониженной передаточной функции до 1-го порядка. Поскольку собираемся использовать метод управления *ИМС*, выполним проверку реакции ПИ-регулятора на основе передаточных функций 1-го и 2-го порядка.

Переходные характеристики разомкнутого контура показаны на графике для трех вариантов передаточной функции, чтобы показать стабильность в установившемся режиме, рис. 5. Очевидно, что все функции достигают установившегося состояния, в то время как исходная передаточная функция и передаточная функция, уменьшенная до 2-го порядка, демонстрируют схожее поведение.



**Рис. 5. Ступенчатая характеристика передаточной функции и ее приведенных порядков: в разомкнутом контуре (а); в замкнутом контуре (б)**

**Fig. 5. Step response of the transfer function and its reduced orders: in open loop (a); in closed loop (b)**

#### IV. Результаты и обсуждения

Представим два способа получения параметров контроллера. Первый способ заключается в использовании обычного метода подбора пропорциональных и интегральных параметров ПИ-регулятора. Второй метод – это рассмотрение доступной динамики и параметров преобразователя с помощью метода *ИМС*. Оба метода эффективны, однако, *ИМС* основан на имитации передаточной функции преобразователя.

Переходная характеристика для каждой из моделей (порядков) передаточных функций *SEPIC* была протестирована с использованием переменного ступенчатого входа. Результаты показаны на рис. 6 и 7.

Выбранные параметры ПИ-регулятора, следующие (методом подбора):  $k_p = 0,00001$ ;  $k_i = 0,05$ .

На рис. 7 показано выходное напряжение относительно входного опорного напряжения 800 В.

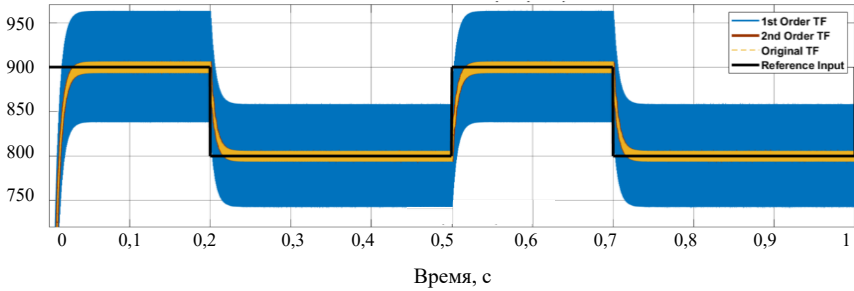


Рис. 6. Ступенчатая характеристика передаточной функции и ее приведенных порядков

Fig. 6. Step responses of the transfer function and its reduced orders

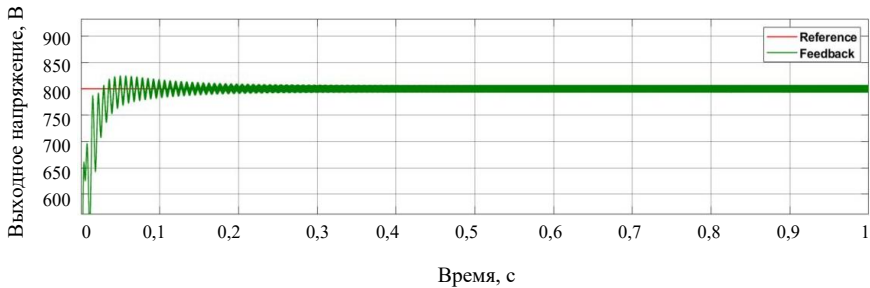


Рис. 7. Отклик ПИ-регулятора и выходное напряжение

Fig. 7. Output voltage using a PI controller

Более подробно о контроллере *ИМС* рассмотрено в [18], параметры рассчитываются с использованием следующих уравнений для контроллера с одной степенью свободы и с учетом передаточной функции, приведенной к 2-му порядку [18]:

$$k_p = \frac{2 \cdot \zeta \cdot \tau_r}{\tau_{sepic} \cdot k_{sepic}} = 1,2384 \cdot 10^{-12}; \quad (25)$$

$$k_i = \frac{k_p}{2 \cdot \zeta \cdot \tau_r} = 1,2803 \cdot 10^{-9}, \quad (26)$$

где  $\tau_r$  – время нарастания передаточной функции;  $k_{sepic}$  – коэффициент уси-

ления передаточной функции;  $\zeta$  – коэффициент демпфирования;  $\tau_{sepic}$  – постоянная времени фильтра нижних частот.

