

На правах рукописи



Иванов Илья Алексеевич

СИНТЕЗ АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ АВТОНОМНЫМИ
ГЕНЕРИРУЮЩИМИ КОМПЛЕКСАМИ НА ОСНОВЕ СИНХРОННЫХ
ГЕНЕРАТОРОВ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ ИЗ УСЛОВИЯ
УСТОЙЧИВОЙ РАБОТЫ

Специальность 2.4.2. – Электротехнические комплексы и системы

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Новосибирск – 2026

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет».

Научный руководитель: **Котин Денис Алексеевич,**

кандидат технических наук, доцент

Официальные оппоненты:

Колпахчян Павел Григорьевич,

доктор технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I» (г. Санкт-Петербург) кафедра «Электрическая тяга», профессор;

Николаев Александр Аркадьевич,

кандидат технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» (г. Магнитогорск), кафедра автоматизированного электропривода и мехатроники, заведующий кафедрой.

Ведущая организация:

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» (г. Екатеринбург).

Защита диссертации состоится 11 июня 2026 г. в 10:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.347.07 при федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет» по адресу: Россия, 630073, г. Новосибирск, пр-т К. Маркса, 20, I корпус, конференц-зал. С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Новосибирского государственного технического университета и на сайте организации <https://www.nstu.ru>.

Автореферат разослан « ____ » апреля 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
24.2.347.07,
канд. техн. наук

Дыбко Максим Александрович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Одной из современных тенденций развития систем распределённой генерации, в рамках концепции *microgrid* (распределенная сеть), является использование различных источников энергии в едином электротехническом комплексе, при этом ключевой задачей становится их синхронизация для осуществления управляемых потоков мощности.

Вышеописанный принцип организации электротехнического комплекса позволяет обеспечить высокую надёжность и качество электроснабжения различного рода потребителей, однако при его функционировании, из-за влияния нестационарности и внешних возмущающих воздействий, могут возникать неустойчивые режимы работы, например, вследствие кратковременного отключения от распределительной сети или в результате неконтролируемого обмена мощностью между распределёнными источниками энергии и локальными нагрузками. В настоящее время разработано большое количество различных технических решений в данной прикладной области, позволяющих демпфировать проявление нежелательных статических и динамических факторов, из которых наибольшее практическое применение имеет структура *DC microgrid* (распределенная сеть постоянного напряжения), или, иначе, *microgrid* с общей шиной постоянного тока с соответствующими алгоритмами управления.

Техническая реализация данной архитектуры включает в себя типовой набор устройств силовой электроники на полностью управляемых полупроводниковых ключах, а именно: DC/DC-, AC/DC- и DC/AC-преобразователи, которые выполняют функцию стабилизации напряжения на общей шине постоянного тока в совокупности с одновременным электропитанием различных потребителей. При этом принято считать, что наибольшее влияние на устойчивость протекающих процессов в электротехническом комплексе системы электроснабжения оказывают скачкообразные возмущения со стороны нагрузки, что приводит к необходимости введения соответствующих ограничений на режимы ее работы и, как правило, труднореализуемо на практике по техническим или экономическим соображениям.

На основании вышеизложенного можно заключить, что корректный анализ влияния параметров электротехнического комплекса на устойчивость распределённой системы генерации является актуальной научно-прикладной задачей, имеющей важное значение.

Степень разработанности

Исследованию режимов работы распределенных систем электроснабжения, удовлетворяющих базовым принципам построения *microgrid*, посвящено большое количество публикаций как отечественных, так и зарубежных авторов, среди которых можно отметить работы С. А. Харитоновой, Е. А. Денисенко, О. В. Крюкова, А. В. Серебрякова, А. Л. Куликова, Ю. Н. Булатова, А. В. Крюкова, П. В. Илюшина и др., а также Ф.

Blaabjerg, A. Forrai, X. Wang, R. A. Ramos, S. Mekhilef, C. Marnay, R. Bayerer, J. Lutz, H. Akagi, A. Nabae.

В рассмотренных работах большое внимание уделяется анализу устойчивости электротехнических систем с использованием силовых полупроводниковых преобразователей на двух различных уровнях: общесистемном и узлом, причем на каждом из них применяются соответствующие допущения, которые существенно влияют на итоговые оценки запасов устойчивости системы по модулю и фазе. В большинстве случаев на двух предложенных уровнях декомпозиции системы проводят анализ влияния на устойчивость процессов только для параметров преобразователя.

На основании вышесказанного была сформулирована цель диссертационного исследования.

Целью диссертационной работы является разработка методик настройки параметров алгоритмов управления электротехническими комплексами систем электроснабжения автономных потребителей, обеспечивающих компенсацию неустойчивых режимов работы.

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе необходимо решить следующие **задачи**.

1. Выполнить анализ типовых структур и узлов систем автономного электроснабжения, функционирующих как в режиме подключения к распределительной сети, так и в автономном (изолированном) режиме работы. Обоснованно выбрать для исследования архитектуру и состав компонентов всей электротехнической системы.

2. Произвести унификацию способа структурно-параметрического синтеза систем автоматического управления преобразователями постоянного напряжения и выполнить их апробацию методом цифрового моделирования.

3. Выполнить анализ электротехнической системы автономного электроснабжения с целью определения областей ее неустойчивого функционирования. Сформулировать и обосновать причины существования выявленных областей неустойчивости.

4. Разработать способы повышения запасов устойчивости электротехнического комплекса системы электроснабжения автономного потребителя схемотехническим и алгоритмическим методам, гарантирующие его устойчивое функционирование во всем рабочем диапазоне до номинальной мощности.

Объектом исследования являются компоненты электротехнического комплекса и его алгоритмы управления в составе системы электроснабжения автономного потребителя.

Предметом исследования являются схемотехнические и алгоритмические методы исключения неустойчивых режимов работы электротехнического комплекса системы электроснабжения в автономном исполнении.

Научная новизна основных результатов диссертационной работы заключается в следующем:

1. Разработана структурно-параметрическая методика синтеза унифицированного алгоритма управления силовым преобразователем постоянного напряжения для системы электропитания с общей шиной постоянного тока. Данная методика синтеза отличается от существующих тем, что она позволяет, не меняя структуры системы автоматического управления, получать требуемые качественные и количественные функциональные характеристики для различных топологий силовых преобразователей.

2. Разработана методика определения границы устойчивости электротехнического комплекса системы электроснабжения автономного потребителя. Предлагаемый подход предназначен для анализа автономных электротехнических комплексов при их питании от активно-индуктивного источника энергии с противо-ЭДС, учитывающий параметры силового преобразователя постоянного напряжения и системы управления им. Данный способ предназначен для систем автономного электроснабжения с установленной активной мощностью до 60 кВт и напряжением на шине постоянного тока до 540 В.

3. Предложены схемотехнический и алгоритмический методы обеспечения гарантированной устойчивости процессов в электротехническом комплексе системы электроснабжения автономного потребителя. Разработанные методы отличаются от существующих тем, что устойчивость обеспечивается комбинированным изменением электрических параметров преобразователя и параметрами его системы управления. При этом заведомо не организуются функциональные зоны ограничения мощности электротехнического комплекса, что обеспечивает уменьшение энергетических и массогабаритных показателей элементов системы электроснабжения. Разработанные методы позволяют снизить ёмкость входного силового фильтра преобразователя постоянного напряжения не менее чем в 200% по отношению к существующим методам ее расчета.

