

# Davriy strukturali ventilli o'zgartirgichlarining matematik modellarini ishlab chiqish uchun takomillashtirilgan operator usuli

Shukhrat B. Umarov

DSc, prof., Tashkent State Technical University, Tashkent, 100095, Uzbekistan; [shumarov1951@mail.ru](mailto:shumarov1951@mail.ru)  
<https://orcid.org/0000-0002-9262-4683>

**Dolzarblik:** jahonda turli xil sanoat sohaslarida keng qo'llaniladigan tok o'zgartirgichlari asosidagi kuchli yarim o'tkazgichli o'zgartirgichlarni ishlab chiqish, ulardan yuqori aniqlik va ishonchlilik bilan oqilona foydalanish hamda xizmat ko'rsatish davrini uzaytirish masalalariga alohida ahamiyat berilmoqda. Xozirgi kunda rivojlangan mamlakatlarda «...ishlab chiqariladigan elektroenergiyaning 60% ko'p bo'lgan qismi yarim o'tkazgichli o'zgartirgichlar orqali o'tadi. Quvvatli elektronika tizimlaridan jahon darajasida foydalanilganida ishlab chiqarilgan elektr energiyasining 12-15% tejash mumkin». Shu munosabat bilan, iste'mol qilinadigan energiya sifati va energiya manbalarining ishonchliliigiga talablari yuqori bo'lgan energetik obyektlari uchun zarur bo'lgan elektr ta'minoti rejimini ta'minlash uchun mo'ljallangan tok o'zgartirgichlari asosidagi ventilli o'zgartirgichlarining energiya samaradorligini oshirish bilan bog'liq masalalar dolzarbdir.

**Maqsad:** davriy strukturali ventilli o'zgartirgichlarini o'tkinchi va turg'un ish rejimlarini tadqiq qilish samarali uslubiyotini yaratish.

**Usullar:** masalani hal qilishda Laplas konvertatsiyasiga asoslangan o'zgartirilgan operator usuli, shuningdek, oniy qiymatlar usuli qo'llanildi.

**Natijalar:** ishlab chiqilgan uslubiyot uni kuchli elektr zanjiri tuzilishi (topologiyasi) davriy strukturali barcha turdagi avtonom invertorlar va ventilli o'zgartirgichlarini energiya konvertorlari uchun qo'llash imkoniyatini beradi. Ishlab chiqilgan metodologiyaning muhim afzalligi shundaki, uning asosida olingan matematik modellar va algoritmlar kirish tokening uzklki va uzluksiz rejimlarda aktiv-induktivli va dvigatelli yuklamaga ishlaydigan ventilli o'zgartirgichlarining o'tkinchi va turg'un ish rejimlarini hisoblash imkonini beradi. Inverterlarning kirish tokining shakli, yuklanish turini va ularning boshqarish usulini hisobga olgan holda, ventilli o'zgartirgichlarini quvvat sxemasi elementlarining parametrlarini, shuningdek, inverterning kommutatsiya barqarorligini saqlab, chiqish kuchlanishini barqarorlashtirish imkoniyatini ta'minlaydigan nazorat diapazonini aniqlashga imkon berishi bilan izohlanadi.

**Kalit so'zlar:** matematik modellashtirish; ventilli o'zgartirgich; avtonom tok inverteri; inverterni boshqarish usuli va kirish tokining shakli; o'tkinchi va turg'un ish rejimlarini; aktiv-induktivli va dvigatelli yuklama.

**For citation:** Umarov Sh.B. Modified operator method for developing mathematical models of valve converters with a periodic structure. Scientific and technical journal of Problems of Energy and Sources Saving, 2024, no. 3, pp. 51-60.

<https://doi.org/10.5281/zenodo.14032627>

Received: 8.09.2024  
Revised: 27.09.2024  
Accepted: 15.10.2024  
Published: 02.11.2024

**Copyright:** © Shukhrat B. Umarov. 2024. Submitted to Problems of Energy and Sources Saving for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

## Модифицированный операторный метод для разработки математических моделей вентиляльных преобразователей с периодической структурой

Шухрат Б. Умаров

DSc, prof., Tashkent State Technical University, Tashkent, 100095, Uzbekistan; [shumarov1951@mail.ru](mailto:shumarov1951@mail.ru)  
<http://orcid.org/0000-0002-9262-4683>

**Актуальность:** в мире особое внимание уделяется решению задач по разработке силовой полупроводниковой преобразовательной техники на основе преобразователей тока, имеющих широкое применение в различных промышленных сферах, их рациональному использованию с высокой точностью поддержания энергетических параметров, повышению эксплуатационной надежности и увеличению длительности срока службы. В настоящее время в развитых странах «...более 60% вырабатываемой электроэнергии проходит через полупроводниковые преобразователи. При использовании систем силовой электроники до мирового уровня можно будет экономить 12-15% вырабатываемой электроэнергии». В связи с этим вопросы, связанные с повышением энергоэффективности вентиляльных преобразователей на основе преобразователей тока

различного назначения, предназначенных для обеспечения необходимого режима питания энергетических объектов с повышенными требованиями к качеству потребляемой энергии и надежности энергоресурсов являются актуальными.

**Цель:** разработка эффективной методики моделирования вентильных преобразователей с периодической структурой для эффективного расчета их переходных и установившихся режимов.

**Методы:** при решении поставленной задачи использовался модифицированный операторный метод на основе преобразования Лапласа, а также метод мгновенных значений.