Поскольку разработана передаточная функция с использованием анализа слабого сигнала, выходом ПИ-регулятора является коэффициент заполнения малого сигнала  $\hat{d}$ , поэтому, если мы подадим на ШИМ большой сигнал « $d$ » (3), мы будем ожидать более быстрый ответ. Для этого мы добавим часть устойчивого состояния коэффициента заполнения « $D$ » к входному сигналу ШИМ. Блок контроллера *SEPIC* представлен на рис. 8.

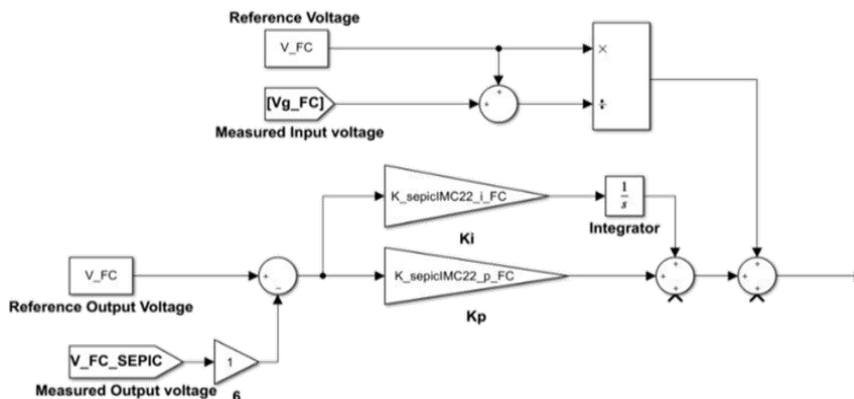


Рис. 8. Блок контроллера *SEPIC* в *Matlab/Simulink*

Fig. 8. SEPIC controller block in Matlab/Simulink

Коэффициент заполнения установившегося режима « $D$ » выводится из (21), если выходное напряжение « $U$ » считается « $U_{ref}$ »:

$$D = \frac{U_{ref}}{U_{ref} + U_g}. \quad (27)$$

Следовательно, входом в ШИМ является:

$$d = \hat{d} + \frac{U_{ref}}{U_{ref} + U_g}. \quad (28)$$

Предыдущий анализ был выполнен с учетом идеального источника входного постоянного напряжения  $U_g$ , питающего преобразователь; поэтому полезно проверить его реакцию, когда он питается от неидеального

источника постоянного тока, такого как фотоэлектрическая панель.

Модель фотоэлектрической панели, используемая в *Matlab/Simulink*, имитирует поведение панели *Trina Solar TSM-250PA05.08* и используется для проверки отклика преобразователя. Параметры панели приведены в табл. 2.

**Таблица 2.**  
**Параметры фотоэлектрической панели *Trina Solar TSM-250PA05.08***

**Table 2.**  
***Trina Solar TSM-250PA05.08* photovoltaic panel parameters**

| Параметр                                                                                   | Значение  |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| Максимальная мощность (Вт)                                                                 | 249,86    |
| Количество ячеек на модуль                                                                 | 60        |
| Напряжение холостого хода (В)                                                              | 37,6      |
| Ток короткого замыкания (А)                                                                | 8,55      |
| Количество последовательно соединенных модулей в каждой строке                             | 18        |
| Количество параллельных строк                                                              | 100       |
| Изменение входной солнечной освещенности на фотоэлектрической панели (Вт /м <sup>2</sup> ) | 250...900 |

Входная освещенность на фотоэлектрической панели будет изменяться в соответствии с режимом, описанным в табл. 2, и отражаться как выходное напряжение панели (рис. 9 а).