Теоретическая и практическая значимость диссертационной работы состоит в следующем.

1. Методика выделения областей неустойчивой работы электротехнического комплекса системы электроснабжения автономного потребителя, учитывающая совокупность параметров источника электрической энергии, силового полупроводникового преобразователя, системы управления и нагрузки. Данные критерии показывают, что электротехнический комплекс автономного электроснабжения потенциально может обладать областью неустойчивого функционирования в диапазоне мощностей до 90% включительно от номинальной величины.

2. Предложенный и обоснованный унифицированный алгоритм управления силовыми преобразователями постоянного напряжения позволяет упростить настройку регуляторов системы управления компонентами электротехнического комплекса. Данная методика синтеза исключает необходимость в проведении сложных предварительных расчетов и реализуется за счет пошаговой инструкции инженерной настройки.

3. Предложенная методика выбора параметров электротехнического

комплекса, таких как, ёмкость силового фильтра и частота сопряжения контура регулирования напряжения, позволит снизить его массогабаритные показатели и обеспечить устойчивые режимы функционирования как на этапе проектирования, так и при практическом применении. Приведены значения емкости силовых фильтров преобразователей постоянного напряжения, при которых процессы будут гарантированно устойчивы, а также предложены расчетные значения для коэффициентов настройки регулятора контура напряжения, при которых возможно уменьшение емкости силового фильтра не менее чем в 2-а раза по отношению к существующим типовым инженерным подходам к проектированию.

На защиту выносятся следующие научные положения:

1. Методика структурно-параметрического синтеза обобщенного унифицированного алгоритма управления силовыми преобразователями постоянного напряжения, позволяющая упростить синтез системы управления преобразователями и охватывающая все известные топологии преобразователей данного типа.

2. Методика выделения области неустойчивого состояния электротехнического комплекса системы электроснабжения автономного потребителя, позволяющая определить её наличие и границы в зависимости как от собственных значений параметров устройства, таких как ёмкость силового фильтра, коэффициент трансформации и индуктивность системы, так и от параметров системы автоматического управления.

3. Схемотехнический и алгоритмический способы компенсации неустойчивого режима работы электротехнического комплекса системы электроснабжения автономного потребителя, апробированные путем математического моделирования, позволяющие гарантированно исключить области неустойчивости.

Достоверность полученных результатов подтверждается корректным выбором математического аппарата, соответствующего поставленным задачам, применением общепринятых допущений, использовании инициализируемых программных приложений для моделирования установившихся и переходных процессов.

Методы исследования: методы теории автоматического управления, линеаризации нелинейных функций с помощью ряда Б. Тейлора, метод имитационного моделирования в программной среде SimInTech с привлечением встроенных средств визуализации и идентификации.

Апробация результатов исследования производилась в рамках следующих мероприятий:

1. XVIII Международной научно-технической конференции «Электроприводы переменного тока» (ЭППТ-2021), г. Екатеринбург.

2. XXIII Всероссийской конференции «Автоматизированный электрический привод» (АЭП-2022), г. Тула.

3. XV Международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения» (АРЕИЕ-2021), г. Новосибирск.

4. XIX и XX международных конференциях «Технические и физические

проблемы инженерии» (ИСТРЕ-2023, ИСТРЕ-2024), г. Баку.

5. VI Международной научно-технической конференции «Пром-инжиниринг» (ИСИЕМ-2020), г. Сочи.

6. Международная научно-техническая конференция по промышленному инжинирингу и современным технологиям «Far East Con» (2019), г. Владивосток.

7. Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Наука и молодежь» (2019–2024 гг.), г. Барнаул.

8. VIII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Современная техника и технологии: проблемы, состояние и перспективы» (2018), г. Рубцовск.

9. XV Всероссийской научно-технической конференции «Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем» (2023), г. Чебоксары.

10. XVII Международной научно-практической конференции молодых учёных «Актуальные проблемы современного общества. Язык, культура и технологии в изменяющемся мире» (2020), г. Новосибирск.

11. Всероссийской научно-практической конференции студентов, магистрантов и аспирантов с международным участием «Aspire to science» (2020), г. Новосибирск.

12. Научных семинарах кафедры Электропривода и автоматизации промышленных установок Новосибирского государственного технического университета.

Результаты работы опубликованы в 38 печатных работах, 2 из которых представлены в рецензируемых научных журналах из списка ВАК, 4 являются патентами на полезную модель, 4 – патентами на изобретение, 7 изданы в журналах и трудах конференций, индексируемых в базах цитирования Scopus и Web of Science, 23 входят в труды всероссийских и международных конференций, а 2 включены в репозитории препринтов.

Результаты диссертационного исследования применялись при выполнении НИР и НИОКР в рамках следующих грантов и договоров:

– грант в рамках реализации программы развития НГТУ, научный проект №22-22 «Исследование устойчивых режимов работы и их достижения в системе электрической генерации автономного потребителя» (2022 г.);

– договор №41/2023-О об отчуждении исключительного права на Преобразователь от 21 апреля 2023 г;

- программы развития ФГБОУ ВО «НГТУ» на 2021-2030 гг. в рамках федеральной программы стратегического академического лидерства «Приоритет 2030».

Личный вклад автора в печатных работах, опубликованных в соавторстве с научным руководителем, заключается в разработке методик синтеза унифицированного алгоритма управления силовым полупроводниковым стабилизатором постоянного напряжения, проведении анализа устойчивости автономной системы электропитания, трактовке

полученных результатов, коррекции качества переходных процессов во временной области на основе схмотехнического и алгоритмического методов, формировании обобщённого условия устойчивости функционирования электротехнического комплекса системы электроснабжения автономного потребителя, разработке математических моделей и их практической валидации, формулировании обобщенных выводов. Постановка цели и задач диссертационного исследования осуществлялась совместно с научным руководителем доц. Котиным Д. А.

Структура и объем диссертации состоят из введения, основной части из 4 глав, заключения, списка литературы из 133 наименований и 5 приложений. Общий объем диссертации составляет 198 страницы, в том числе 149 рисунков и 9 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении выполнена постановка диссертационного исследования, описана научная новизна и практическая значимость, обоснована степень достоверности полученных результатов и их применимость к решению практических задач в прикладной области знаний, относящейся к управлению распределенными системами генерации электрической энергии.

В первой главе проведен анализ процессов в электротехническом комплексе электроснабжения автономного потребителя, на основании которого была определена его базовая структура и алгоритмические принципы построения.

Во второй главе представлены способы разработки и расчета параметров регуляторов двухконтурной системы управления силовыми DC/DC преобразователями различных топологий в составе распределенной системы генерации в автономном исполнении с общей шиной постоянного тока. В качестве объекта управления в контуре тока рассматривается пропорциональное звено, а в контуре управления напряжением – интегральное звено.

Для каждого из рассмотренных в первой главе устройств силовой электроники на полностью управляемых полупроводниковых ключах были получены регулировочные характеристики выходного тока в функции частоты широтно-импульсной модуляции (ШИМ) $f_{\text{ШИМ}}$ и коэффициента заполнения D . Для повышающего преобразователя, выполненного по схеме boost:

$$I_{2\text{boost}} = \frac{1}{2Lf_{\text{ШИМ}}} \cdot \frac{U_1^2}{U_2 - U_1} D^2, \quad (1)$$

– для понижающего преобразователя, выполненного по схеме buck:

$$I_{2\text{buck}} = \frac{1}{2Lf_{\text{ШИМ}}} \cdot (U_2 - U_1) D^2, \quad (2)$$

– для понижающего преобразователя, выполненного по схеме двух активных H-мостов (*dual active bridge* (DAB)):

$$I_{2DAB} = \frac{1}{2\pi k_{тр} Lf_{ШИМ}} \cdot \left(D - \frac{D^2}{\pi} \right), \quad (3)$$

где U_1 – напряжение на входе силового DC-DC преобразователя; U_2 – выходное напряжение; L – значение индуктивности дросселя; $k_{тр}$ – коэффициент трансформации силового согласующего устройства.