**Результаты:** Разработанная методика обеспечивает возможность её применения для всех разновидностей автономных инверторов и преобразователей энергии с периодической последовательностью смены структуры (топологии) силовой схемы. Важное достоинство разработанной методики заключается в том, что полученные на её основании математические модели и алгоритмы позволяют рассчитывать переходные и установившиеся режимы работы вентильных преобразователей при их работе на активно-индуктивную и двигательную нагрузку в непрерывных и прерывистых режимах входных токов инверторов с учетом вида нагрузки, способа управления и формы входного тока инверторов; позволяют определить параметры элементов силовой схемы вентильных преобразователей, а также диапазон регулирования, обеспечивающий стабилизацию выходного напряжения с сохранением коммутационной устойчивости преобразователя.

**Ключевые слова:** математическое моделирование; вентильный преобразователь; автономный инвертор тока; способ управления и форма входного тока инвертора; переходные и установившиеся режимы; активно-индуктивная и двигательная нагрузки.

## Modified operator method for developing mathematical models of valve converters with a periodic structure

Shukhrat B. Umarov

DSc, prof., Tashkent State Technical University, Tashkent, 100095, Uzbekistan; [shumarov1951@mail.ru](mailto:shumarov1951@mail.ru)  
<https://orcid.org/0000-0002-9262-4683>

**Relevance:** in the world, special attention is paid to solving problems in developing power semiconductor converter technology based on current converters, which are widely used in various industrial areas, their rational use with high accuracy of maintaining energy parameters, increasing operational reliability and increasing service life. Currently, in developed countries, "...more than 60% of the generated electricity passes through semiconductor converters. By using world-class power electronics systems, it will be possible to save 12-15% of the generated electricity." In this regard, issues related to increasing the energy efficiency of valve converters based on current converters for various purposes, designed to provide the required power supply mode for energy facilities with increased requirements for the quality of consumed energy and the reliability of energy resources, are relevant.

**Aim:** development of an effective methodology for modeling valve converters with a periodic structure to calculate their transient and steady-state modes.

**Methods:** when solving the problem, a modified operator method based on the Laplace transform was used, as well as the instantaneous value method.

**Results:** the developed method provides the possibility of its application to all types of autonomous inverters and energy converters with a periodic sequence of changing the structure (topology) of the power circuit. An important advantage of the developed method is that the mathematical models and algorithms obtained on its basis allow calculating transient and steady-state modes of operation of valve converters when they operate on active-inductive and motor loads in continuous and intermittent input current modes of inverters, taking into account the type of load, control method and input current shape of inverters, allow determining the parameters of the power circuit elements of valve converters, as well as the control range that ensures stabilization of the output voltage while maintaining its switching stability.

**Keywords:** mathematical modeling; valve converter; autonomous current inverter; control method and input current shape of the inverter; transient and steady-state modes; active-inductive and motor loads.

## 1. Введение (Introduction)

В мире особое внимание уделяется решению задач по разработке силовой полупроводниковой преобразовательной техники на основе преобразователей тока, имеющих широкое применение в различных промышленных сферах, их рациональному использованию с высокой точностью поддержания энергетических параметров, повышению эксплуатационной надежности и увеличению длительности срока службы. В настоящее время в развитых странах «...более 60% вырабатываемой электроэнергии проходит через полупроводниковые преобразователи. При использовании систем силовой электроники до мирового уровня можно будет экономить 12-15% вырабатываемой электроэнергии» [1]. В связи с этим вопросы, связанные с повышением энергоэффективности вентильных преобразователей (ВП) на основе преобразователей тока различного назначения, предназначенных для обеспечения требуемого режима питания энергетических объектов, с повышенными требованиями к качеству потребляемой энергии и надежности энергоресурсов, являются актуальными.

Цель исследования заключается в разработке эффективной методики моделирования вентильных преобразователей на базе инверторов тока для исследования переходных и установившихся режимов их работы и позволяющей получать математические модели, справедливые для различных способов управления, видов нагрузки и характера входного тока инвертора, определять параметры элементов силовой схемы, обеспечивающие высокие коэффициенты коммутационной устойчивости и стабилизации, а также высокие технико-экономические характеристики вентильных преобразователей. Так как вентильные преобразователи на основе автономных инверторов тока широко используются для питания потребителя переменного тока в устройствах с источником энергии в виде аккумуляторной батареи, электроснабжение установок гарантированного питания и агрегатов бесперебойного питания, обеспечение регулируемым напряжением и частотой электроприводов с асинхронными и синхронными двигателями, в электротранспорте, питаемым от контактной сети или источника постоянного тока, использующие асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором в качестве тяговых электродвигателей, питания переменным током повышенной частоты электротехнологических установок различного назначения (электротермия, плавка металла, нагрев, закалка и др.)

Кроме вышеописанного традиционного спектра использования вентильных преобразователей на основе автономных инверторов тока большой интерес представляет возможность их использования в ветровой и солнечной энергетике для разработки возобновляемых источников питания [2,3].

Научная значимость полученных результатов исследований характеризуется разработкой методологии моделирования автономных инверторов тока как класса устройств с периодической структурой и едиными динамическими свойствами при реализации различных режимов нагрузки; разработкой математических моделей автономных инверторов тока, позволяющих уменьшить их программную реализацию по требуемому объему и расчетному времени за счет применения универсальных схем замещения, эквивалентных нескольким состояниям силовой схемы автономных инверторов тока. Представленная в работе методика может быть использована для анализа электромагнитных процессов в параллельном, параллельно-последовательном, последовательно-параллельном, последовательном, а также в инверторах с отсекающими вентилями и с двухступенчатой коммутацией как в переходных, так и в установившихся режимах их работы при статической нагрузке ( $R_n$ ,  $L_n$ ) и двигательной нагрузке: асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором по Т-образной схеме замещения [4-7].