На рис. 9 б и в показано, что ПИ-регулятор на основе *IMC* поддерживает более стабильное напряжение на выходе преобразователя *SEPIC*, чем обычный ПИ-регулятор.

На рис. 10 а и б представлены результаты анализа коэффициента искажения (*Total Harmonic Distorsion – THD*) относительно постоянного тока выходного напряжения преобразователя *SEPIC*, но при использовании ПИ-регулятора на основе *IMC*, происходит улучшение значения *THD* и более высокое среднеквадратичное выходное напряжение постоянного тока.

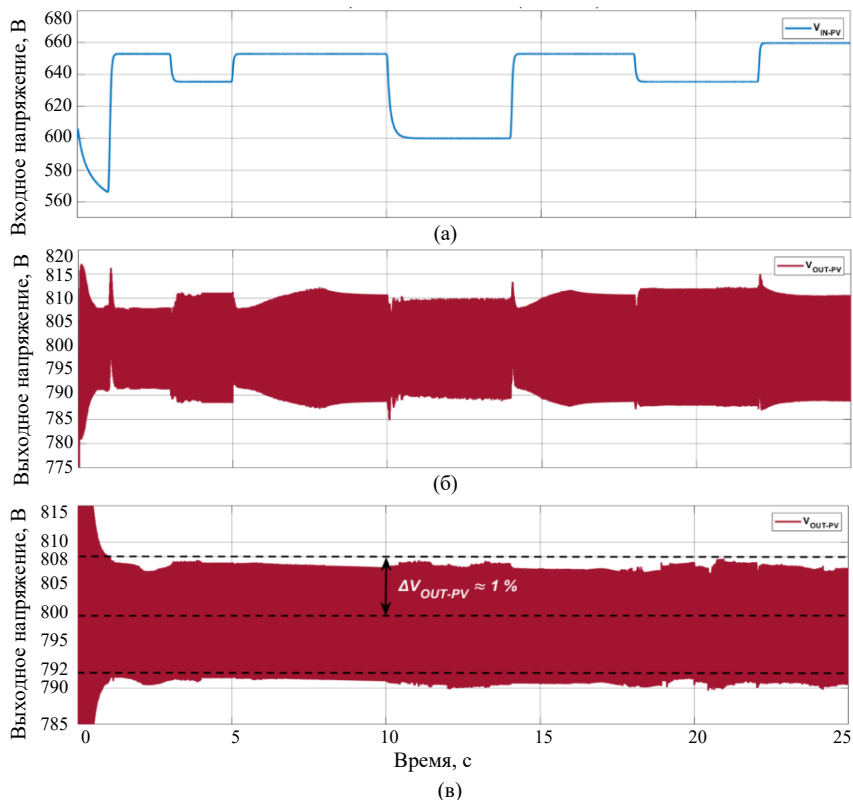


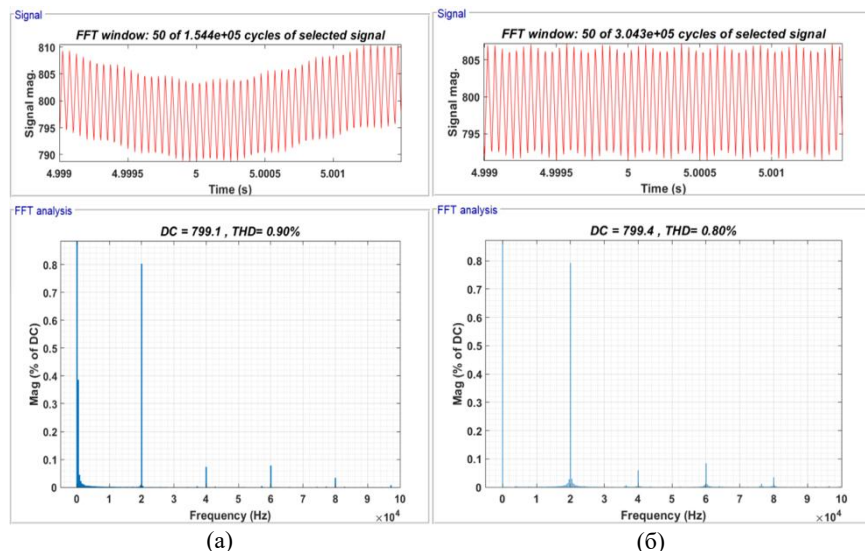
Рис. 9. Реакция *SEPIC* на вход фотоэлектрической панели (а): оригинальный ПИ-регулятор (б); ПИ-регулятор на основе *IMC* (в)