На основании формул (1)–(3) в работе были получены коэффициенты передачи линеаризованной модели объекта относительно малой окрестности рабочей точки, обозначенной нижним индексом 0:

$$K_{\text{линboost}} = I_{02} + \left. \frac{dI}{dD} \right|_{D_0} = \frac{P_{02}}{U_{02}} + \frac{D_0}{Lf_{ШИМ}} \cdot \frac{U_1^2}{U_2 - U_1}, \quad (4)$$

$$K_{\text{линbuck}} = I_{02} + \left. \frac{dI}{dD} \right|_{D_0} = \frac{P_{02}}{U_{02}} + \frac{D_0}{Lf_{ШИМ}} \cdot (U_2 - U_1), \quad (5)$$

$$K_{\text{линDAB}} = I_{02} + \left. \frac{dI}{dD} \right|_{D_0} = \frac{P_{02}}{U_{02}} + \frac{U_1}{\pi k_{тр} Lf_{ШИМ}} \cdot \left(\frac{1}{2} - \frac{D_0}{\pi} \right), \quad (6)$$

где D_0 – значение коэффициента заполнения в малой окрестности рабочей точки; I_{02} – рабочее значение тока; P_{02} – рабочее значение мощности; U_{02} – рабочее значение регулируемого напряжения на выходе.

Синтезируемая САУ силовым преобразователем реализовывалась в соответствии с фундаментальными принципами управления по отклонению и каскадного включения регуляторов с организацией внутреннего контура регулирования выходного тока и внешнего по отношению к нему контура регулирования выходного напряжения.

Управление выходным током основывалось на приведении передаточной функции контура в замкнутом состоянии к желаемому виду. На основании регулировочных характеристик, описываемых (1–3) и коэффициентов передачи объекта в точке линеаризации (4–6), в ходе диссертационного исследования был сформулирован обобщённый способ разработки и расчета параметров регуляторов алгоритмов управления силовыми преобразователями данного класса. Форма переходного процесса по току преобразователя задавалась в виде стационарного апериодического звена с передаточной функцией вида:

$$W_I(p) = \frac{I_2(p)}{I_p(p)} = \frac{K_{\text{об.с.}I}^{-1}}{(K_{\text{лин}} K_{I.I.} K_{\text{об.с.}I})^{-1} p + 1}, \quad (7)$$

где p – оператор дифференцирования, $K_{\text{об.с.}I}$ – коэффициент передачи в канале обратной связи по току; $K_{I.I.}$ – коэффициент передачи интегрального регулятора.

С учетом настройки системы управления на желаемый вид передаточной функции, в виде апериодического звена, коэффициент передачи интегрального регулятора примет вид:

$$K_{I.I.} = \omega_{ж} (K_{\text{об.с.}I} K_{\text{лин}})^{-1}, \quad (8)$$

где $\omega_{ж}$ – желаемая частота контура тока, определяемая как:

$$\omega_{жс} = 2\pi f_{ШИМ} K_I^{-1},$$

где K_I – коэффициент разделения частоты контура тока от частоты ШИМ, определяемый по теореме Котельникова-Шеннона.

Параметры пропорционально-интегрального последовательного корректирующего устройства по выходному напряжению силового DC-DC преобразователя определялись из передаточной функции контура напряжения в замкнутом состоянии, по аналогии с контуром тока:

$$W_U(p) = \frac{U_2(p)}{U_p(p)} = \frac{K_{P.U.} (C_2 K_{об.с.I})^{-1} p + K_{I.U.} (C_2 K_{об.с.I})^{-1}}{p^2 + K_{P.U.} K_{об.с.U} (C_2 K_{об.с.I})^{-1} p + K_{I.U.} K_{об.с.U} (C_2 K_{об.с.I})^{-1}}, \quad (9)$$

где $K_{об.с.U}$ – коэффициент передачи канала обратной связи, $K_{P.U.}$ – коэффициент пропорциональной составляющей регулятора напряжения, $K_{I.U.}$ – коэффициент интегральной составляющей регулятора напряжения, C_2 – ёмкость выходного силового фильтра.

При приравнивании соответствующих коэффициентов передаточной функции (9) и передаточной функции желаемого вида (выбрана биномиальная стандартная линейная форма), коэффициенты передачи пропорциональной и интегральной части регулятора находятся как:

$$K_{I.U.} = K_{об.с.I} C_2 \omega_n^2 K_{об.с.U}^{-1}, \quad (10)$$

$$K_{P.U.} = A_1 K_{об.с.I} C_2 \omega_n K_{об.с.U}^{-1}, \quad (11)$$

где A_1 – коэффициент формы, ω_n – нормированная частота контура регулирования напряжения, определяемая как:

$$\omega_n = \omega_{жс} K_U^{-1},$$

где K_U – коэффициент разделения частот сопряжения контура напряжения от контура тока, определяемый по теореме Котельникова-Шеннона.

Для снижения перерегулирования вследствие наличия в (9) «левого» нуля передаточной функции, задающее воздействие на стабилизируемое значение напряжения формировалось при помощи апериодического фильтра с постоянной времени $K_{P.U.} K_{I.U.}^{-1}$, а для ограничения интегральной составляющей выхода регуляторов САУ в работе предложено использовать гибкую компенсационную связь.

Для более корректного учета процессов в случае цифровой реализации синтезированного алгоритма управления электротехническим комплексом системы электроснабжения автономного потребителя, переход из непрерывной области в дискретную осуществлялся на основании прямого и обратного методов Л. Эйлера, а также преобразования А. Тастина.

На основании вышеприведённых обобщённых расчётных соотношений, представляется возможным сформулировать способ разработки и расчета параметров регуляторов унифицированного алгоритма управления каждой из 3-х наиболее распространенных топологий преобразователей постоянного напряжения.

В третьей главе диссертационного исследования представлены результаты анализа устойчивости электротехнического комплекса системы

электроснабжения автономного потребителя с учетом конкретного типа распределенного источника энергии.

При анализе устойчивости объекта была определена область его неустойчивой работы, что соответствует системе неравенств:

$$\begin{cases} R_n > R_1, \\ R_n > \frac{L_1}{R_1 C_1}. \end{cases} \quad (12)$$

где R_1 – суммарное активное сопротивление первичной стороны DC/DC преобразователя; L_1 – суммарная индуктивность первичной стороны DC/DC преобразователя; C_1 – емкость входного фильтра DC/DC преобразователя, R_n – эквивалентное значение активного сопротивления нагрузки, приведенное к первичной стороне преобразователя.

Были предложены два метода компенсации неустойчивых режимов работы: схемотехнический и алгоритмический.

Схемотехнический, или иначе пассивный способ, заключается в корректном выборе значения ёмкости силового входного фильтра ($C_1^{\text{мод}}$), которое при соблюдении параметрических ограничений вида (12) находится как:

$$C_1^{\text{мод}} \geq \frac{L_1 P_n}{R_1 U_1^2}. \quad (13)$$

где U_1 – напряжение на первичной и вторичной стороне DC/DC преобразователя; P_n – потребляемая мощность.