Практическая значимость полученных результатов заключается в том, что, используя режимные характеристики можно определить параметры элементов схемы, обеспечивающие требуемые функциональные и схематические показатели исследуемых схем ВП при изменении входных и выходных параметров, а также позволяют определить диапазон регулирования угла КУ, обеспечивающий стабилизацию выходного напряжения с сохранением коммутационной устойчивости ВП. Также полученные режимные характеристики позволяют определить оптимальные параметры сглаживающего дросселя, эффективный угол регулирования тиристорного компенсирующего устройства, оптимальное расположение ограничивающего дросселя, которые в совокупности облегчают процедуру проектирования ВП.

Преобразователи энергии представляет собой сложные нелинейные системы, поэтому проведение их глубокого исследования невозможно без детального описания процессов на основе точной математической модели. Важным условием при разработке модели является возможность проведения расчетов динамических переходных процессов для выбора оптимальных параметров схемы, обеспечивающих выполнение требований технического задания.

Современный уровень развития языковых средств и возможности вычислительной технологии позволяют определять оптимальные параметры компонентов схемы, моделировать различные динамические и статические режимы, как преобразователей, так и других сложных энергетических систем [8-12].

Сравнительный обзор трудов, в которых приводятся результаты разработки математических моделей вентильных преобразователей на основе автономных инверторов тока (АИТ), показывает, что они условно могут быть подразделены на две основные группы: упрощенные и полные модели [13-15].

Полные модели хотя и являются точными, но они вместе с этим при программной реализации являются и наиболее затратными. Поэтому с практической точки зрения имеет смысл разработки частных, упрощенных моделей. Обычно упрощенные модели строятся на основе каких-либо допущений, которые, по мнению авторов, мало влияют на конечные расчеты. Так, приведенные в работах [16-18] модели, построенные на основе редукации Крона, связаны с игнорированием быстрых динамических процессов. В ряде работ для упрощения порядка модели пренебрегаются динамикой внутренних контуров инверторов, включая контур тока и контур напряжения [16-18]. Хотя, как отмечается в [19], внутренние контуры также играют важную роль в динамике медленных режимов. Помимо вышеописанных при разработке упрощенных моделей часто применяются модели, разработанные на основе применения численного анализа, сингулярного возмущения и интеллектуальных оптимизационных алгоритмов [20-22].

На практике обычно упрощенное моделирование применяется на первоначальной стадии разработки для определения поставленных к схеме первичных требований. При этом вопрос о степени погрешности полученных результатов анализа требует дополнительного уточнения, так как при разработке упрощенных моделей зачастую возникает проблема, связанная с её адекватностью реальным условиям переходных и установившихся процессов [23].

Следует отметить, что использование упрощенных моделей может привести к искажениям конечных результатов, а также к неверным данным о нарушении устойчивости системы, что в конечном итоге может привести к неправильному выбору параметров элементов силовой схемы преобразователя [21, 23].

В работе для построения полной модели принят операторный метод, который наиболее полно и точно отражает развитие динамических процессов в вентильных цепях [24]. Применение операторного метода для анализа переходных и установившихся процессов в классической форме приводит наряду с большими подготовительными процедурами при разработке математической модели еще и к ухудшению качества полученной модели: увеличению объема требуемой памяти, сложности алгоритма и низкой скорости расчетов. Эти недостатки связаны, в первую очередь с большим количеством используемых эквивалентных операторных схем замещения (ОСЗ) при разработке математической модели.

В связи с этим, в работе при разработке математических моделей предлагается сократить большое количество возможных эквивалентных ОСЗ, соответствующих возможным топологиям силовой схемы, возникающими в зависимости от принятого способа управления силовыми тиристорами и требуемого способа регулирования за счет применения разработанных схем замещения, обеспечивающих эквивалентность полученной модели нескольким топологиям силовой схемы. Такие схемы далее именуется как универсальные схемы замещения [25].

Данная методика позволяет сохранить достоинства преобразования Лапласа, обеспечивает уменьшение размеров математических моделей, исследуемых в работе вентильных преобразователей с периодической структурой при различных требуемых разработчику возможных способах работы системы управления и стабилизации (регулирования) величины выходных параметров преобразователя.

После построения операторных схем и решения операторных уравнений по схемам замещения, определяют значения интересующих токов и напряжений. Нахождение значения интересующего тока или напряжения сводится к простой задаче расчета цепи постоянного тока, которой является операторная схема замещения, получаемая с использованием преобразований Лапласа [26, 27].

## 2. Методы и материалы (Methods and materials)

Разработка математических моделей исследуемых схем ВП в работе производится в следующей последовательности [24-27]:

- а) определяется возможные типы схем замещения, имеющих место при выбранном способе возбуждения и стабилизации;
- б) составляются универсальные схемы замещения, выводятся изображения и оригиналы токов и напряжений;

в) на основании анализа возможных топологий (структур) силовой схемы, возникающих в зависимости от принятого способа управления силовыми тиристорами и требуемого способа регулирования (стабилизации) выходного напряжения, определяется весь возможный спектр ОСЗ и граничные условия их смены;

г) формируется алгоритм для расчета переходных процессов, учитывающий соблюдение очередности смены ОСЗ и их условий существования.