Fig. 9. *SEPIC* converter response to PV panel input (a): original PI-controller (б); IMC-based PI-controller (в)

Очевидно, что ПИ-регулятор на основе *IMC* смог поддерживать более стабильное напряжение на выходе преобразователя *SEPIC*, чем обычный ПИ-регулятор, что подтверждается рис. 9. Хотя анализ *THD* относительно постоянного тока выходного напряжения преобразователя *SEPIC* обоих контроллеров показывает хорошие результаты, у ПИ-регулятора на основе *IMC* ниже значение *THD* и более высокое среднеквадратичное выходное напряжение постоянного тока (рис. 10 а и б). Кроме того, как показано на (рис. 9 в), выходное напряжение преобразователя *SEPIC* все еще находится в пределах проектного значения 1 %. Эти результаты подтвер-

ждают правильность конструкции преобразователя в дополнение к способности ПИ-регулятора на основе *ИМС* лучше выдерживать входные возмущения и изменения.

Переходная характеристика улучшенного ПИ-регулятора оказалась вполне удовлетворительной, как показано на рис. 11 б, с временем нарастания почти 0,6 мс. Это связано с добавлением значения постоянного тока рабочего цикла. Такая реализация сократила время отклика конвертера с 25,15 мс до 0,6 мс (рис. 11).



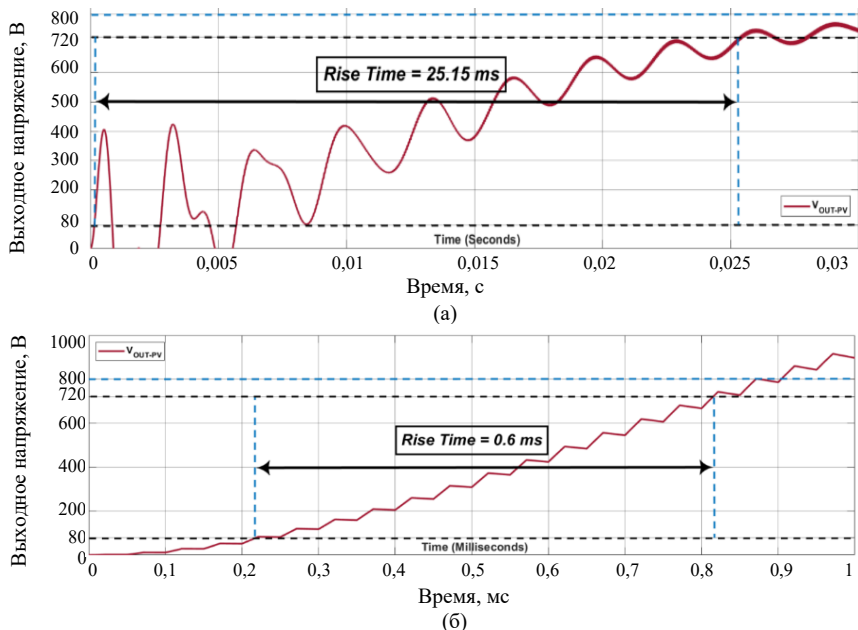
**Рис. 10. Анализ THD выходного напряжения *SEPIC*:**  
оригинальный ПИ-регулятор (а); ПИ-регулятор на основе *ИМС* (б)