Альтернативным данному способу выбора элементов силовой части является подход, который базируется на модификации синтезированного закона управления напряжением из условия ограничения скорости обмена энергией между нагрузкой и входным силовым фильтром в квазиустановившемся режиме, согласно неравенству:

$$\sqrt{\frac{C_1}{L_1}} \cdot \frac{U_1^2}{U_{\text{зад}} I_n + \Delta U_2(t) (\Delta U_2(t) L^{-1} [W_{\text{PH}}(s)] - I_2(t))} \geq 1. \quad (14)$$

где $\Delta U_2(t)$ – отклонение напряжения от квазиустановившегося режима вторичной стороны преобразователя или ошибка регулирования; $U_{\text{зад}}$ – напряжение задания, I_n – ток нагрузки; $L^{-1} [W_{\text{PH}}(s)]$ – обратное преобразования Лапласа регулятора напряжения.

Решение неравенства (14) позволяет получить области допустимых значений параметров электротехнической системы, благодаря которым достигаются устойчивые режимы работы.

Четвертая глава диссертационного исследования посвящена верификации работоспособности обобщенного алгоритма управления, подтверждения возникновения неустойчивого состояния электротехнического комплекса системы электроснабжения автономного потребителя, а также практической верификации разработанных схемотехнического и алгоритмического способов гарантированного обеспечения рабочих режимов.

При исследовании процессов в повышающем преобразователе, в случае подключения к источнику с эквивалентной схемой в виде активно-индуктивной цепи с противо-ЭДС, были определены зоны неустойчивости, описываемые уравнениями (13) – (16) и системой неравенств (22). Для их компенсации использовались схемотехнический и алгоритмический способы, описывающие изменение параметров ёмкости силового входного фильтра (зависимость представлена на рисунке 1а) и частоты сопряжения контура напряжения (зависимость представлена на рисунке 1б).

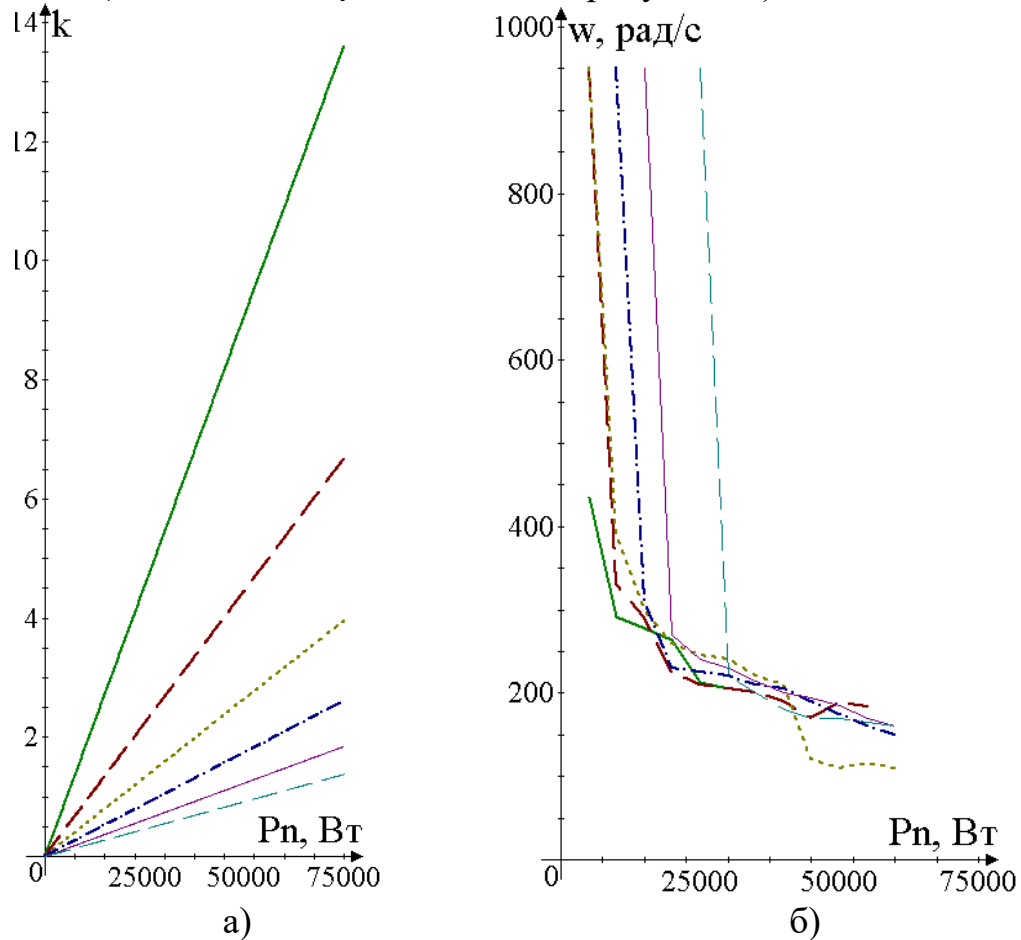


Рисунок 1 – Выбор параметров системы

а) – Коэффициент увеличение ёмкости, б) – Частота сопряжения

— $U=140$ — $U=200$ $U=260$ - · - · $U=320$ — $U=380$ — $U=440$

На рисунках 2а и 2б представлены неустойчивые режимы работы объекта управления, при использовании непрерывного регулятора (непр), – выходное напряжение и выходной ток генератора, при которых наблюдаются автоколебания, выходящие за допустимую ошибку регулирования 5%. При этом в момент времени $t=0.5$ с происходит ступенчатое изменение нагрузки с половины номинальной мощности до её номинальной величины. На рисунках 2в и 2г показано применение схемотехнического способа компенсации, а именно подбор ёмкости силового фильтра согласно рисунку 1а, что приводит к устойчивому режиму работы электротехнической системы. На рисунках 2д и 2е демонстрируется применение алгоритмического способа компенсации, определивший выбор частоты сопряжения контура напряжения, обеспечивающий устойчивое функционирование электротехнической

системы, согласно рисунку 1б.