В соответствии с вышеизложенной методикой была разработана математическая модель однофазного вентильного преобразователя на основе параллельного автономного инвертора тока.

Классической схеме параллельного АИТ присущи следующие недостатки: сильно падающая внешняя характеристика, ограниченная устойчивость, невозможность получения низких частот из-за разряда конденсаторов через параллельные контуры, отсутствие возможности регулирования частоты в широких пределах.

С целью устранения указанных недостатков на выходе АИТ включается тиристорно-индуктивное компенсирующее устройство (КУ) [28]. На рис. 1 приведена схема однофазного параллельного АИТ с КУ.

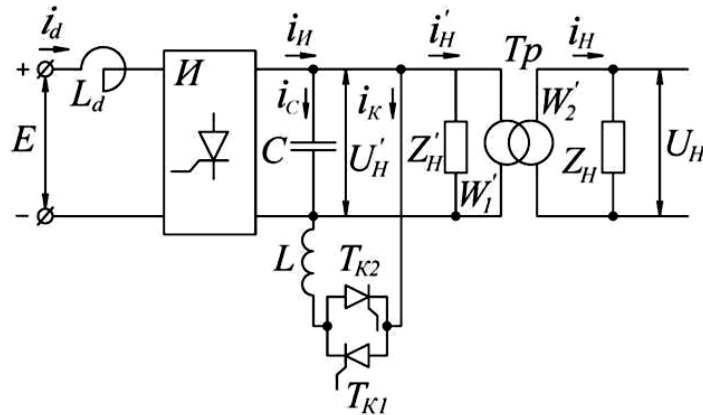


Рис. 1. Схема однофазного параллельного АИТ с КУ

Fig. 1. Diagram of a single-phase parallel AIT with CD

Анализ электромагнитных процессов в АИТ с КУ от момента включения до установившегося режима при регулировании выходного напряжения изменением  $\alpha$  - угла регулирования КУ показал, что в развитии переходного процесса, в зависимости от рабочего состояния КУ, могут участвовать шесть состояний силовой схемы с соответствующими ими ОСЗ [25].

Эти возможные ОСЗ можно привести к двум универсальным ОСЗ, отличающимся между собой рабочим состоянием КУ. Одна из них соответствует отключенному, другая - включенному состоянию КУ, а их использование для анализа различных режимных ситуаций определяется соответствующими начальными условиями.

Независимо от выбранной силовой схемы параллельного АИТ (мостовой или полумостовой) переходной процесс развивается по двум рабочим структурам, которым соответствуют две ОСЗ:

а) схема типа I-1 (КУ отключен) и б) схема типа I-2 (КУ включен), представленные, соответственно, на рис. 2, а и 2, б.

Схема типа I-1

Для ОСЗ (рис. 2, а) приняты следующие начальные условия:

$$t = 0; u_c(0) = U_c; i_H(0) = I_H; i_d(0) = I_d.$$

Определяем изображения искомых токов и напряжений: [23]:

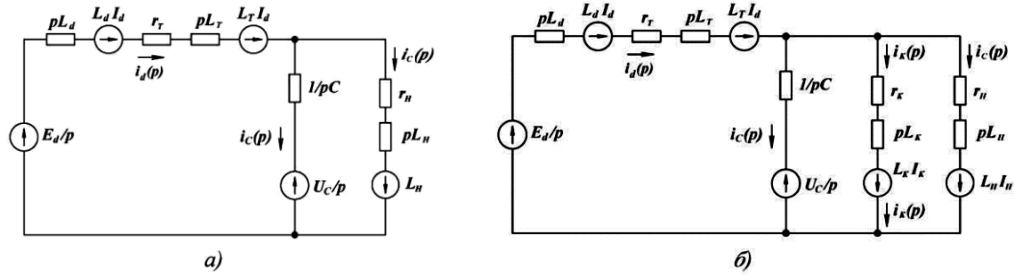
$$I_d(p) = N_1(p)/p M_1(p);$$

$$i_H(p) = (pL_1 + r_T) N_1(p)/p(pL_H + r_H) M_1(p) + (E_d + pL_1 I_d + pL_H I_H)/p(pL_H + r_H); \quad (1)$$

$$U_c(p) = (pL_1 + r_T) N_1(p)/p M_1(p) + (E_d + pL_1 I_d)/p.$$

Тогда оригиналы токов и напряжений в соответствии с теоремой разложения, имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} i_d(t) &= E_d/r_1 + (B_2/D_1) \exp(-6_2 t) + A_1 K_1 + B_1 K_2; \\ i_H(t) &= E_d/r_1 + (B_4/D_2) \exp(-6_2 t) + A_3 K_3 + B_3 K_4; \\ u_c(t) &= r_H E_d/r_1 + (B_4/D_1) \exp(-6_2 t) + A_3 K_1 + B_3 K_2. \end{aligned} \quad (2)$$



**Рис. 2.** ОСЗ при последовательном соединении  $r_n$  и  $L_n$ : а) тип I-1 (КУ отключен); б) тип I-2 (КУ включен)  
**Fig. 2.** OES with a serial connection of  $r_n$  and  $L_n$ : a) type I-1 (CD disabled); b) type I-2 (CD included)

Следует отметить, что при выводе рекуррентных соотношений искомого тока и напряжений в данной работе произведено функциональное разделение коэффициентов, входящих в формулы. Коэффициенты, величина которых зависит только от параметров силовой схемы и не зависит от вида и времени существования ОСЗ обозначены буквами  $a_i, N_i, M_i$ . Коэффициенты, величина которых зависит от параметров силовой схемы и от вида ОСЗ, но не зависит от времени, т.е. не меняется в течение интервала существования данной ОСЗ, обозначены буквами  $A_i, B_i$ . Коэффициенты, величина которых зависит и от параметров силовой схемы и от вида расчетного времени обозначены буквами  $K_i$ .