**Fig. 10. THD analysis of output voltage:**  
original PI-controller (a); IMC-based PI-controller (b)

## V. Заключение

Проведен анализ преобразователей постоянного тока. Выполнено обоснование, что для автономных систем электроснабжения, включая накопители энергии (батареи, модули суперконденсаторов) и фотоэлектрические элементы, возможно использование преобразователя *SEPIC*. Результаты моделирования показывают реакцию преобразователя и оправдывают использование ПИ-регулятора на основе *ИМС* с использованием модели сокращенного порядка. Полученные результаты моделирования показывают

применимость предложенного решения для автономных источников питания от батарей или суперконденсаторов, а также для фотоэлектрических панелей. Для преобразователей с передаточной функцией высокого порядка реализация управления на основе метода внутреннего модельного контроля представляет собой сложный процесс. Однако с помощью приближения Паде, уменьшая порядок передаточной функции преобразователя, все же можно сохранить некоторые характеристики динамики системы, но при этом упростить процесс управления для реализации.



**Рис. 11. Переходная характеристика SEPIC, питаемого фотоэлектрической панелью: оригинальный ПИ-регулятором (а); ПИ-регулятор на основе ИМС (б)**

**Fig. 11. Transient response of converter supplied by PV: original PI-controller (a); IMC-based PI-controller (б)**

Эта статья посвящена памяти нашего научного руководителя, профессора Бориса Николаевича Абрамовича. Утрата Бориса Николаевича не была бесследной, мы потеряли необычайную поддержку, исключительный источник мотивации, видения, знаний и энтузиазма. Руководство Бориса Николаевича и его ценные и конструктивные предложения, критика и рекомендации от планирования этой работы (как и многих других) до окончательного результата, безусловно, бесценны.

© Устинов Д.А., 2025

© Абдалла В., 2025

© Шафхатов Е.Р., 2025

Поступила в редакцию 16.05.2023

Принята к публикации 02.05.2025

Received 16.05.2023

Accepted 02.05.2025

### Библиографический список

- [1] Абрамович Б.Н., Сычев Ю.А. Проблемы обеспечения энергетической безопасности предприятий минерально-сырьевого комплекса // Записки Горного института. 2016. Т. 217. С. 132-139.
- [2] Абрамович Б.Н. Система бесперебойного электроснабжения предприятий горной промышленности // Записки Горного института. 2018. Т. 229. С. 31-40. DOI: 10.25515/PMI.2018.1.31
- [3] Бельский А.А., Скамьин А.Н., Васильков О.С. Применение гибридных накопителей электроэнергии для выравнивания графика нагрузки предприятий // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2020. № 63(3). С. 212-222. DOI: 10.21122/1029-7448-2020-63-3-212-222
- [4] N. Korolev, A. Kozyaruk and V. Morenov, "Efficiency increase of energy systems in oil and gas industry by evaluation of electric drive lifecycle", *Energies*, vol. 14(19), no. 6074, Sept. 2021. DOI: 10.3390/en14196074
- [5] Y.L. Zhukovskiy, A.Y. Lavrik and A.D. Buldysko, "Energy demand side management in stand-alone power supply system with renewable energy sources", *Journal of Physics Conference Series*, vol. 1753, no. 012059, Feb. 2021. DOI: 10.1088/1742-6596/1753/1/012059
- [6] Бельский А.А., Добуш В.С., Шайбан Фауд Хайкал. Эксплуатация однофазного автономного инвертора в составе ветроэнергетического комплекса малой мощности // Записки Горного института. 2019. Т. 239. С. 564-569. DOI: 10.31897/PMI.2019.5.564
- [7] A. DeNardo, N. Femia, F. Forrissi and M.A. Granato, "SEPIC converter passive components design", in *proc. 15th IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems*, May 2008, Saint Julian's, Malta, pp. 1002-1005. DOI: 10.1109/ICECS.2008.4675025
- [8] A. Ferrari de Souza and I. Barbi, "A new ZVS semiresonant high power factor rectifier with reduced conduction losses", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 46(1), no. 6074, pp. 82-90, Feb. 1999. DOI: 10.1109/41.744393
- [9] Пирог С., Шклярский Я.Э., Скамьин А.Н. Идентификация местоположения нелинейной электрической нагрузки // Записки Горного института. 2019. Т. 237. С. 317-321. DOI: 10.31897/pmi.2019.3.317
- [10] W. Choi, J. Kwon, E. Kim, J. Lee and B. Kwon, "Bridgeless boost rectifier with Low conduction losses and reduced diode reverse-recovery problems", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 54(2), pp. 769-780, May 2007. DOI: 10.1109/TIE.2007.891991