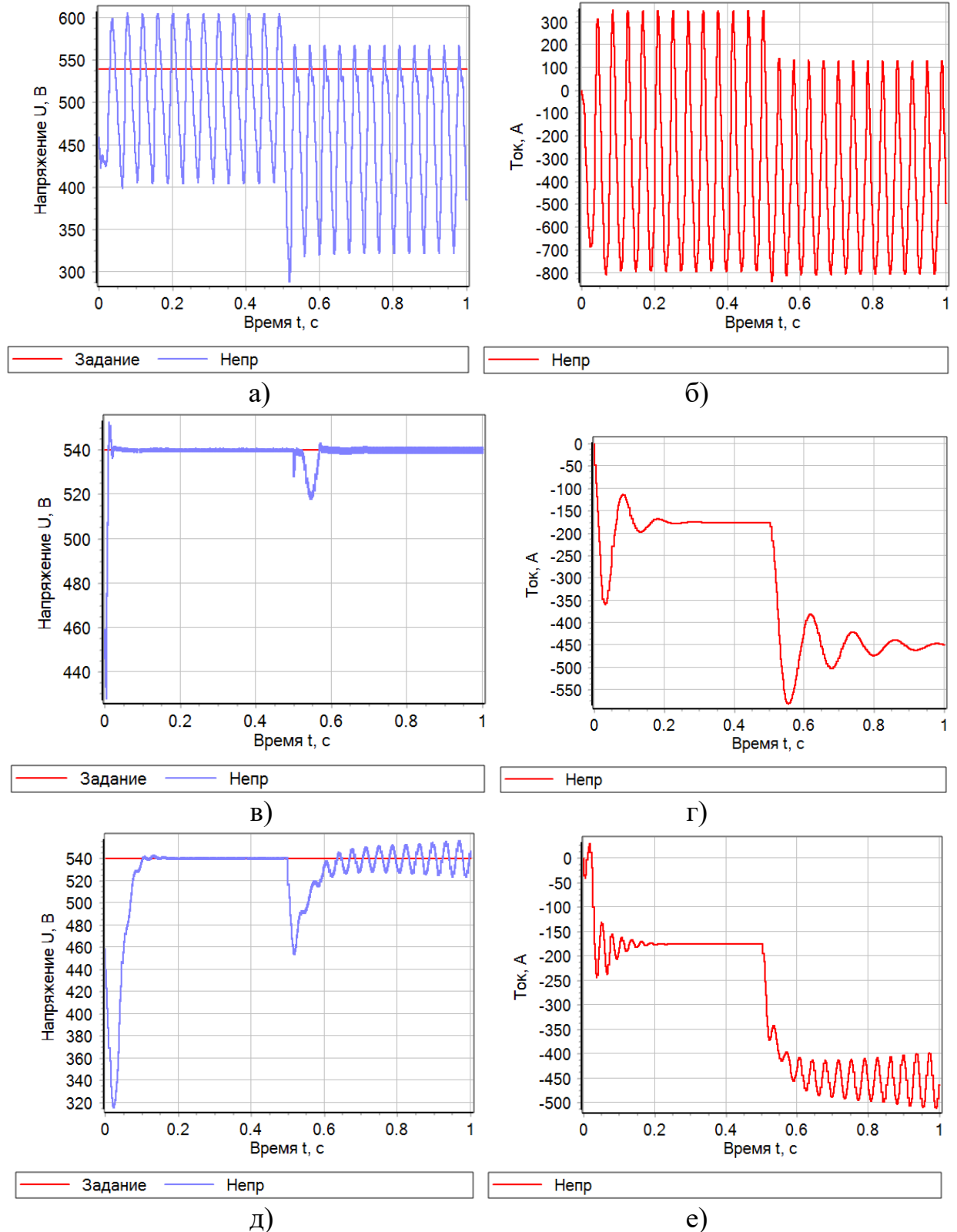


Рисунок 2 – Работа повышающего преобразователя

а) – Выходное напряжение без компенсации, б) – Ток генератора без компенсации, в) – Выходное напряжение со схемотехническим методом, г) – Ток генератора со схемотехническим методом, д) – Выходное напряжение с алгоритмическим методом, е) – Ток генератора с алгоритмическим методом
Предложенные методы компенсации неустойчивых режимов работы

были применены к понижающему преобразователю и двунаправленному изолированному преобразователю. Результаты моделирования режимов работы понижающего и двунаправленного изолированного преобразователя приведены на рисунке 3 и 4.

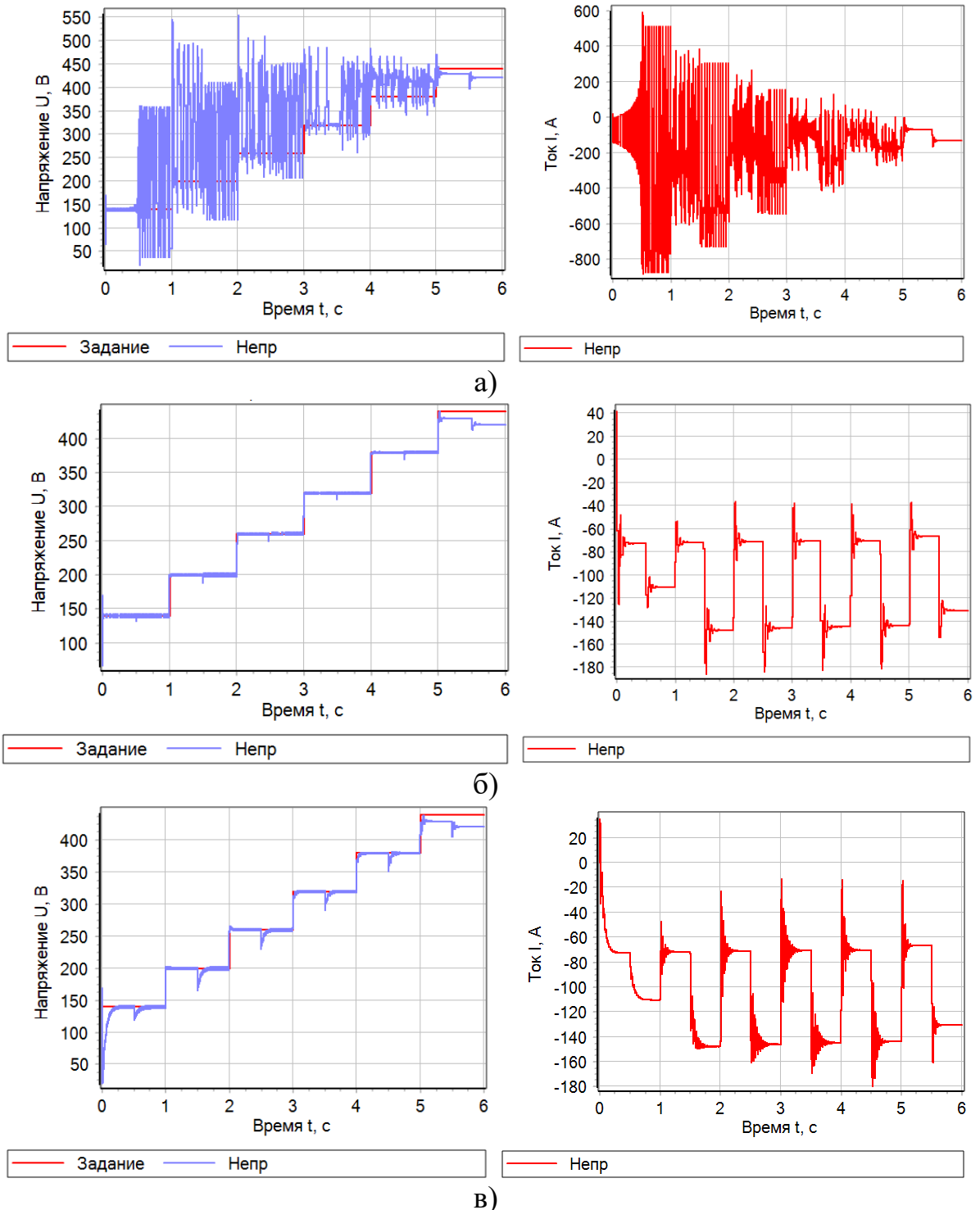


Рисунок 3 – Работа понижающего преобразователя
 а) – Режим без компенсации, б) – Схмотехнический метод,
 в) – Алгоритмический метод

Согласно рисунку 3а понижающий преобразователь имеет область неустойчивого функционирования в диапазоне соответствующим системе неравенств (12). Применение схмотехнического способа, рисунок 3б,

согласно зависимости (13) и рисунка 1а позволяет обеспечить устойчивое функционирование во всем диапазоне работы преобразователя. Такой же результат удаётся достичь при использовании алгоритмического способа, согласно рисунку 1б, результаты которого представлены на рисунке 3в.