Таким образом, при расчёте одного варианта ВП коэффициенты первого вида  $a_i, N_i, M_i$  рассчитываются один раз, так как в дальнейшем их значения сохраняются неизменными; коэффициенты второго вида  $A_i, B_i$  рассчитываются только при изменении структуры силовой схемы т.е. в начале расчёта по вновь участвующей ОСЗ с учетом новых независимых начальных условий для данной ОСЗ; коэффициенты третьего вида  $K_i$ , также как и искомого тока и напряжения рассчитываются по мере изменения расчетного времени. В связи с этим можно сказать, что функциональное разделение коэффициентов исключает дублирование расчетов одних и тех же коэффициентов, уменьшает тем самым избыточность общей модели и обеспечивает ее быстродействие.

### 3. Результаты исследования (Results)

По разработанным алгоритмам и математическим моделям (программам) были осуществлены расчеты различных динамических режимов ВП на базе однофазного параллельного АИТ: при пуске, коммутациях нагрузки и изменениях входного напряжения для ВП на базе параллельного АИТ с КУ, при независимом и комбинированном способах возбуждения инвертора. Расчеты производились при следующих параметрах силовой схемы ВП на базе параллельного АИТ:

а) параллельный АИТ с КУ при независимом возбуждении:

$$r_m = 0,1 \text{ Ом}; r_n = 10,33 \text{ Ом}; r_{ку} = 0,5 \text{ Ом}; L_m = 0,0012 \text{ Гн}; L_d = 0,0775 \text{ Гн}; L_n = 0,02465 \text{ Гн}; L_{ку} = 0,02 \text{ Гн}; C = 0,0004 \text{ Ф}; E_d = 100 \text{ В}.$$

б) параллельный АИТ с КУ при комбинированном возбуждении:

$$r_m = 0,1 \text{ Ом}; r_n = 12,33 \text{ Ом}; r_{ку} = 0,5 \text{ Ом}; L_m = 0,0012 \text{ Гн}; L_d = 0,0775 \text{ Гн}; L_n = 0,03465 \text{ Гн}; L_{ку} = 0,02 \text{ Гн}; C = 0,0004 \text{ Ф}; E_d = 100 \text{ В}.$$

Расчеты показали, что при независимом способе возбуждения процесс стабилизации длится больше и увеличение амплитуды напряжения нагрузки на первом полупериоде после коммутации нагрузки больше, чем при комбинированном способе возбуждения. Сравнение этих показателей протекания переходного процесса позволяет говорить о большей коммутационной устойчивости инвертора при комбинированном способе возбуждения.

На основании проведенных компьютерных исследований были получены режимные характеристики ВП на базе параллельного АИТ с КУ при следующих исходных данных:

$$U_{в ном} = I_{ж} Y_{ном} = I_{ж} G_n = const.$$

Выходное напряжение стабилизировалось изменением  $\alpha$  - угла включения тиристоры КУ при изменении  $E_{d ном}$ ,  $Z_{ном}$  или их одновременном изменении.

На рис.3 представлены характеристики ВП на базе параллельного АИТ с КУ при :

$$U_{вых} = const, \cos\varphi_n = 0,95,$$

которые позволяют определить диапазон регулирования угла КУ, обеспечивающий стабилизацию выходного напряжения с сохранением коммутационной устойчивости ВП и облегчают нахождение

оптимальных параметров ВП. Кроме выше найденных показателей с помощью данной программы можно найти и другие показатели ВП, такие как реактивная мощность коммутирующего конденсатора  $Q_c$ , реактивная мощность компенсирующего устройства  $Q_k$ , суммарная реактивная мощность преобразователя  $Q_b$ , среднее значение входного тока  $I_d$ .

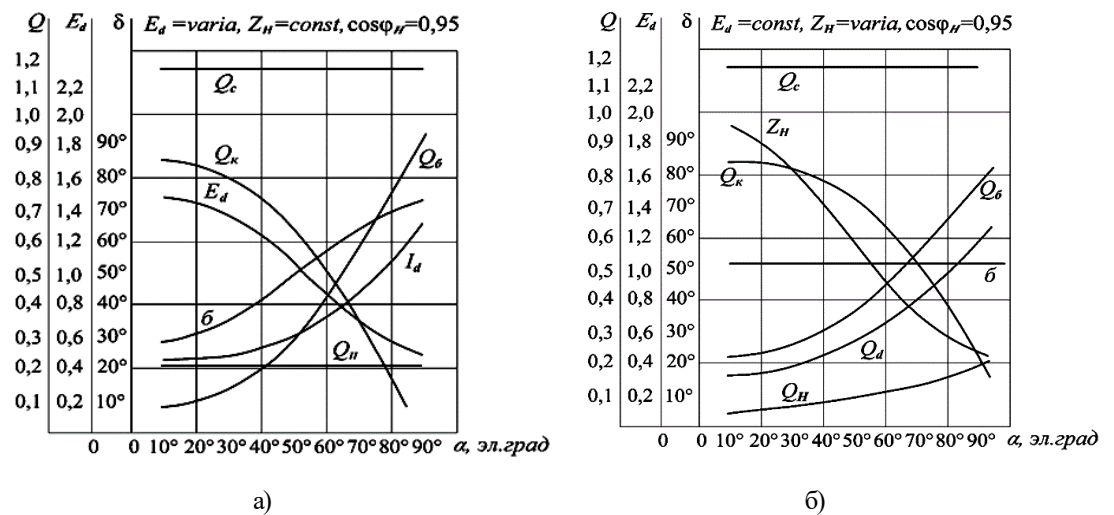


Рис. 3. Режимные характеристики ВП при  $U_{ввх} = \text{const}, \cos\varphi_n = 0,95$ : а)  $E_d = \text{varia}, Z_n = \text{const}$ ; б)  $E_d = \text{const}, Z_n = \text{varia}$

Fig. 3. Operating characteristics of the VC at  $U_{ex} = \text{const}, \cos\varphi_n = 0,95$ : а)  $E_d = \text{varia}, Z_n = \text{const}$ ; б)  $E_d = \text{const}, Z_n = \text{varia}$

С помощью представленных режимных характеристик ВП, полученных на основе машинных экспериментов, проведенных по разработанным программам, можно определить диапазон регулирования и параметры элементов схемы, обеспечивающие требуемые функциональные и схематические показатели исследуемой схемы при изменении входных и выходных параметров.

#### 4. Заключение (Conclusions)

На основе проведенного исследования были сделаны следующие выводы:

1. Создана методика математического моделирования и исследования статических и динамических режимов ВП на базе однофазных АИТ, которая может эффективно использоваться при проектировании ВП, обеспечивающих регулирование и стабилизацию выходного напряжения с включенными на его выходы дополнительными устройствами фильтрации и компенсации выходного напряжения.

2. С помощью разработки универсальных ОСЗ, эквивалентных нескольким состояниям силовой схемы, созданы обобщенные математические модели, позволяющие сократить количество структур силовой схемы, при которых в развитии процессов могут участвовать вместо возможных шести ОСЗ только две.

3. Используя режимные характеристики, можно определить параметры элементов схемы, обеспечивающие требуемые функциональные и схематические показатели исследуемых схем ВП при изменении входных и выходных параметров, а также позволяют определить диапазон регулирования угла КУ, обеспечивающий стабилизацию выходного напряжения с сохранением коммутационной устойчивости ВП.

4. Хорошее совпадение кривых мгновенных значений выходных токов и напряжений, полученных экспериментально и расчетом, иллюстрирует правильность разработанных алгоритмов и программ, что создает предпосылки для качественного проектирования исследуемых схем ВП, минуя трудоемкий и дорогостоящий этап физического моделирования.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аллаев К.Р. Современные сценарии трансформации энергетики мира и Узбекистана. //Проблемы энерго и ресурсосбережения. -2021, № 1. -С. 11-27.

2. Мальнев А.И., Баховцев И.А., Зиновьев Г.С. Обзор многоуровневых инверторов тока ветроэнергетических станций. //Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2015. Т.326. №7.- С. 15-26.

3. Mahendra Lalwani, D. P. Kothari, Mool Singh, Investigation of Standalone Current Source Inverter for Photovoltaic System. *International Journal of Physical and Mathematical Sciences* Vol 3, No 1 (2012), pp. 91-97.
4. Васильев Д.А., Пантелеева Л.А., Грачева Е.И. Оптимизации режима работы асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором. *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. 2022;24(6):92-101. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2022-24-6-92-101>.
5. Rakhmonov I.U., Reymov K.M. Regularities of change of energy indicators of the basic technological equipment of the cotton cleaning industry// *Journal of Physics: Conference Series*. APITECH-2019. – 2019. DOI: 10.1088/1742-6596/1399/5/055038.
6. Norkhojaeva, N.N., Pirmatov, N.B., Kamalov, N.K. Mathematical model for calculating transients of a single-pole synchronous machine of longitudinally transverse excitation. *E3S Web of Conferences*, 2023, 402, 10041 / DOI 10.1051/e3sconf/202340210041
7. Pirmatov, N.B., Egamov, A.M., Giyasov, C.M., ...Ergashov, Sh.O., Nizamov, J.A. Some aspects of comparing the operational properties of synchronous machines with a conventional and two mutually shifted excitation windings. *E3S Web of Conferences*, 2023, 401, 03056 / DOI 10.1051/e3sconf/202340103056.
8. Pirmatov N., Panoev A., Samatova G., Berdiyoyrov O. Determination of methods of achieving the energy savings through mathematical modeling of static and dynamic modes of electromagnetic energy conversion in asynchronous motors used in feed crushers. *E3S Web of Conferences*, 383, 040460, (2023) <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202338304046>.
9. N. Pirmatov., A. Bekishev., A. Egamov., S. Shernazarov., F. Isakov., M. Zubaydullayev. Mathematical Modeling of the Self-Swinging Process of Synchronous Generators. *AIP Conference Proceedings* 2612, 050005 (2023) <https://doi.org/10.1063/5.0135546>
10. Toirov O., Ivanova V., Tsyapkina V., Jumaeva D., Abdullaeva D. *E3S Web of Conferences*, 2023, 411, 01041. (2023). <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202341101041>.
11. Tsyapkina V.V., Ivanova V.P., Jurayeva K.K. *E3S Web of Conferences*, 2023, 401, 03036. (2023). <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20234010303614>.
12. Рахмонов И.У., Реймов К.М. Математические модели и алгоритмы оптимального управления нагрузкой электропотребителей // *Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ*. – 2019. – № 62 (6). – С. 528–535. URL: <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-6-528-535> (дата обращения 15.09.2023).
13. Hongru Yu, Jianhui Su, Haining Wang, Yiding Wang, Yong Shi., Modelling method and applicability analysis of a reduced-order inverter model for microgrid applications *IET Power Electron.*, 2020, 13, pp. 2638-2650.
14. Закарюкин В.П., Крюков А.В., Алексеенко Е.А. Анализ применимости упрощенных моделей внешней сети для определения токов короткого замыкания в системах тягового электроснабжения железных дорог // *Вестник Казанского государственного энергетического университета. Проблемы энергетики*, 2017, том 19, № 11,12. С. 12-20.
15. Трудоношин В.А., Федорук В.Г. Модифицированный метод переменных состояния // *Машиностроение и компьютерные технологии*. 2019. № 06. С. 19–28.
16. Han, Y, Yang, M., Yang, P., et al.: ‘Reduced-order model for dynamic stability analysis of single-phase islanded microgrid with BPF-based droop control scheme’, *IEEE Access*, 2019, 7, pp. 157859–157872.
17. Han, Y., Yang, M., Yang, P., et al.: ‘Approximate Kron reduction methods for electrical networks with applications to plug-and-play control of AC islanded microgrids’, *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, 2019, 27, (6), pp. 2403–2416.
18. Nikolakakos I.P., Zeineldin H.H., El-Moursi M.S., et al. Reduced-order model for inter-inverter oscillations in islanded droop-controlled microgrids, *IEEE Trans. Smart Grid*, 2018, 9, (5), pp. 4953–4963.
19. Gu Y., Bottrell N., Green T.C. Reduced-order models for representing converters in power system studies, *IEEE Trans. Power Electron.*, 2018, 33, (4), pp. 3644–3654.
20. Chen J., O'Donnell T. Analysis of virtual synchronous generator control and its response based on transfer functions, *IET Power Electron.*, 2019, 12, (11), pp. 2965–2977.
21. Juneja M., Nagar S.K., Mohanty S.R. ABC based reduced order modeling of microgrid in grid-tied mode, *Control Eng. Pract.*, 2018, 84, (4), pp. 337–348.
22. Pan, D., Ruan, X., Wang, X., et al.: ‘Analysis and design of current control schemes for LCL-type grid-connected inverter based on a general mathematical model’, *IEEE Trans. Power Electron.*, 2017, 32, (6), pp. 4395–4410.
23. Сапаев Х.Б., Мочалов А.И., Умаров Ш.Б. О неадекватности модели трехфазного мостового выпрямителя при кусочно-линейной аппроксимации характеристик вентилялей. *Электричество*, 2020, №6, с. 39–44. DOI:10.24160/0013-5380-2020-6-39-44.



24. Умаров Ш.Б., Рахматов Д.Д. Расчет переходных процессов в стабилизированных источниках питания на базе однофазного последовательного инвертора тока. Вестник Туринского политехнического университета в городе Ташкенте. №3, 2019.С. 84-89.
25. Сапаев Х.Б., Умаров Ш.Б. Исследование динамических режимов стабилизированных источников питания на основе автономных инверторов тока. –Ташкент: Изд. «Университет», 2021. - 124 с.
26. Сапаев Х.Б., Умаров Ш.Б. Эффективный способ математического моделирования для проектирования трехфазного параллельного инвертора с отсекающими вентилями //Проблемы энерго-и ресурсосбережения. -2021, Специальный выпуск. С. 198-203.
27. Shukhrat Umarov. Dependence of Current Inverter Critical Frequencies on its Load Parameters. 2023 International Russian Smart Industry Conference (SmartIndustryCon) | 978-1-6654-6429-1/23/\$31.00 ©2023 IEEE. doi: 10.1109/SmartIndustryCon57312.2023.10110751.
28. Климаш В.С., Табаров Б.Д. Реакторно-тиристорное регулирующее и компенсирующее устройство для трансформаторных подстанций систем электроснабжения. Известия ТулГУ. Технические науки. 2019. Вып. 2.

## REFERENCES

1. Allaev K.R. Modern scenarios for energy transformation in the world and Uzbekistan // *Problems of energy and resource conservation*. 2021. no. 1. pp. 11-27. (In Russ.).
2. Malnev A.I., Bahovtsev I.A., Zinovev G.S. Review of multi-level current inverters for wind power stations // *News of Tomsk Polytechnic University. Georesources Engineering*. 2015. V.326. №7.- pp. 15-26. (In Russ.).
3. Mahendra Lalwani, D. P. Kothari, Mool Singh, Investigation of Standalone Current Source Inverter for Photovoltaic System // *International Journal of Physical and Mathematical Sciences*, Vol 3, no 1 (2012), pp. 91-97.
4. Vasiliev D.A., Panteleeva L.A., Gracheva E.I. Optimization of the operating mode of a squirrel-cage induction motor // *Power engineering: research, equipment, technology*. 2022. no.24(6):92-101. (In Russ.) <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2022-24-6-92-101>
5. Rakhmonov I.U., Reymov K.M. Regularities of change of energy indicators of the basic technological equipment of the cotton cleaning industry// *Journal of Physics: Conference Series*. APITECH-2019. – 2019. DOI: 10.1088/1742-6596/1399/5/055038.
6. Norkhojaeva, N.N., Pirmatov, N.B., Kamalov, N.K. Mathematical model for calculating transients of a single-pole synchronous machine of longitudinally transverse excitation // *E3S Web of Conferences*, 2023, 402, 10041. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202340210041>
7. Pirmatov N.B., Egamov A.M., Giyasov C.M., Ergashov Sh.O., Nizamov J.A. Some aspects of comparing the operational properties of synchronous machines with a conventional and two mutually shifted excitation windings // *E3S Web of Conferences*, 2023, 401, 03056 <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202340103056>
8. Pirmatov N., Panoev A., Samatova G., Berdiyurov O. Determination of methods of achieving the energy savings through mathematical modeling of static and dynamic modes of electromagnetic energy conversion in asynchronous motors used in feed crushers // *E3S Web of Conferences*, 383, 040460, 2023. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202338304046>
9. N. Pirmatov., A. Bekishev., A. Egamov., S. Shernazarov., F. Isakov., M. Zubaydullayev. Mathematical Modeling of the Self-Swinging Process of Synchronous Generators // *AIP Conference Proceedings* 2612, 050005 (2023) <https://doi.org/10.1063/5.0135546>.
10. Toirov O., Ivanova V., Tsyapkina V., Jumaeva D., Abdullaeva D. *E3S Web of Conferences*, 2023, 411, 01041. 2023. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202341101041>.
11. Tsyapkina V.V., Ivanova V.P., Jurayeva K.K. *E3S Web of Conferences*, 2023, 401, 03036. (2023). <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20234010303614>.
12. Rakhmonov I.U., Reymov K.M. Mathematical models and algorithms of optimal load management of electricity consumers // *Proceedings of CIS higher education institutions and power engineering associations*, 2019, vol. 62, no. 6, pp. 528–535. (In Russ.). <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-6-528-535>
13. Hongru Yu, Jianhui Su, Haining Wang, Yiding Wang, Yong Shi. Modelling method and applicability analysis of a reduced-order inverter model for microgrid applications *IET Power Electron.*, 2020, 13, pp. 2638-2650.
14. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V., Alekseenko E.A. Analysis of applicability of external network simplified models for definition of short circuit currents in systems of railroad traction power supply // *Power engineering: research, equipment, technology*. 2017. 19(11-12):12-20. (In Russ.) <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2017-19-11-12-12-20>



15. Trudnoshin V.A., Fedoruk V.G. Modified method of state variables // *Mechanical engineering and computer technologies*. 2019. № 06. pp. 19–28. (In Russ.).
16. Han, Y, Yang, M., Yang, P., et al.: ‘Reduced-order model for dynamic stability analysis of single-phase islanded microgrid with BPF-based droop control scheme’, *IEEE Access*, 2019, 7, pp. 157859–157872.
17. Han Y., Yang M., Yang P. Approximate Kron reduction methods for electrical networks with applications to plug-and-play control of AC islanded microgrids. *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, 2019, 27, (6), pp. 2403–2416.
18. Nikolakakos I.P., Zeineldin H.H., El-Moursi M.S., et al.: Reduced-order model for inter-inverter oscillations in islanded droop-controlled microgrids, *IEEE Trans. Smart Grid*, 2018. no.9(5), pp. 4953–4963.
19. Gu Y., Bottrell N., Green T.C.: Reduced-order models for representing converters in power system studies, *IEEE Trans. Power Electron.*, 2018. no.33(4), pp. 3644–3654.
20. Chen J., O'Donnell T. Analysis of virtual synchronous generator control and its response based on transfer functions, *IET Power Electron.*, 2019, no.12(11), pp. 2965–2977.
21. Juneja M., Nagar S.K., Mohanty S.R. ABC based reduced order modeling of microgrid in grid-tied mode // *Control Eng. Pract.*, 2018. no.84(4). pp. 337–348.
22. Pan D., Ruan X., Wang X. Analysis and design of current control schemes for LCL-type grid-connected inverter based on a general mathematical model // *IEEE Trans. Power Electron.*, 2017. no.32, (6). pp. 4395–4410.
23. Sapaev X.B., Mochalov A.I., Umarov Sh.B. On the inadequacy of the three-phase bridge rectifier model for piecewise linear approximation of valve characteristics // *Electricity*, 2020. no.6, pp. 39–44. (in Russ). <https://doi.org/10.24160/0013-5380-2020-6-39-44>.
24. Umarov Sh.B., Rakhmatov D.D. Calculation of transient processes in stabilized power supplies based on a single-phase series current inverter // *Bulletin of the Turin Polytechnic University in Tashkent*. no.3, 2019. pp. 84–89. (In Russ.).
25. Sapaev Kh.B., Umarov Sh.B. Study of dynamic modes of stabilized power supplies based on autonomous current inverters // *Tashkent, Publishing house "University"*, 2021. 124 p. (In Russ.).
26. Sapaev Kh.B., Umarov Sh.B. An effective method of mathematical modeling for the design of a three-phase parallel inverter with shut-off valves // *Problems of energy and resource saving*. 2021, Special issue. pp. 198–203. (In Russ.).
27. Shukhrat Umarov. Dependence of Current Inverter Critical Frequencies on its Load Parameters. 2023 International Russian Smart Industry Conference (SmartIndustryCon) | 978-1-6654-6429-1/23/\$31.00 ©2023 IEEE. <https://doi.org/10.1109/SmartIndustryCon57312.2023.10110751>
28. Klimash V.S., Tabarov B.D. Reactor-thyristor regulating and compensating device for transformer substations of power supply systems // *News of Tula State University. Technical science*. 2019. Vol. 2. (In Russ.).