- [11] Y.E. Shklyarskiy, Z. Hanzelka and A.N. Skamyin, "Experimental study of harmonic influence on electrical energy metering", *Energies*, vol. 13(21), no. 5536, Oct. 2020. DOI:10.3390/en13215536
- [12] Y.E. Shklyarskiy, A.N. Skamyin and A.Y. Shklyarskiy, "Effect of higher harmonics on electric power metering in a steel maker's power networks", *Tsvetnye Metally*, vol.10, pp. 64-69, Oct. 2020. DOI:10.17580/tsm.2020.10.09
- [13] E.H. Ismail, "Bridgeless SEPIC rectifier with unity power factor and reduced conduction losses", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 56(4), pp. 1147-1157, May 2009, DOI: 10.1109/TIE.2008.2007552
- [14] K. Singh and M. Singh, "Analysis and comparison of performance of various DC-DC converters using Matlab Simulink", *International Journal for Scientific Research and Development*, vol. 3, pp. 585-590, August 2015.
- [15] J.L. Rose and B. Sankaragomathi, "Design, analysis and simulation of a SEPIC converter", *Middle-East Journal of Scientific Research*, vol. 24 (7), pp. 2302-2308, 2016, DOI: 10.5829/idosi.mejsr.2016.24.07.23750
- [16] Li N, "Digital control strategies for DC/DC SEPIC converters towards integration", Cand. of Tech. S. doctoral thesis, National Institute of Applied Sciences of Lyon, Lyon, France, 2012.
- [17] Абрамович Б.Н., Устинов Д.А., Абдалла В.Д. Обоснование параметров преобразователя постоянного тока для источника автономного электроснабжения // Вестник Южно-Уральского государственного Университета. Серия: «Энергетика». 2020. Т. 20. № 4. С. 86–95. DOI: 10.14529/power200410
- [18] D.E. Rivera, "Internal model control: a comprehensive view", Arizona State University, Tempe, Arizona, 1999.

### References

- [1] B.N. Abramovich and Yu.A. Sychev, "Problems of ensuring energy security for enterprises from the mineral resources sector", *Journal of Mining Institute*, vol. 217, pp. 132-139, 2016.
- [2] B.N. Abramovich, "Uninterruptible power supply system for mining industry enterprises", *Journal of Mining Institute*, vol. 229, pp. 31-40, 2018. DOI: 10.25515/PMI.2018.1.31
- [3] A.A. Belsky, A.N. Skamyin and O.S. Vasilkov, "The use of hybrid energy storage devices for balancing the electricity load profile of enterprises", *ENERGETIKA. Proceedings of CIS higher education institutions and power engineering associations*, vol. 63, no. 3, pp. 212-222, 2020. DOI: 10.21122/1029-7448-2020-63-3-212-222
- [4] N. Korolev, A. Kozyaruk and V. Morenov, "Efficiency increase of energy systems in oil and gas industry by evaluation of electric drive lifecycle", *Energies*, vol. 14(19), no. 6074, Sept. 2021. DOI: 10.3390/en14196074
- [5] Y.L. Zhukovskiy, A.Y. Lavrik and A.D. Buldysko, "Energy demand side management in stand-alone power supply system with renewable energy sources", *Journal of Physics Conference Series*, vol. 1753, no. 012059, Feb. 2021. DOI: 10.1088/1742-6596/1753/1/012059
- [6] A.A. Belsky, V.S. Dobush and S.F. Haikal, "Operation of a single-phase autonomous inverter as a part of a low-power wind complex", *Journal of Mining Institute*, vol. 239, pp. 564-569, 2019 (in Russian). DOI: 10.31897/pmi.2019.5.564