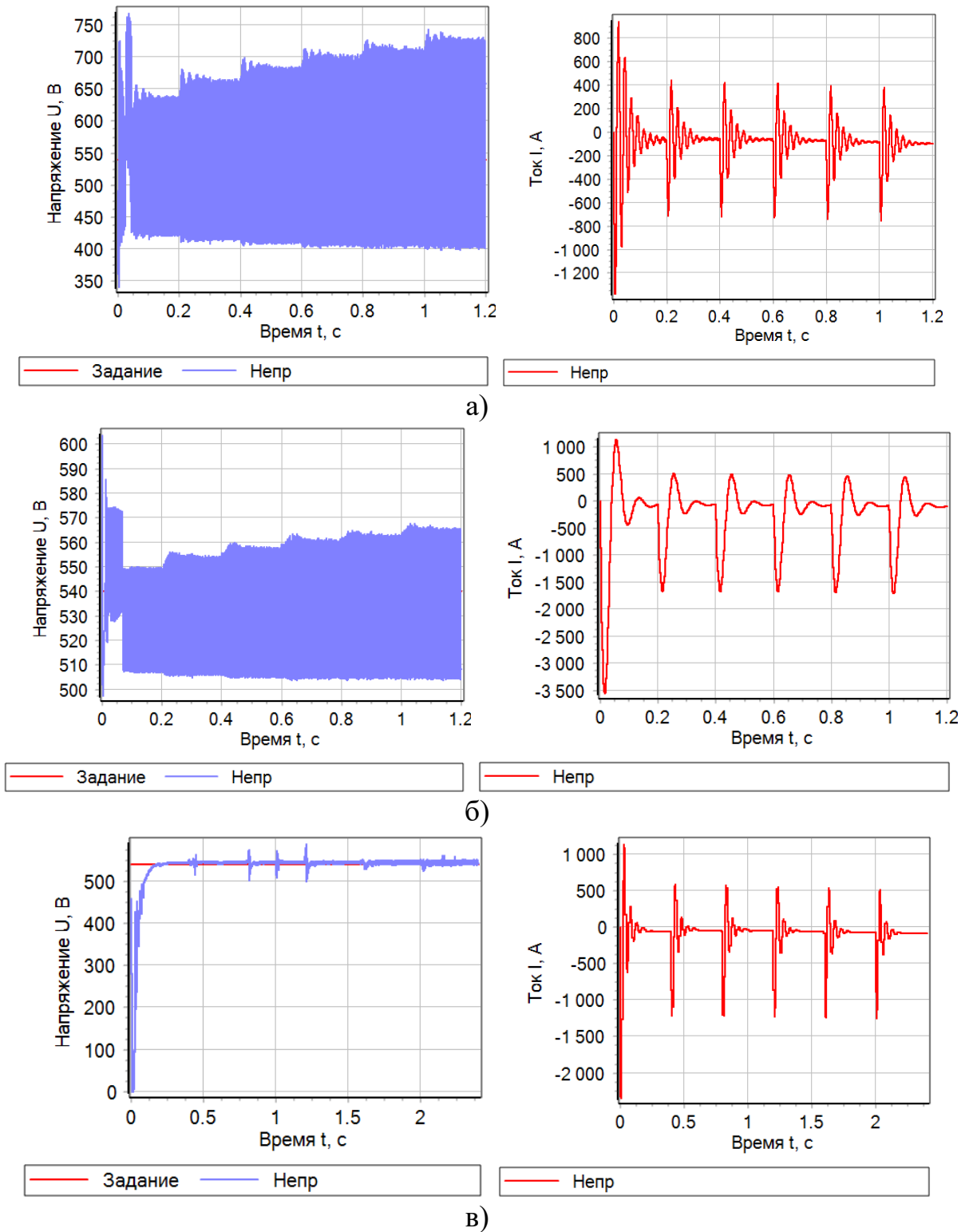


Рисунок 4 – Работа двунаправленного изолированного преобразователя

а) – Режим без компенсации, б) – Схемотехнический метод,

в) – Алгоритмический метод

Как видно из рисунка 4а, в определённом диапазоне параметров

двухнаправленный изолированный преобразователь демонстрирует неустойчивое функционирование, что математически описывается системой неравенств (12). Для обеспечения устойчивости во всём рабочем диапазоне преобразователя возможно применение схемотехнического способа, рисунок бб, основанного на зависимости (13) и иллюстрированного на рисунке 1а. Аналогичного результата позволяет добиться алгоритмический способ, представленный на рисунке 1б; его эффективность подтверждена результатами, приведёнными на рисунке 4в.

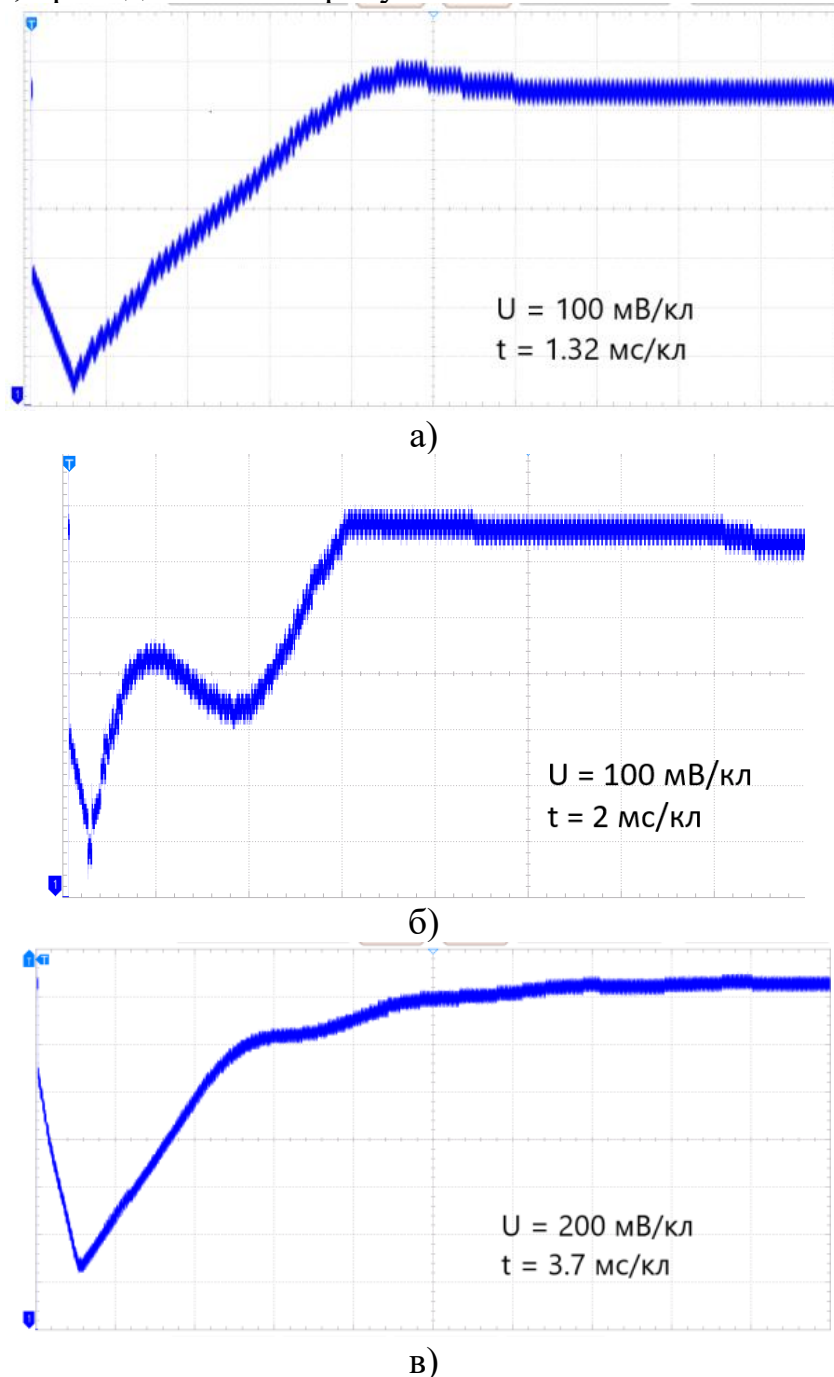


Рисунок 5 – Повышающий преобразователь
 а) – Идеальный источник, б) – Схемотехнический метод, в) –
 Алгоритмический метод

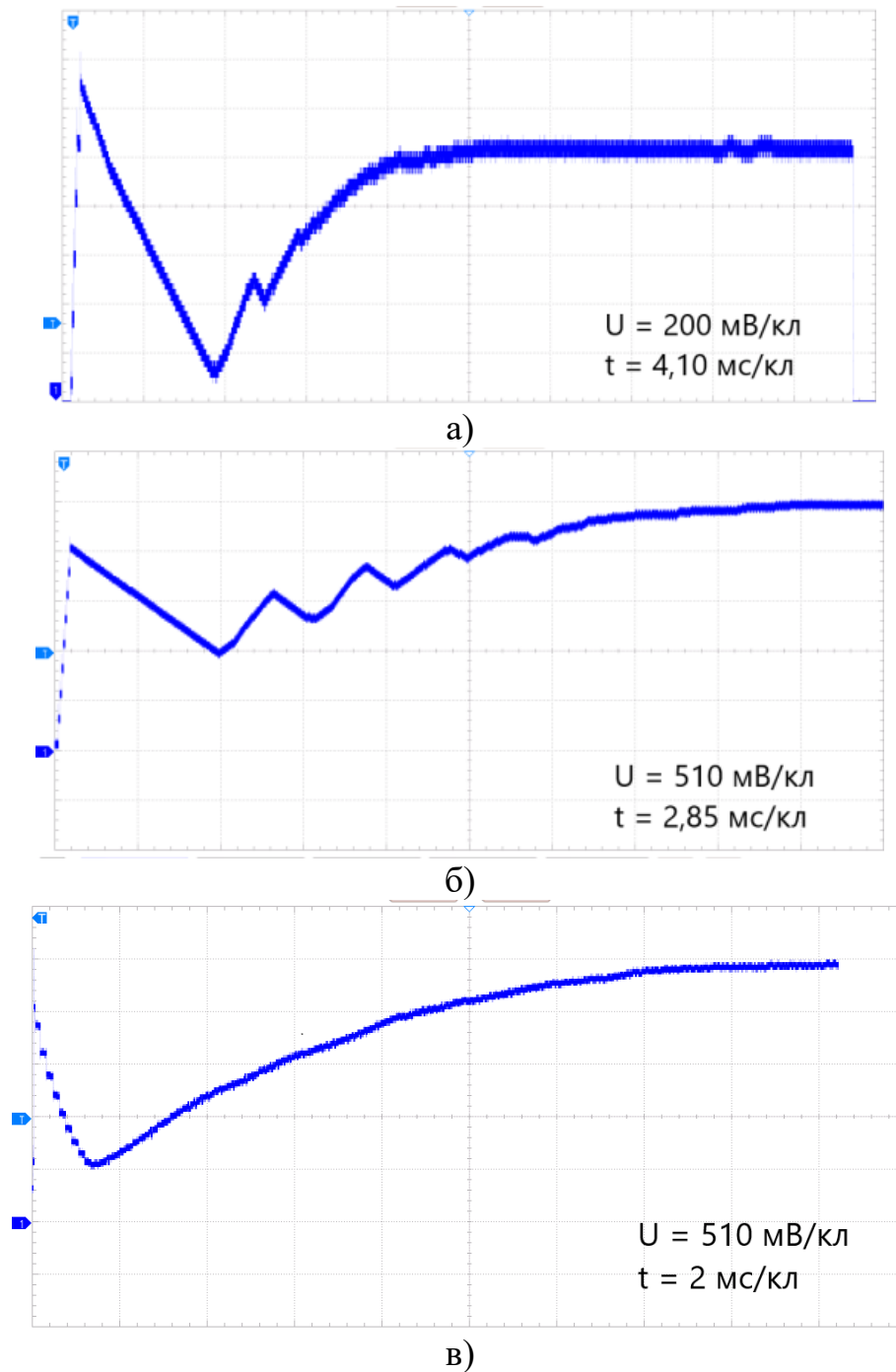
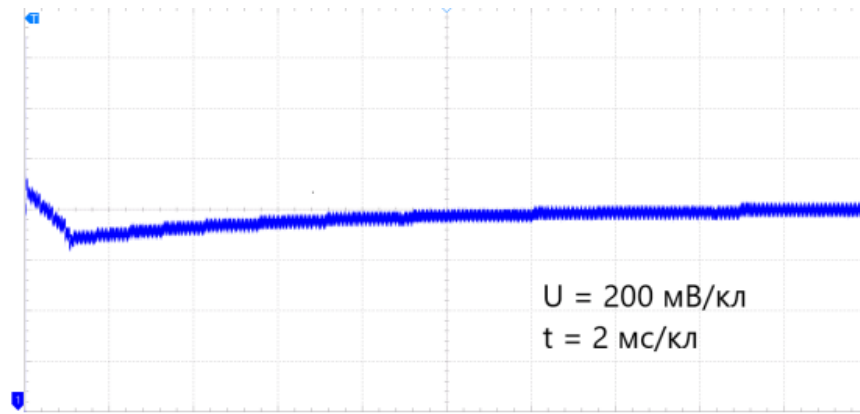


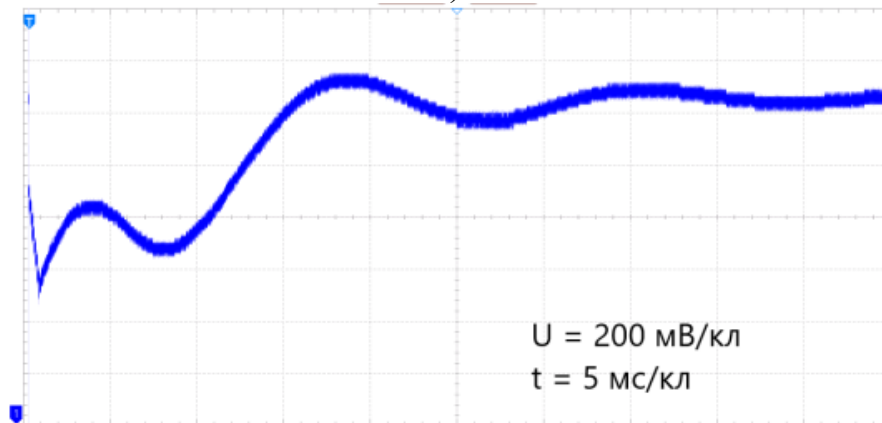
Рисунок 6 – Понижающий преобразователь
 а) – Идеальный источник, б) – Схемотехнический метод,
 в) – Алгоритмический метод

Как видно из рисунков 6 и 7, результаты эксперимента подтверждают результаты моделирования при напряжении в 200 В.

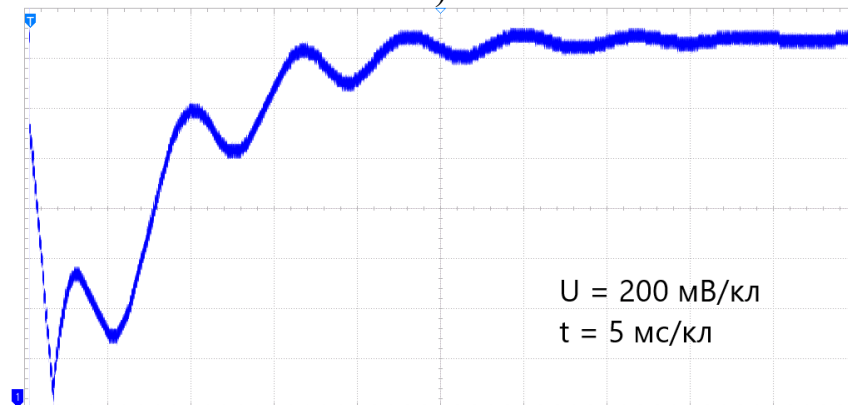
На рисунках 6а и 7а представлена работа от идеального источника напряжения, на рисунках 6б и 7б представлен схемотехнический способ коррекции, на рисунках 6в и 7в представлен алгоритмический способ коррекции.



а)



б)



в)

Рисунок 7 – Двухнаправленный изолированный преобразователь
а) – Идеальный источник, б) – Схемотехнический метод,
в) – Алгоритмический метод

Согласно рисункам 5-7 результаты, полученные путем математического моделирования, соответствуют результатам, полученным при полунатурном моделировании.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Выполнен анализ типовых структур и узлов систем автономного электроснабжения. В результате проведенного анализа, наилучшей с точки зрения объединения в единую энергосистему является конфигурация с общей шиной постоянного тока, включающая в себя силовые DC/DC

преобразователи на полностью управляемых полупроводниковых ключах.

2. Произведена унификация способа структурно-параметрического синтеза систем автоматического управления преобразователей постоянного напряжения. Разработанный подход к унификации позволяет упростить методику проектирования регуляторов преобразователями постоянного напряжения различной топологии. Теоретическая и практическая значимость разработанных структур и подходов к синтезу доказана как средствами цифрового моделирования, так и средствами полунатурального эксперимента.

3. Выполнен анализ устойчивости электротехнического комплекса электроснабжения автономного потребителя с использованием силового DC/DC преобразователя постоянного напряжения и активно-индуктивного источника напряжения с противо-ЭДС, в результате которого были определены две области неустойчивой работы, первая из которых зависит от параметров выходной части преобразователя и возникает в случае перегрузки. Вторая – относится к «нижней», входной, стороне силового DC/DC преобразователя и включает в себя рабочие точки для диапазона генерируемых мощностей до 90% от номинального значения включительно. При этом в диссертации было установлено, что основной причиной возникновения неустойчивости является неблагоприятное сочетание индуктивно-емкостных параметров силовой части, в связи с чем были разработаны схмотехнический и алгоритмический методы, позволяющие обеспечить гарантированное качество процессов электропитания автономных объектов без возникновения автоколебательных режимов и неустойчивости.

4. Верифицированы способы обеспечения гарантированной устойчивости электротехнического комплекса системы электроснабжения автономного потребителя. Предложенные способы позволяют за счет схмотехнического изменения в преобразователе постоянного напряжения, или за счет параметрического изменения в его алгоритме управления обеспечить устойчивые режим работы электротехнического комплекса. Верификация способов обеспечения устойчивости производилась как средствами цифрового моделирования, так и средствами полунатурального эксперимента. Разработанные способы обеспечения устойчивости позволяют осуществлять все режимы функционирования системы электроснабжения автономного потребителя не ниже, чем 100% от его номинальной мощности.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Публикации в рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК:

1. Котин, Д. А. Использование однофазного синхронного многообмоточного генератора с постоянными магнитами для электроснабжения автономного потребителя / Д. А. Котин, И. А. Иванов // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2022. – Т. 24, № 1. – С. 29-38. – DOI 10.30724/1998-9903-2022-24-1-29-38. – EDN TBRQPH.

2. 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. – 26(5). – С. 79-91. – DOI 10.30724/1998-9903-2024-26-5-79-91

Публикации в материалах зарубежных конференций и периодических изданиях, входящих в базу данных Scopus и/или Web of Science:

1. Kotin, D. A. Investigation of the Stability and Frequency Properties of a Generating Complex when Operating on an Autonomous Load / D. A. Kotin, I. A. Ivanov // Proceedings of the 2021 15th International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering, APEIE 2021. – Novosibirsk, 2021. – P. 190-195. – DOI 10.1109/APEIE52976.2021.9647494.

2. Kotin, D. Mathematical modeling of multi-winding synchronous generators with permanent magnets for autonomous consumers / D. Kotin, I. Ivanov, L. Tolstobrova // 2021 18th International Scientific Technical Conference Alternating Current Electric Drives, ACED 2021 - Proceedings. – Ekaterinburg, 2021. – P. 9462302. – DOI 10.1109/ACED50605.2021.9462302.

3. Kotin, D. Modified permanent magnet synchronous generators for using in energy supply system for autonomous consumer / D. Kotin, I. Ivanov, S. Shtukkert // Energies. – 2021. – Vol. 14, No. 21. – DOI 10.3390/en14217196. – EDN IMNPIY.

4. Kotin, D. New type single-phase generator for autonomous consumer / D. Kotin, I. Ivanov // Proceedings - 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2020, Sochi, 18–22 мая 2020 года. – Sochi: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2020. – P. 9112062. – DOI 10.1109/ICIEAM48468.2020.9112062.

5. Halina, T. Sine-cosine Generator / T. Halina, I. Ivanov, M. Stalnaya // 2019 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2019, Vladivostok, 01–04 октября 2019 года. – Vladivostok: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2019. – P. 8934028. – DOI 10.1109/FarEastCon.2019.8934028.

6. Ivanov, I. Determination of unstable area operation of DC/DC converter in power supply system of an autonomous consumer / I. Ivanov, D. Kotin // E International Journal on "Technical and Physical Problems of Engineering" (IJTPE). – 2024. – Vol. 1. - pp. 71-79.

7. D. A. Kotin and I. A. Ivanov, "The Influence of External Factors on the Quality of Output Voltage Regulation in a Dual Active Bridge Converter," 2024 IEEE 25th International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM), Altai, Russian Federation, 2024, pp. 1200-1204, – DOI 10.1109/EDM61683.2024.10615090.

Отпечатано в типографии

Новосибирского государственного технического университета

630073, г. Новосибирск, пр-т Карла Маркса, 20. Тел. +7 (383) 346-08-57

Формат 60 × 84 1/16. Объем 1,25 п.л. Тираж 100 экз. Заказ № P-05292

Подписано в печать 02.04.2026 г.