- 
- [7] A. DeNardo, N. Femia, F. Forrissi and M.A. Granato, "SEPIC converter passive components design", in proc. *15th IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems*, May 2008, Saint Julian's, Malta, pp. 1002-1005. DOI: 10.1109/ICECS.2008.4675025
  - [8] A. Ferrari de Souza and I. Barbi, "A new ZVS semiresonant high power factor rectifier with reduced conduction losses", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 46(1), no. 6074, pp. 82-90, Feb. 1999. DOI: 10.1109/41.744393
  - [9] S. Pirog, Y.E. Shklyarskiy and A.N. Skamyin, "Non-linear electrical load location identification", *Journal of Mining Institute*, vol. 237, pp. 317-321, 2019. DOI: 10.31897/pmi.2019.3.317
  - [10] W. Choi, J. Kwon, E. Kim, J. Lee and B. Kwon, "Bridgeless boost rectifier with low conduction losses and reduced diode reverse-recovery problems", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 54(2), pp. 769-780, May 2007. DOI: 10.1109/TIE.2007.891991
  - [11] Y.E. Shklyarskiy, Z. Hanzelka and A.N. Skamyin, "Experimental study of harmonic influence on electrical energy metering", *Energies*, vol. 13(21), no. 5536, Oct. 2020. DOI:10.3390/en13215536
  - [12] Y.E. Shklyarskiy, A.N. Skamyin and A.Y. Shklyarskiy, "Effect of higher harmonics on electric power metering in a steel maker's power networks", *Tsvetnye Metally*, vol.10, pp. 64-69, Oct. 2020. DOI:10.17580/tsm.2020.10.09
  - [13] E.H. Ismail, "Bridgeless SEPIC rectifier with unity power factor and reduced conduction losses", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 56(4), pp. 1147-1157, May 2009, DOI: 10.1109/TIE.2008.2007552
  - [14] K. Singh and M. Singh, "Analysis and Comparison of Performance of Various DC-DC Converters using MATLAB SIMULINK", *International Journal for Scientific Research and Development*, vol. 3, pp. 585-590, August 2015.
  - [15] J.L. Rose and B. Sankaragomathi, "Design, analysis and simulation of a SEPIC converter", *Middle-East Journal of Scientific Research*, vol. 24 (7), pp. 2302-2308, 2016, DOI: 10.5829/idosi.mejsr.2016.24.07.23750
  - [16] Li N, "Digital control strategies for DC/DC SEPIC converters towards integration", Cand. of Tech. S. doctoral thesis, National Institute of Applied Sciences of Lyon, Lyon, France, 2012.
  - [17] B.N. Abramovich, D.A. Ustinov and V.D. Abdallah, "Justification of the parameters of a DC/DC converter for an autonomous power supply source", *Bulletin of South Ural State University. Series: Power Engineering*, vol. 20, no. 4, pp. 86-95, Dec. 2020. DOI: 10.14529/power200410.
  - [18] D.E. Rivera, "Internal model control: a comprehensive view", Arizona State University, Tempe, Arizona, 1999.

**ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ**  
**INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

**Устинов Денис Анатольевич**, кандидат технических наук, доцент Санкт-Петербургского горного университета, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация.

**Denis A. Ustinov**, Cand. Sci. (Eng.), associate professor of the Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation.

**Абдалла Вазль**, аспирант Санкт-Петербургского горного университета, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация.

**Wael Abdallah**, postgraduate student of the Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation.

**Шафхатов Ершат Рашитович**, аспирант Санкт-Петербургского горного университета, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация.

**Ershat R. Shafhatov**, postgraduate student of the Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation.