

На правах рукописи



Панфилов Дмитрий Валерьевич

**ТРЕХФАЗНЫЙ ТРЕХУРОВНЕВЫЙ КВАЗИ-ИМПЕДАНСНЫЙ ИНВЕРТОР
ДЛЯ АВТОНОМНЫХ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ**

Специальность: 05.09.12 – Силовая электроника

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Новосибирск – 2016

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

Научный руководитель – кандидат технических наук, доцент
Баховцев Игорь Анатольевич

Официальные оппоненты: Дмитриков Владимир Федорович,
доктор технических наук, профессор
Федеральное государственное бюджетное образова-
тельное учреждение высшего образования «Санкт-
Петербургский государственный университет теле-
коммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича»
профессор кафедры Теории электрических цепей и
связи

Коняхин Сергей Федорович,
кандидат технических наук, главный конструктор
систем преобразования электроэнергии – замести-
тель главного конструктора АО «АЭРОЭЛЕКТРО-
МАШ» г. Москва.

Ведущая организация – Федеральное государственное автономное образо-
вательное учреждение высшего образования «Си-
бирский федеральный университет» г. Красноярск.

Защита состоится «8» декабря 2016 года в 15 часов 15 мин. на заседании диссертационного совета Д. 212.268.03 в Томском государственном университете систем управления и радиоэлектроники по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ТУСУРа по адресу: 634045, г. Томск, ул. Красноармейская, 146 и на сайте ТУСУРа по адресу:
<https://storage.tusur.ru/files/46833/dissertation.pdf>

Автореферат разослан «__» _____ 2016 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета



Зыков Дмитрий Дмитриевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В настоящее время проблема электрификации России на территории, не охваченной единой энергосистемой, решается в основном за счёт использования дизельных электростанций (ДЭС). При этом примерно половина дизельных и бензиновых установок не работает, что связано с перебоями в поставках топлива и высокими ценами на его доставку. Неоптимальные режимы работы ДЭС и дорогое топливо определяют высокие тарифы на производимую электроэнергию, оплачивать которую местное население может только при условии значительных дотаций из бюджета. В этой связи всё большую актуальность приобретают автономные системы электроснабжения (АСЭ), основанные на возобновляемых источниках энергии (солнце, ветер, и т.п.). Несмотря на однотипность основных вариантов проектирования таких энергетических комплексов (в том числе - гибридных), в настоящее время не существует эффективных алгоритмов управления устройствами, входящими в состав комплекса, с целью обеспечения оптимальной его работы и покрытия необходимого уровня потребительской нагрузки. В связи с постоянным ростом энергопотребления в мире появилась необходимость развития сегмента автономных источников энергоснабжения, а также автономных электростанций, использующих нетрадиционные источники электроэнергии (ветер и солнце), либо традиционные автономные дизельные или бензиновые генераторы.

Поскольку в состав любой АСЭ входит аккумуляторная батарея (АБ), как правило, существует необходимость в повышении и выравнивании напряжения звена постоянного тока в составе системы генерирования. Наибольший интерес представляют гибридные АСЭ, имеющие в составе возобновляемые источники ЭЭ (солнечные панели, ветрогенераторы), традиционные источники ЭЭ (топливные элементы) и систему накопления электроэнергии (СНЭ) на базе АБ. Для согласования уровней напряжения источников питания и последующей передачи ЭЭ в нагрузку используются полупроводниковые преобразователи (ПП).

Согласование напряжений источников постоянного напряжения (фотопанели, АБ) и требуемого выходного напряжения АСЭ производится с помощью *dc-ac* преобразователей. Традиционно в состав таких преобразователей входит *dc-dc* преобразователь, согласующий напряжения в звене постоянного тока, и автономный инвертор напряжения (АИН), формирующий переменное напряжение на нагрузке. На сегодняшний день предложено много топологий *dc-ac* преобразователей для работы АСЭ в различных режимах. К ним относятся АИН с различными топологиями импульсных *dc-dc* преобразователей и импедансные преобразователи. Из последних в АСЭ наиболее распространены квази-импедансные преобразователи, в виду обеспечения ими повышенной по сравнению с традиционными АИН надёжностью, однократного преобразования ЭЭ, а также необходимых режимов работы источников постоянного напряжения. Эти преобразователи также нашли применения в резервных и вспомогательных системах электроснабжения, работающих параллельно с сетью централизованного электроснабжения.

Однако при проектировании ПП, работающих в АСЭ без соединения с сетью, что наиболее актуально при питании удаленных объектов, возникают дополнительные сложности. Основная проблема – работа при малой нагрузке и на холостом ходу в режиме повышения напряжения звена постоянного тока. Традиционное решение данной проблемы – подключение балластной нагрузки для утилизации избыточной ЭЭ в звене постоянного тока часто бывает не только крайне неэффективно (в виду значительных потерь энергии в балластной нагрузке), но и не возможно. Это особенно характерно для применения повышающе-понижающих ПП в составе авиационных систем генерирования и космических систем, использующих в качестве источника питания только солнечные панели и АБ). С другой стороны, из-за растущей электрификации авиационных и космических объектов, применение импедансных ПП является перспективным решением, поскольку данные ПП обладают повышенной по сравнению с традиционными АИН надежностью.

Квази-импедансные преобразователи, разработанные для работы от источников постоянного напряжения, для которых критична форма потребляемого тока, являются относительно новыми типами ПП. В связи с этим они еще мало изучены, особенно в многоуровневых трехфазных вариантах.

С учетом вышеизложенных факторов можно сделать вывод о том, что исследование квази-импедансных преобразователей и улучшение их характеристик является актуальной научно-технической задачей.

Целью диссертационной работы является исследование электромагнитных процессов и энергетических характеристик трехфазного трехуровневого КИИ и разработка топологии КИИ с повышенной эффективностью, применительно к АСЭ.

Для достижения поставленной цели были сформулированы и решены следующие задачи:

1. Разработка топологии трехфазного трехуровневого КИИ на базе АИН с фиксирующими диодами.
2. Разработка математической модели трехфазного трехуровневого КИИ.
3. Анализ электрических процессов в КИИ в различных режимах работы.
4. Разработка топологии модифицированного КИИ для работы при малой нагрузке и в режиме холостого хода.
5. Вывод расчетных соотношений для модифицированной схемы.
6. Изготовление силового макета и проведение эксперимента.

При решении поставленных задач были использованы методы коммутационных функций, методы гармонического анализа, аналитические методы расчета статических процессов в электрических цепях, численные методы решения дифференциальных и интегральных уравнений, имитационное и физическое моделирование. Проверка достоверности полученных теоретических результатов и аналитических соотношений осуществлялась путем расчетов с помощью пакетов *MathCad* и *MATLAB*, компьютерного моделирования с помощью пакета *PowerSIM* и физического макета трехфазного трехуровневого КИИ.

Научная новизна результатов диссертации заключается в следующем:

1. Разработана математическая модель трехфазного трехуровневого КИИ, позволяющая рассчитать значения напряжений и токов во всех компонентах и узлах исследуемой схемы спектральным методом без применения методов решения дифференциальных уравнений.
2. Получены численные результаты теоретического и экспериментального сравнения традиционного трехфазного трехуровневого АИН с *dc-dc* преобразователем и КИИ по критериям величин пассивных компонентов, загрузки пассивных и активных компонентов и их массогабаритных показателей, позволяющие определить оптимальную область применения КИИ в АСЭ.
3. Разработана топология двух- и трехуровневого трехфазного КИИ, позволяющая преобразователю работать в режимах малой нагрузки и холостого хода.

Практическая значимость работы заключается в следующем:

1. Разработанные математические и программные модели исследуемых преобразователей позволяют проводить полный расчет схем с заданными входными параметрами.
2. Полученные по единой методике соотношения для компонентов преобразователей позволяют рассчитать и сравнить схемы с точки зрения загрузки компонентов и массогабаритных показателей.
3. Полученные теоретические и практические результаты могут быть использованы в учебном процессе при подготовке инженеров, магистрантов и аспирантов в области энергетической электроники.

Основные положения, защищаемые автором:

1. Предложенная спектральная модель трехфазного трехуровневого КИИ, позволяет рассчитать значения напряжений и токов во всех компонентах и узлах исследуемой схемы.
2. Полученные результаты сравнения традиционного трехфазного трехуровневого АИН с *dc-dc* преобразователем и КИИ по критериям величин пассивных компонентов, загрузки пассивных и активных компонентов и массогабаритных показателей показывают преимущества и недостатки КИИ и позволяют заключить, что применение КИИ является оправданным в случаях повышенных требований к надежности.
3. Модифицированная топология двух- и трехуровневого трехфазного КИИ, позволяет преобразователю работать в режимах малой нагрузки и холостого хода, что также повышает функциональную надежность преобразователя.
4. Модифицированная топология КИИ может работать в режиме рекуперации энергии, что позволяет расширить область применения данного преобразователя.

Связь диссертационных исследований с научно-техническими программами и проектами:

1. Исследования по диссертационной работе выполнялись в рамках государственного контракта №13.G36.31.0010 от 22.10.2010, «Исследование, разработка и организация промышленного производства механотронных систем для энергосберегающих технологий двойного назначения».

2. Проектная часть государственного задания, проект №1319 по теме: «Разработка активных силовых фильтров и алгоритмов управления ими для компенсации неактивной мощности при передаче, распределении и потреблении электрической энергии».

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на всероссийских и международных научных конференциях и семинарах:

1. 14th International Conference and Seminar on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices, EDM-2013,
2. 15th International Conference and Seminar on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices, EDM-2014,
3. 12-я Международная конференция Актуальные Проблемы Электронного Приборостроения, АПЭП–2014.

Публикации. По теме диссертационной работы было опубликовано 10 работ, включая 3 в журналах из перечня ВАК.

Личный вклад автора в научные работы, опубликованные в соавторстве с научным руководителем, заключается в следующем: постановке частных задач, выводе аналитических соотношений, выполнении расчетов, разработке имитационных моделей, сравнении активных компонентов трехфазного трехуровневого АИН с *dc-dc* преобразователем и КИИ по установленной мощности, модификации топологии КИИ, выводе аналитических соотношений для модифицированного КИИ, сравнении модифицированного и традиционного КИИ по загрузке компонентов и массогабаритным показателям. Совместно с научным руководителем автор осуществлял постановку задач, выбор методов решения и анализ полученных результатов. Совместно с Гусевым А. А. (к. т. н., доцент каф. Биомедицинских радиоэлектронных аппаратов и систем Черниговского Национального Технологического Университета. Старший научн. сотрудник института электротехники Таллинского Технического Университета) автором было проведено сравнение традиционного АИН с *dc-dc* преобразователем и КИИ по загрузке пассивных компонентов и массогабаритным показателям и проведены экспериментальные исследования.

Структура и объем работы. Диссертационная работа изложена на 132 страницах основного текста, состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 99 наименований, содержит 76 рисунков, 10 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследований, сформулированы цель и задачи диссертационной работы, научная новизна и практическая ценность полученных результатов. Приведены сведения об апробации и публикациях, а также представлена структура работы.

Первая глава посвящена обзору известных топологий повышающе-понижающих *dc-ac* преобразователей. Рассмотрены топологии АИН с импульсными повышающими *dc-dc* преобразователями в звене постоянного тока. описа-

ны различные схемы импульсных повышающих преобразователей. Указаны основные достоинства и недостатки традиционных топологий.

Рассмотрены следующие основные типы импедансных преобразователей: Z-инвертор и квази-импедансный инвертор (КИИ), а также их модификации. КИИ, схема которого представлена на рис. 1, относится к классу импедансных преобразователей. Основными достоинствами импедансных преобразователей являются:

- однократное преобразование энергии;
- устойчивость инвертора к короткому замыканию, что в значительной степени повышает функциональную надежность преобразователя.

Принцип работы КИИ аналогичен принципу работы Z-инвертора, где за счет состояния короткого замыкания ключей стоек АИН накапливается энергия в LC-контурах (на рис.1 контура L_1-C_2 и L_2-C_1), а в рабочих состояниях АИН накопленная энергия отдается в нагрузку.

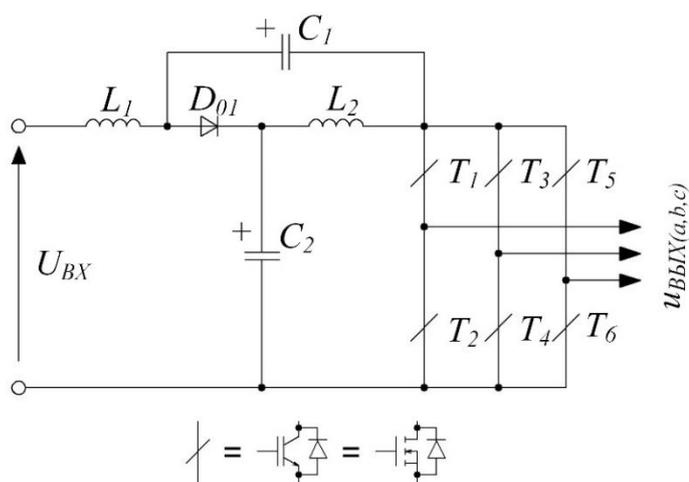


Рис. 1 Квази-импедансный инвертор напряжения

Таким образом, происходит повышение напряжения в звене постоянного тока, в соответствии с соотношением:

$$U_{DC} = U_{BX} \cdot B = U_{BX} \cdot \frac{1}{1 - 2D_s} \quad (1)$$

где U_{BX} – входное напряжение КИИ, B - коэффициент повышения, D_s – относительная длительность состояния КЗ. Основным отличием КИИ от Z-инвертора является непрерывный входной ток, потребляемый от источника, что является важным условием для работы в составе автономной системы электроснабжения (АСЭ) с возобновляемыми источниками энергии и системой накопления энергии.

Представлены трехуровневые топологии импедансных преобразователей. Поскольку в литературе описана топология трехфазного трехуровневого КИИ, сформулирована задача исследования трехфазного трехуровневого КИИ на базе АИН с фиксирующими диодами.

Также в обзоре рассмотрены способы управления КИИ, основанные на традиционных способах ШИМ для АИН.

По результатам аналитического обзора сделаны выводы об актуальности исследования трехфазного трехуровневого КИИ, поскольку рассматриваемый класс преобразователей обеспечивает повышенную надежность и применим к работе в составе АСЭ. Однако, как и большинство повышающе-понижающих преобразователей КИИ обладает рядом недостатков, основным из которых, при работе в составе АСЭ, является неконтролируемое нарастание напряжения в звене постоянного тока при работе на малые нагрузки и в режиме холостого хода. Таким образом, трехфазный трехуровневый квази-импедансный инвертор и является объектом дальнейшего исследования.

Вторая глава посвящена разработке математической модели предложенной топологии трехфазного трехуровневого КИИ, схема которого представлена на рис. 2. Разработка математической модели производилась с помощью метода коммутационных функций и гармонического анализа кривых напряжений и токов. Полученные соотношения проверены с помощью математического пакета *MathCad*, где были построены примеры диаграмм по выведенным соотношениям.

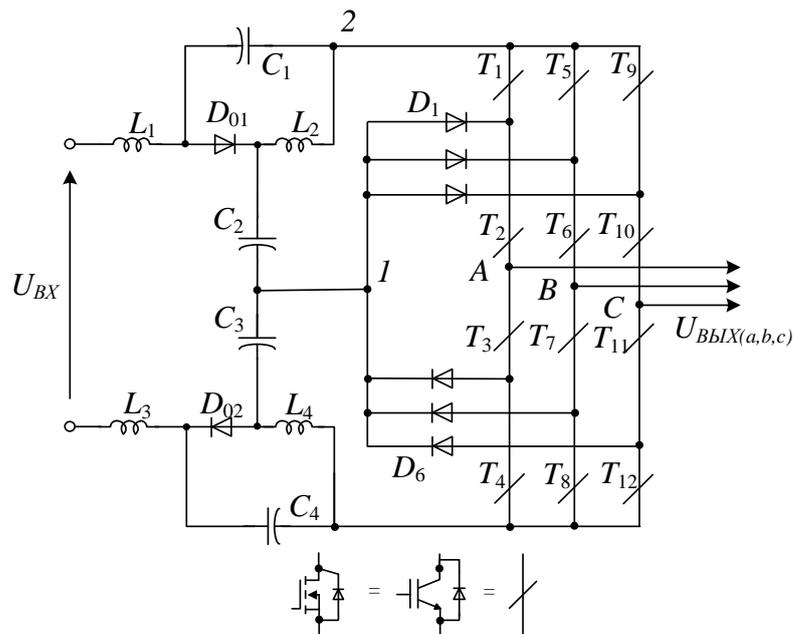


Рис. 2 Трехфазный трехуровневый КИИ

Рассматриваемая топология КИИ содержит два квази-импедансных звена, которые питаются от источника постоянного напряжения. Средняя точка конденсаторов C_2 , C_3 соединена с общей точкой фиксирующих диодов инвертора. Для упрощения математическая модель была представлена в нескольких частях:

1. Математическое описание системы управления. Описание переключающих функций ключей инвертора;
2. Описание токов и напряжений КИ-звена;
3. Описание выходных напряжений и токов инвертора;
4. Описание токов в силовых ключах инвертора.

Система управления реализует традиционную синусоидальную ШИМ со смещенными относительно друг друга на 180 градусов опорными сигналами. Состояние КЗ формируется за счет сравнения верхнего опорного сигнала с постоянным задающим. Временные диаграммы, иллюстрирующие работу системы управления, приведены на рис. 3, где $u_{ОП1}$, $u_{ОП2}$ – опорные сигналы, u_{ma} , u_{mb} , u_{mc} – модулирующие сигналы, u_{Ds} – задающий сигнал.

Соотношения для токов и напряжений в КИ-звене выражены с помощью двух схем замещения, характеризующих основные состояния КИИ: состояние КЗ и активное состояние (АС). Соответственно получены соотношения для напряжений и токов дросселей и напряжений на конденсаторах.

$$\begin{aligned} u_{L1} = u_{L3} &= \left[\left(\frac{1}{2} \cdot U_{ВХ} + U_{C1} \right) \cdot F_{Ds} \right] + \left[\left(\frac{1}{2} \cdot U_{ВХ} - U_{C2} \right) \cdot \overline{F_{Ds}} \right] \\ u_{L2} = u_{L4} &= \left(U_{C2} \cdot F_{Ds} \right) - \left(U_{C2} \cdot \overline{F_{Ds}} \right) \end{aligned} \quad (1)$$

$$i_{L1} = i_{L3} = \frac{1}{L_1} \cdot \int u_{L1} dt \quad (2)$$

$$i_{L2} = i_{L4} = \frac{1}{L_2} \cdot \int u_{L2} dt$$

$$\begin{aligned} u_{C1} = u_{C4} &= \frac{1}{C_1} \cdot \int \left[\left(i_{L1} \cdot F_{Ds} \right) + \left(i_{L2} \cdot \overline{F_{Ds}} \right) \right] dt \\ u_{C2} = u_{C3} &= \frac{1}{C_2} \cdot \int \left[\left(i_{L2} \cdot F_{Ds} \right) + \left(i_{L1} \cdot \overline{F_{Ds}} \right) \right] dt \end{aligned} \quad (3)$$

где $U_{ВХ}$ – напряжение источника питания, U_{C1} , U_{C2} – средние значения напряжений на конденсаторах, F_{Ds} – компонент коммутационной функции ключей, определяющий состояния КЗ. Полученные соотношения позволяют также описать токи и напряжения диодов КИ-звена.

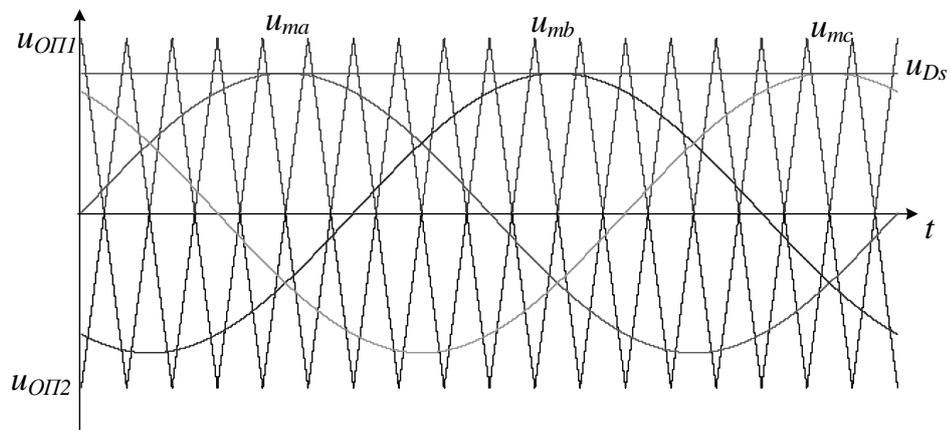


Рис. 3 Временные диаграммы системы управления

Выходные напряжения КИИ были выражены с помощью известных соотношений:

$$\begin{cases} u_A = \varphi_A - \varphi_N; \\ u_B = \varphi_B - \varphi_N; \\ u_C = \varphi_C - \varphi_N, \end{cases} \quad (4)$$

где $\varphi_A, \varphi_B, \varphi_C, \varphi_N$ – потенциалы соответственно фаз «А», «В», «С» и средней точки нагрузки. Выражение для потенциала фазы «А» имеет вид:

$$\begin{aligned} \varphi_A = & (u_{C1} + u_{C2} + u_{C3} + u_{C4}) \cdot F'_{T1} \cdot F'_{T2} + (u_{C3} + u_{C4}) \cdot F'_{T2} \cdot (1 - F'_{T1}) - \\ & - (u_{C1} + u_{C2} + u_{C3} + u_{C4}) \cdot F'_{T1} \cdot F'_{T2} \cdot F'_{T3} \cdot F'_{T4} \end{aligned} \quad (5)$$

где $u_{C1}, u_{C2}, u_{C3}, u_{C4}$ – мгновенные значения напряжений на конденсаторах КИ-звена, $F'_{T1}, F'_{T2}, F'_{T3}, F'_{T4}$ – коммутационные функции ключей плеча фазы «А».

Соотношение для фазного тока получено с учетом активно-индуктивного характера нагрузки.

$$i_A = \sum_k \frac{a_k(u_A) \cdot \cos\left(k \cdot \omega t - \frac{\pi}{2}\right) + b_k(u_A) \cdot \sin\left(k \cdot \omega t - \frac{\pi}{2}\right)}{Z_{A_k}} \quad (6)$$

где a_k, b_k – коэффициенты ряда Фурье, k – номер гармоники фазного напряжения, Z_A – комплексное фазное сопротивление. На рис. 4 представлены примеры графического расчета фазного напряжения и тока.

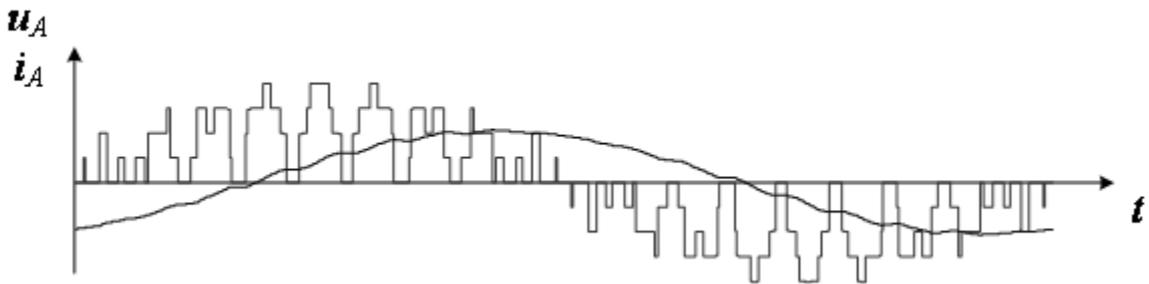


Рис. 4 Напряжение и ток фазы «А»

Токи, протекающие через ключи КИИ, были выражены через полученные ранее коммутационные функции и выражение для фазного тока. Силовые ключи АИН представлены как транзисторы со встречно-параллельными диодами. Транзисторы проводят положительную полуволну фазного тока, диоды – отрицательную. В состоянии КЗ фазные токи замыкаются через все три стойки инвертора. С учетом состояния КЗ, можно записать соотношения для токов ключей стойки фазы «А» в следующем виде:

$$\begin{cases} i_{T1} = F'_{T1} \cdot |i_A| \cdot F_{iA} + \left(\frac{2i_{L2}}{3} - \frac{|i_A| + |i_B| + |i_C|}{3} \right) F'_{T1} \cdot F'_{T2} \cdot F'_{T3} \cdot F'_{T4}; \\ i_{T2} = F'_{T2} \cdot |i_A| \cdot F_{iA} + \left(\frac{2i_{L2}}{3} - \frac{|i_A| + |i_B| + |i_C|}{3} \right) F'_{T1} \cdot F'_{T2} \cdot F'_{T3} \cdot F'_{T4}; \\ i_{T3} = F'_{T3} \cdot |i_A| \cdot \overline{F_{iA}} + \left(\frac{2i_{L2}}{3} - \frac{|i_A| + |i_B| + |i_C|}{3} \right) F'_{T1} \cdot F'_{T2} \cdot F'_{T3} \cdot F'_{T4}; \\ i_{T4} = F'_{T4} \cdot |i_A| \cdot \overline{F_{iA}} + \left(\frac{2i_{L2}}{3} - \frac{|i_A| + |i_B| + |i_C|}{3} \right) F'_{T1} \cdot F'_{T2} \cdot F'_{T3} \cdot F'_{T4}. \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} i_{Dt1} = |i_A| \cdot F'_{T1} \cdot \overline{F_{iA}} \cdot \overline{F_{Ds}}; \\ i_{Dt2} = |i_A| \cdot F'_{T1} \cdot \overline{F_{iA}} \cdot \overline{F_{Ds}}; \\ i_{Dt3} = |i_A| \cdot F'_{T4} \cdot F_{iA} \cdot \overline{F_{Ds}}; \\ i_{Dt4} = |i_A| \cdot F'_{T4} \cdot F_{iA} \cdot \overline{F_{Ds}}. \end{cases} \quad (8)$$

где $F_{iA} = \frac{1}{2} \cdot \text{sign}(i_A) + \frac{1}{2}$ – функция положительной полуволны фазного тока i_A . Ток через фиксирующие диоды протекает только в состоянии АС. При положительной полуволне фазного тока ток протекает через диод D_1 , а при отрицательной – через D_4 .

$$\begin{aligned} i_{D1} &= |i_A| \cdot F_{iA} \cdot F'_{T2} \cdot \overline{F'_{T1}} \\ i_{D4} &= |i_A| \cdot \overline{F_{iA}} \cdot F'_{T3} \cdot \overline{F'_{T4}} \end{aligned} \quad (9)$$

В третьей главе проведен анализ трехфазного трехуровневого КИИ в установившемся режиме. Для упрощения анализа исследуемых топологий были приняты следующие допущения:

1. Силовые ключи идеальны. Переключения происходят мгновенно;
2. Пассивные элементы идеальны и не содержат паразитных параметров;
3. Входной источник постоянного напряжения идеален;
4. Мертвое время в системе управления традиционным АИН не учитывается;
5. Токи в индуктивностях и напряжения на емкостях изменяются по линейному закону;
6. Токи в состоянии КЗ в стойках инвертора распределены поровну.

Ниже приведены соотношения для емкостей и индуктивностей КИ-звена. Данные соотношения позволяют рассчитать значения пассивных компонентов при заданных входных параметрах и коэффициентах пульсаций напряжений и токов в звене постоянного тока КИИ.

$$C_1 = C_4 \geq \frac{2P_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}^2 \cdot K_C \cdot f_K} \cdot (1 - 2D_S)$$

$$C_2 = C_3 \geq \frac{2P_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}^2 \cdot K_C \cdot f_K} \cdot \frac{(1 - 2D_S)}{(1 - D_S)} \cdot D_S \quad (10)$$

$$L_1 = L_2 = L_3 = L_4 \geq \frac{U_{\text{ВХ}}^2 \cdot (1 - D_S) \cdot D_S}{2P_{\text{ВЫХ}} \cdot f_K \cdot K_L \cdot (1 - 2D_S)} \quad (11)$$

где $P_{\text{ВЫХ}}$ – номинальная выходная мощность, K_C , K_L – коэффициенты пульсаций напряжения и тока, f_K – частота коммутации.

Были получены соотношения для расчета максимальной установленной мощности активных компонентов КИИ.

$$(SDP)_{pk} = \sum_{i=1}^N U_i \cdot I_{i(pk)} \quad (12)$$

где U_i – максимальное напряжение, приложенное к ключу, $I_{i(pk)}$ – амплитуда тока, проводимого ключом, N – количество ключей в преобразователе.

В таблице 1 приведены соотношения для обратных напряжений на ключах для обоих преобразователей.

Таблица 1 Загрузка по напряжению полупроводниковых приборов

Топология	Повышающее звено				Инвертор			
	№	Транзисторы	№	Диоды	№	Транзисторы	№	Диоды
ЗУ АИН с повышающ. преоб.	T_{01}	U'_{DC}	D_{01}	U'_{DC}	T_1 ... T_{12}	$\frac{U'_{DC}}{2}$	D_1 ... D_6	$\frac{U'_{DC}}{2}$
ЗУ КИИ			D_{01} , D_{02}	$U'_{DC} - \frac{U_{\text{ВХ}}}{2}$	T_1 ... T_{12}	$U'_{DC} - \frac{U_{\text{ВХ}}}{2}$	D_1 ... D_6	$U'_{DC} - \frac{U_{\text{ВХ}}}{2}$

Амплитудные значения тока через диоды $I_{D01(pk)}$, $I_{D02(pk)}$ КИ-звена, который протекает в состоянии АС, равны максимальному току в дросселях:

$$I_{D01, D02(pk)} = I_L + \Delta I_L = \frac{P_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}} + \frac{U_{\text{ВХ}}}{f_K \cdot L} \cdot D_S \quad (13)$$

Амплитуда токов через диоды АИН равна амплитуде тока в нагрузке:

$$I_{D_1 \dots D_6(pk)} = \sqrt{2} \cdot I_{2eff} = \frac{4P_{ВЫХ}}{3\cos\varphi \cdot U_{DC} \cdot M} = \frac{4P_{ВЫХ}}{3\cos\varphi \cdot U'_{DC}} \quad (14)$$

Максимальный ток через транзисторы протекает в состоянии КЗ. Поскольку замыкаются все три стойки инвертора, ток распределяется между ними:

$$I_{T_1 \dots T_{12}(pk)} = \frac{2}{3} \cdot (I_L + \Delta I_L) = \frac{2}{3} \cdot \left(\frac{P_{ВЫХ}}{U_{ВХ}} + \frac{U_{ВХ}}{f_K \cdot L} \cdot D_s \right) \quad (15)$$

Было проведено сравнение по загрузке компонентов и массогабаритным показателям КИИ и традиционного АИН с *dc-dc* преобразователем в звене постоянного тока. Исходя из полученных соотношений для компонентов были выведены по общей методике соотношения для АИН с *dc-dc* преобразователем и для КИИ в относительных единицах. На рис. 5 представлены зависимости относительных величин пассивных компонентов от коэффициента передачи преобразователя $G = M \cdot B$.

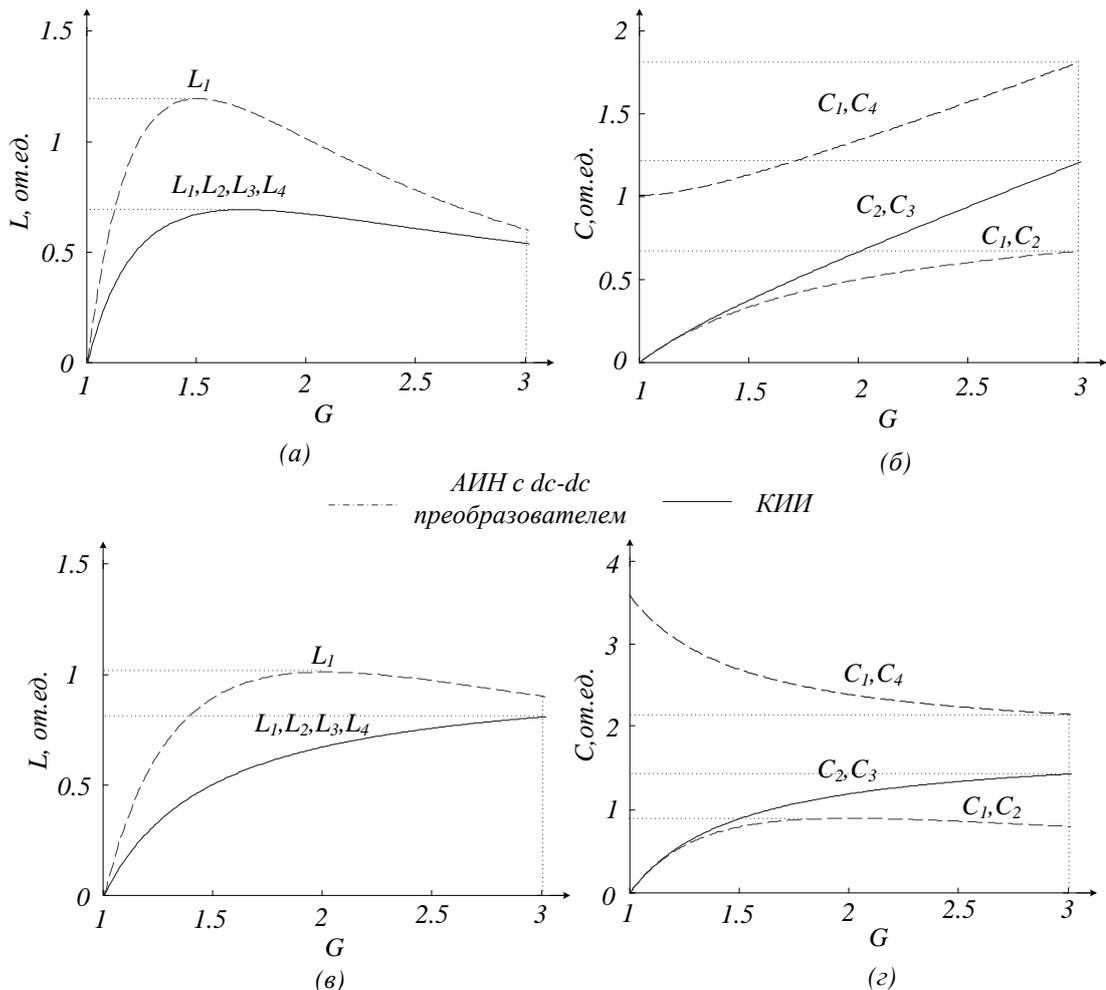


Рис. 5 Сравнение топологий при номинальной выходной мощности: зависимости индуктивности (а), емкости (б), от коэффициента передачи; при номинальном входном токе: индуктивности (в) и емкости (г)

Также было проведено сравнение суммарной энергии пассивных компонентов и максимальной установленной мощности активных компонентов, как критериев, определяющих массогабаритные показатели преобразователей. Зависимости суммарной энергии и максимальной установленной мощности от коэффициента передачи представлены на рис. 6.

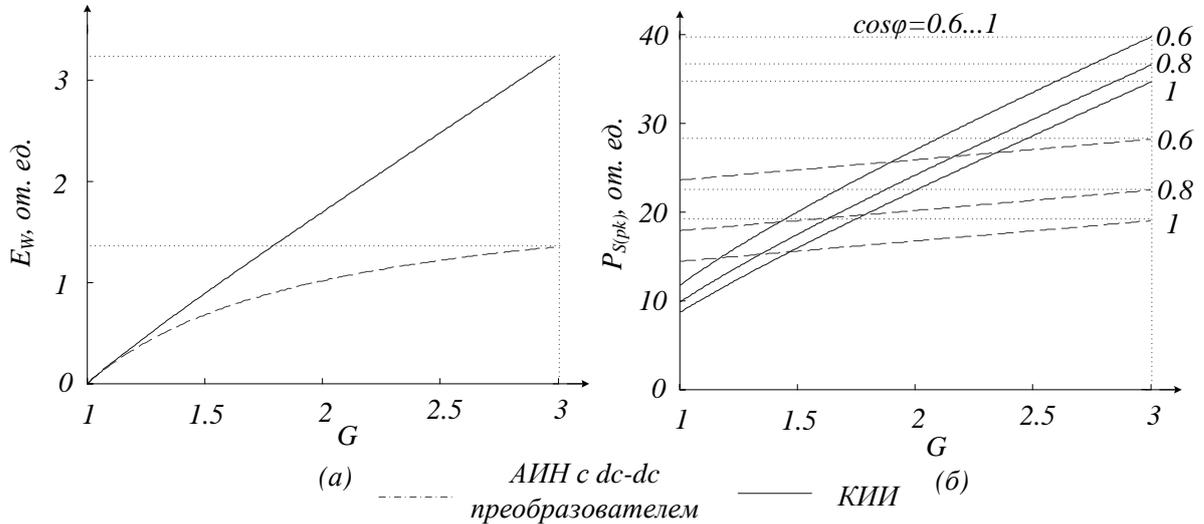


Рис. 6 Сравнение топологий по суммарной энергии пассивных компонентов (а) и установленной мощности ключей (б)

Справедливость полученных аналитических соотношений была подтверждена моделированием исследуемых топологий в программной среде *PowerSIM*.

Также были получены зависимости коэффициента гармоник выходного линейного напряжения от коэффициента передачи и внешние характеристики для обоих преобразователей. Данные зависимости представлены на рис. 7.

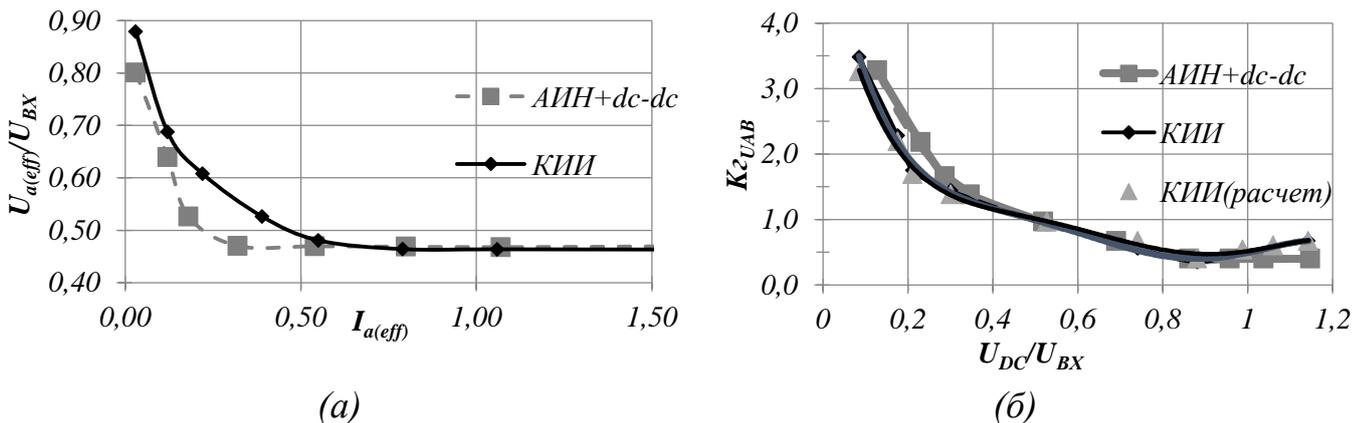


Рис. 7 Сравнительные характеристики АИН с dc-dc преобразователем и КИИ

Полученные результаты сравнения позволили сделать следующие выводы:

1. Для обеспечения одинакового выходного напряжения, при одинаковом входном напряжении и одинаковых пульсациях входного тока, КИИ требуются большие по размерности пассивные компоненты. В то же время, относительные массогабаритные показатели пассивных компонентов КИИ практически соответствуют показателям АИН с dc-dc преобразователем в области малого ко-

эфициента повышения напряжения (до 1,5), но в области высокого коэффициента размерности компонентов КИИ больше, чем у традиционного преобразователя.

2. КИИ не вносят значительного искажения в форму выходного напряжения по сравнению с традиционными АИН с $dc-dc$ преобразователем, однако при больших коэффициентах повышения, искажения могут приводить к значительным потерям из-за соотношения длительностей активных состояний и состояния короткого замыкания.

3. КИИ не имеет значительных преимуществ перед традиционной топологией с точки зрения массогабаритных показателей и эффективности. Однако КИИ может найти применение в системах малой мощности с высокими требованиями к надежности, таких как авиационные системы электроснабжения, вспомогательные системы электроснабжения, автономные системы электроснабжения и т.д.

В четвертой главе предложена модификация топологии КИИ, позволяющая ему работать при малой нагрузке и в режиме холостого хода. Схема двухуровневого модифицированного КИИ представлена на рис. 8.

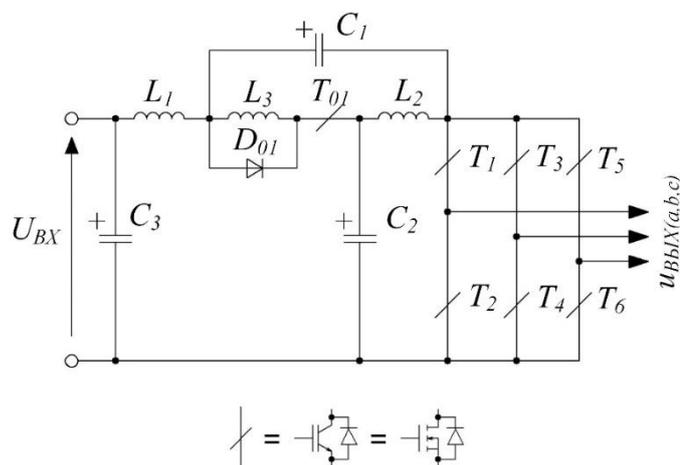


Рис. 8 Топология модифицированного КИИ

В режиме ХХ и при малой нагрузке, напряжения на конденсаторах C_1 и C_2 могут быть ограничены за счет введенного дополнительного контура протекания тока. При условии

$$U_{BX} + (-U_{L_1}) < U_{C_1} + U_{C_2} \quad (16)$$

и включении дополнительного транзистора T_{01} ток i_{L_2} будет протекать от инвертора через данный транзистор, индуктивность L_3 и конденсатор C_3 . При переходе схемы из состояния обратной проводимости в состояние КЗ возникает кратковременное включение конденсаторов C_1 и C_2 в последовательную цепь, поскольку время выключения транзистора T_{01} больше времени включения транзисторов $T_1 - T_6$. Индуктивность L_3 вводится для ограничения токов конденсаторов C_1 и C_2 , при включении их в последовательную цепь. Таким образом, среднее значение напряжений на конденсаторах C_1 и C_2 снижается до заданного уровня: напряже-

ния источника питания, умноженного на коэффициент повышения. При переходе из состояния обратной проводимости в состояние КЗ ток, который протекает через индуктивность L_3 , замыкается через диод D_{01} .

На рис. 9 представлена предлагаемая модификация топологии трехфазного трехуровневого КИИ.

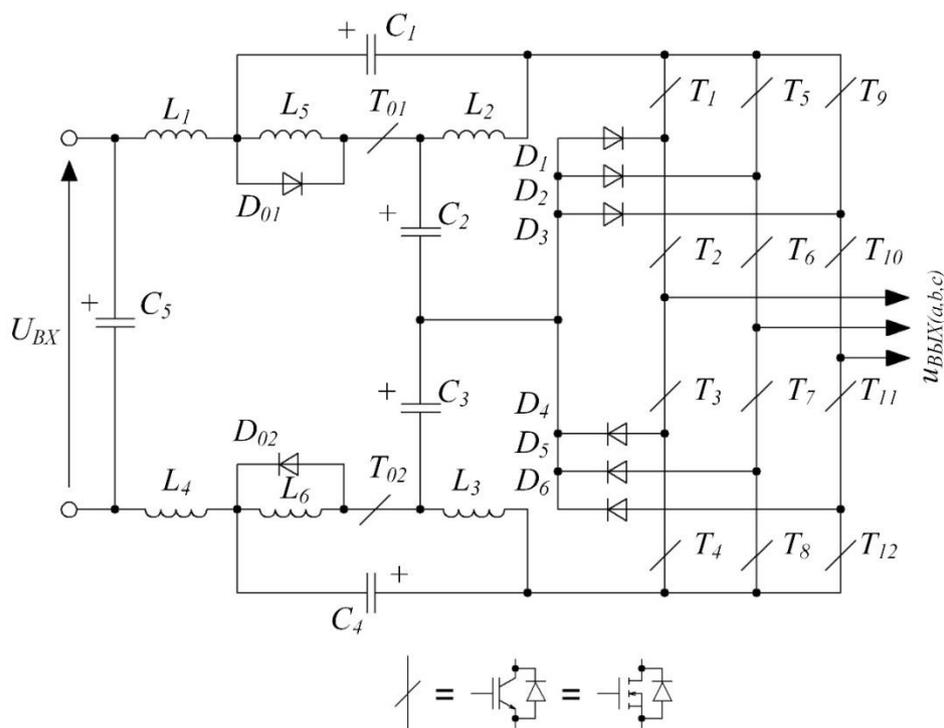


Рис. 9 Топология трехфазного трехуровневого модифицированного КИИ

Для новых компонентов КИ-звена выведены расчетные соотношения. Поскольку напряжение звена постоянного тока в трехуровневой схеме распределяется между компонентами обоих КИ-звеньев, выражение для максимального напряжения на транзисторах T_{01} и T_{02} примет вид:

$$U_{VT01} = U_{VT02} = \frac{U_{BX} \cdot (1 - D_s)}{(1 - 2D_s)} - \frac{U_{BX}}{2} = U'_{DC} - \frac{U_{BX}}{2} \quad (17)$$

Среднее значение напряжения на конденсаторе C_5 :

$$U_{C5} = U_{BX} \quad (18)$$

Выражение для емкости, через номинальную выходную мощность:

$$C_5 \geq \frac{P_{ВЫХ}}{U_{BX}^2 \cdot K_C \cdot f_K} \cdot D_s \quad (19)$$

Выражение для емкости, через номинальный входной ток:

$$C_5 \geq \frac{I_{BX}}{U_{BX} \cdot K_C \cdot f_K} \cdot D_S \quad (20)$$

Было проведено сравнение КИИ и модифицированного КИИ по суммарной энергии пассивных компонентов и максимальной установленной мощности активных компонентов, как показано на рис. 10.

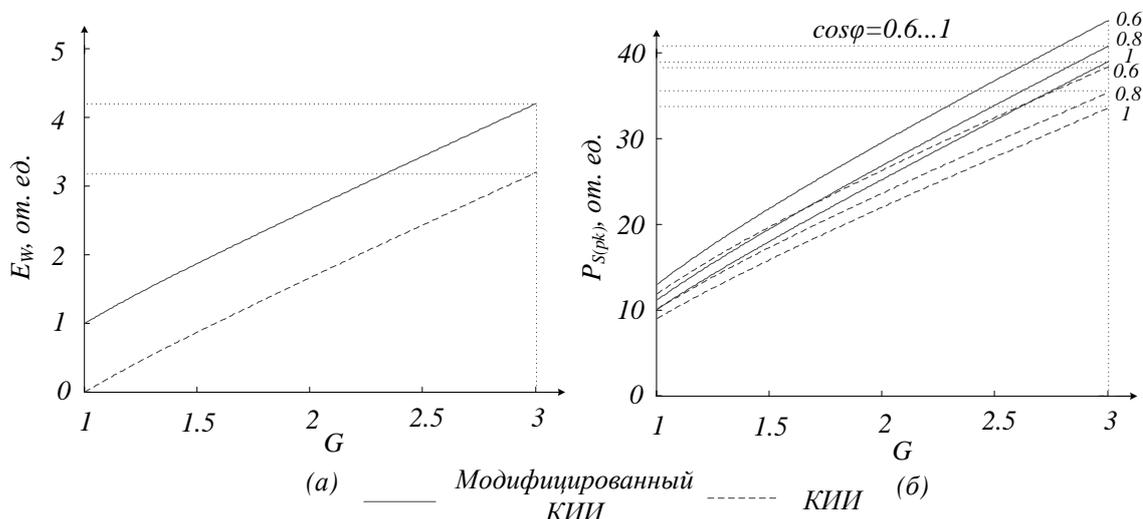


Рис. 10 Сравнение топологий по полной энергии пассивных компонентов (а) и установленной мощности ключей (б)

Полученные результаты были подтверждены путем имитационного моделирования.

Для сравнения КИИ и его модифицированной топологий были построены внешние характеристики, представленные на рис. 11 (а) и зависимости коэффициента гармоник выходного линейного напряжения от коэффициента передачи, представленные на рис. 11 (б). Данные характеристики были сняты с моделей КИИ с длительностью короткого замыкания $D_S = 0,2$, с нулевой длительностью короткого замыкания («КИИ без повышения») и для модели модифицированного КИИ с $D_S = 0,2$.

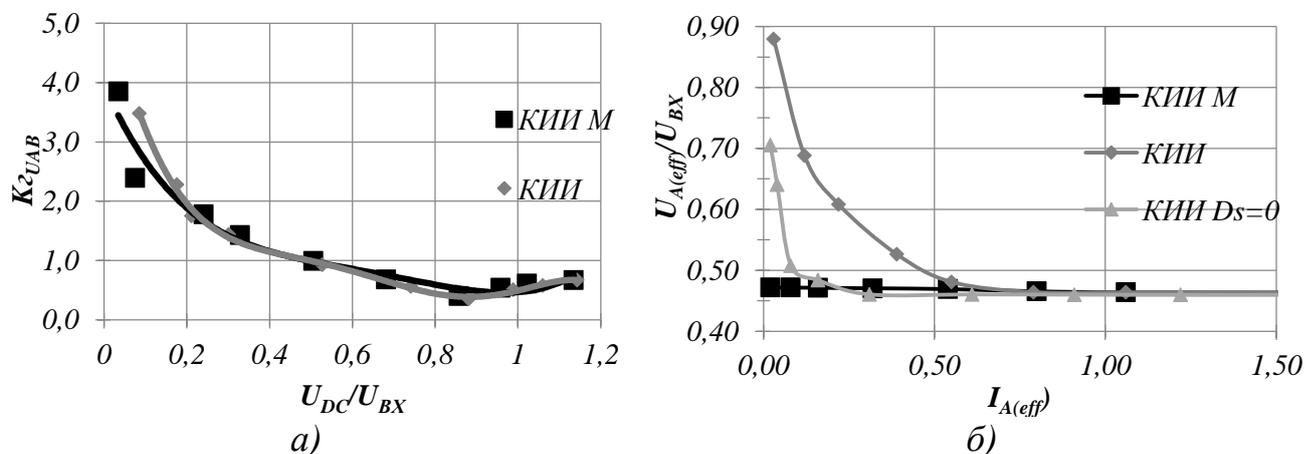


Рис. 11 Сравнительные характеристики КИИ и модифицированного КИИ

Полученные зависимости, как и ожидалось, показывают, что при переходе в режим малой нагрузки выходное напряжение КИИ начинает значительно нарастать. Уменьшение длительности D_s частично нивелирует данную проблему, однако, ближе к режиму холостого хода нарастание выходного напряжения происходит и при нулевом времени короткого замыкания. При этом выходное напряжение модифицированного КИИ практически остается на заданном уровне во всем диапазоне изменения нагрузки. Качество выходного напряжения модифицированного КИИ соответствует качеству КИИ в диапазоне коэффициента передачи $0,2 \dots 1,2$. При низкой модуляции качество выше, чем у модифицированного КИИ за счет сброса избыточной энергии в звене постоянного тока.

Таким образом, модифицированный КИИ получил возможность работы в режиме холостого хода без нарастания выходного напряжения и без необходимости подключать балластную нагрузку. Реализована жесткая внешняя характеристика КИИ во всем диапазоне изменения нагрузки без подключения балластных резисторов.

Также, использование двунаправленных ключей в звене постоянного тока позволяет модифицированному КИИ работать в режиме рекуперации энергии.

Приложением предложенной топологии может быть автономная система электроснабжения с широким диапазоном входного напряжения источника питания и большим диапазоном изменения мощности нагрузки.

В пятой главе приведены результаты экспериментального исследования топологий КИИ. Эксперимент проводился на стенде, состоящем из трехфазного трехуровневого инвертора напряжения с четвертой стойкой, входными dc -звеньями, представляющими собой повышающий $dc-dc$ преобразователь, входное трехуровневое КИ-звено и входное модифицированное трехуровневое КИ-звено.

Система управления исследуемыми преобразователями была реализована на базе ПЛИС «Cyclone II EP2C5T144C8». Данная система управления реализует описанные ранее способы для сопоставления результатов эксперимента и моделирования.

В качестве входного источника питания использован источник постоянного напряжения TDK «*Lambda*» 600 В. В качестве нагрузки – резистивная нагрузка переменного сопротивления.

Измерения были проведены с помощью осциллографа *Tektronix MSO4034B*, датчиков тока *Tektronix TCP0150*, датчиков напряжения *Tektronix TPA-BNC*.

В первой части экспериментального исследования было проведено сравнение КИИ с традиционным АИН с $dc-dc$ преобразователем. Временные диаграммы для обоих преобразователей приведены на рис. 12. Во второй части эксперимента было проведено исследование модифицированной топологии трехфазного трехуровневого КИИ. Осциллограммы КИИ и модифицированного КИИ на нескольких интервалах коммутации приведены на рис. 13.

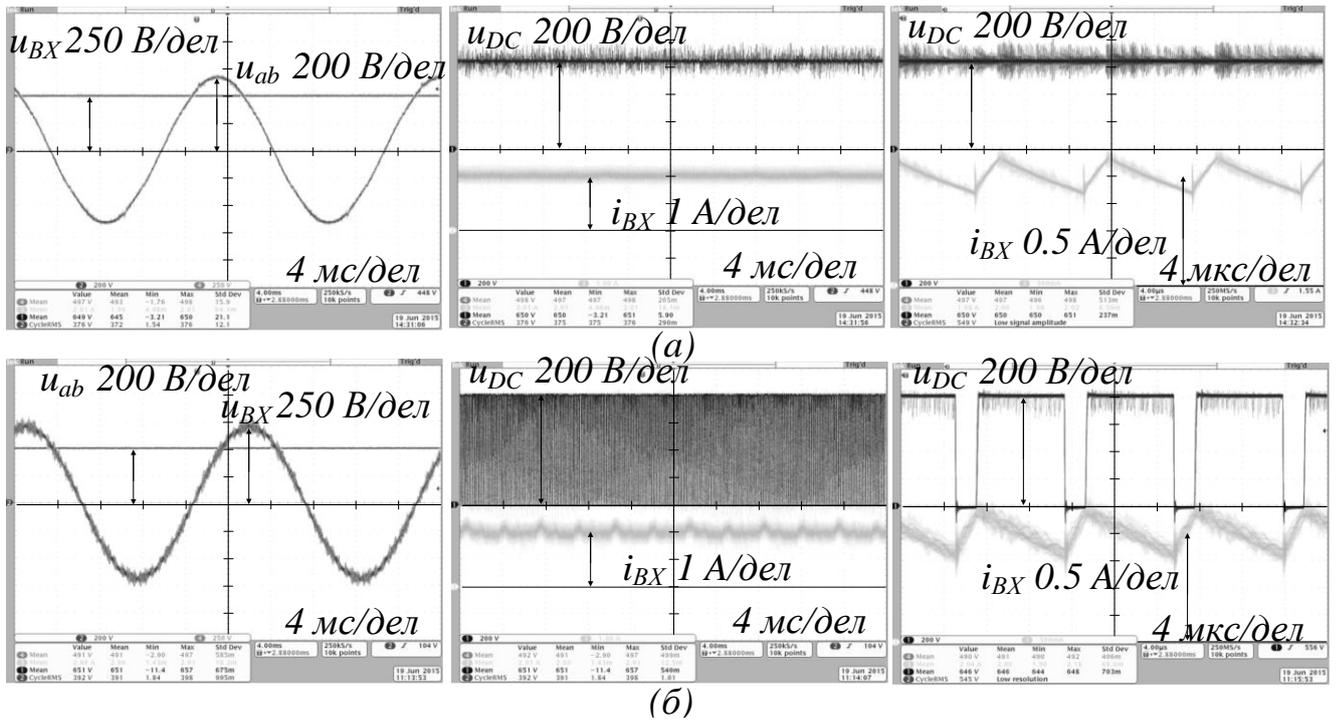


Рис. 12 Временные диаграммы традиционного АИН с $dc-dc$ преобразователем (а) и КИИ (б)

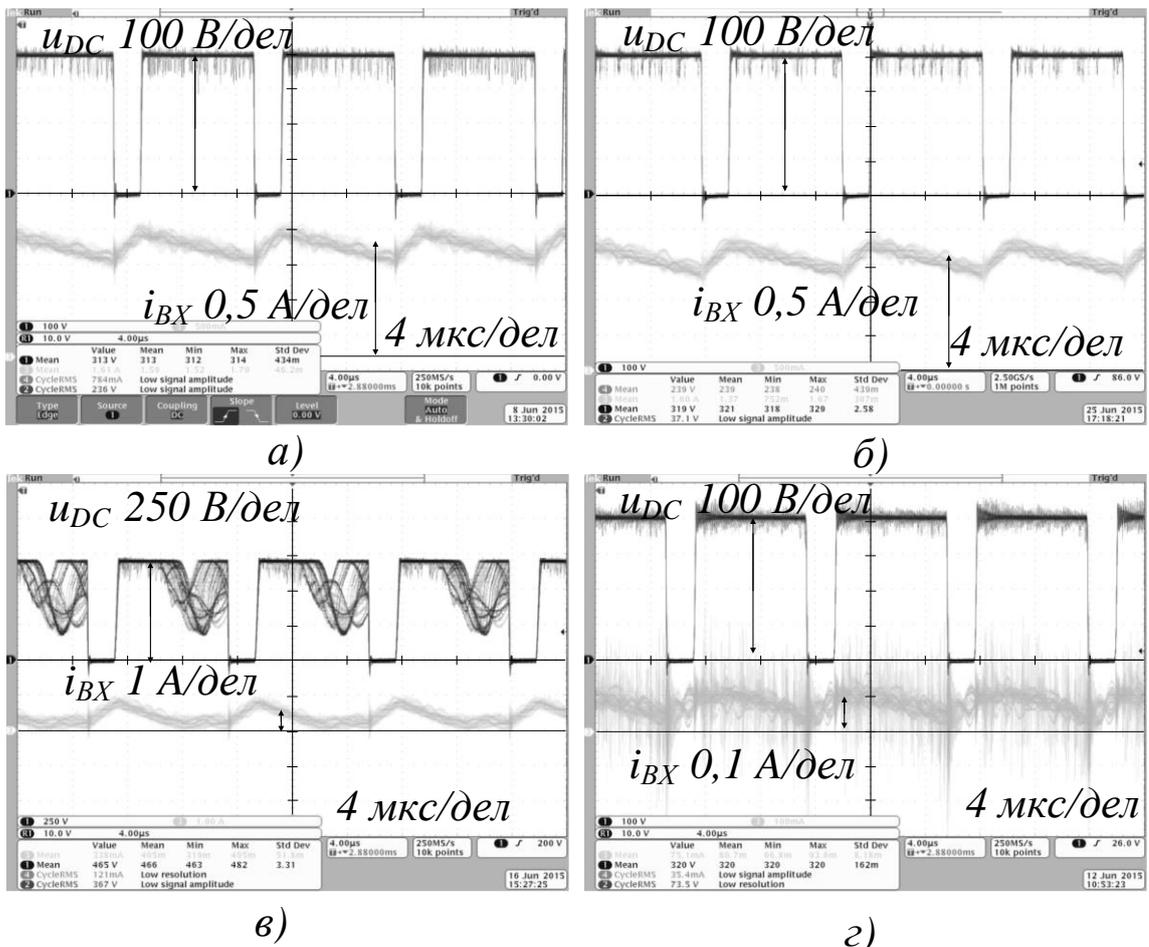


Рис. 13 Осциллограммы напряжения ЗПТ и тока нагрузки в номинальном режиме трехуровневого КИИ (а), модифицированного КИИ (б) и в режиме малой нагрузки КИИ (в) и модифицированного КИИ (г)

Результаты экспериментального исследования подтвердили результаты аналитического исследования и имитационного моделирования.

В заключении приводятся основные выводы и результаты по диссертационной работе. В диссертационной работе решена научно-техническая задача, заключающаяся в исследовании электромагнитных процессов и энергетических характеристик трехфазного трехуровневого КИИ и разработке модифицированной топологии КИИ, применительно к АСЭ.

Основные результаты и выводы диссертационной работы:

1. Предложена топология и разработана математическая модель трехфазного трехуровневого КИИ на базе переключающих функций и комбинаций состояний ключей, которая позволяет вычислять мгновенные значения токов и напряжений на всех участках цепи преобразователя.

2. Получены соотношения для расчета компонентов трехфазного трехуровневого КИИ и АИН с повышающим *dc-dc* преобразователем по общей методике. Справедливость соотношений подтверждена путем имитационного моделирования.

3. Сравнительный анализ показал, что КИИ не имеет значительных преимуществ перед традиционной топологией с точки зрения массогабаритных показателей и эффективности. Однако, КИИ может найти применение в системах малой мощности с высокими требованиями к надежности, таких как авиационные системы электроснабжения, вспомогательные системы электроснабжения, автономные системы электроснабжения и т.д.

4. Предложена модификация топологии КИИ и получены расчетные соотношения для ее компонентов. Модифицированный КИИ получил возможность работы при малых нагрузках и в режиме ХХ без нарастания напряжения в ЗПТ, что является фактором повышения функциональной надежности. Таким образом, реализована жесткая выходная характеристика КИИ во всем диапазоне изменения нагрузки.

5. Использование двунаправленных ключей в КИ-звене позволяет модифицированному КИИ переходить в режим рекуперации, что является значительным преимуществом при использовании его в составе электропривода.

6. Приложением предложенной топологии может быть автономная система электроснабжения с широким диапазоном входного напряжения источника питания и большим диапазоном изменения мощности нагрузки.

7. В соответствии с проведенным исследованием, были разработаны и изготовлены физические макеты трехфазного трехуровневого КИИ, АИН с *dc-dc* преобразователем и модифицированного КИИ. Результаты сравнения исследуемых топологий соответствуют данным, полученным аналитически и с помощью моделирования при соответствующих условиях и допущениях.

Основные положения диссертации опубликованы в работах:

Статьи, опубликованные в рецензируемых научных журналах и изданиях из перечня ВАК:

1. Баховцев И.А. Построение трехфазного трехуровневого инвертора напряжения на базе квази-импедансного преобразователя. / Баховцев И.А., Панфилов Д.В. // Научный вестник НГТУ. – №4(53) . – 2013. – С. 144 – 149.
2. Панфилов Д. В. Модификация Топологии Квази-Импедансного Инвертора для Автономных Систем Электроснабжения. / Д. В. Панфилов, И. А. Баховцев, А. А. Гусев. // Доклады Академии Наук Высшей Школы РФ. – № 4(29). – 2015. – С. 105 – 117.
3. Панфилов Д. В. Модифицированный Квази-Импедансный Инвертор с Улучшенной Внешней Характеристикой. / Д. В. Панфилов, И. А. Баховцев, А. А. Гусев // Энергобезопасность и Энергосбережение. - № 1(67). – 2016. – С. 33 – 40.

Прочие опубликованные работы:

1. Bakhovtsev, I.A. Three-Phase Three-Level Voltage Source Inverter Construction Based On Quasi-Z-Source Cells. / Bakhovtsev, I.A., Panfilov, D.V. // Proc. XIV International Conference and Seminar. EDM2013. – 2013 – P. 322 – 327.
2. Баховцев И.А. Топология трехфазного трехуровневого инвертора напряжения на базе квази-импедансного преобразователя. / Баховцев И.А., Панфилов Д.В. // Сборник научных трудов НГТУ. – №4(74) . – 2013. – С. 127 – 138.
3. Bakhovtsev I. Comparison of Three-phase Three-Level Z-source Inverter and Quasi-Z-Source Inverter Charecteristics. / Igor A. Bakhovtsev, Dmitry V. Panfilov // Proc. XV International Conference and Seminar. EDM2014, Section V. – Erlagol. – 2014. – P. 365 – 369.
4. Баховцев И.А. Сравнение трехуровневых инверторов напряжения с повышением напряжения в звене постоянного тока. / Баховцев И.А., Панфилов Д.В. // Труды XII международной конференции Актуальные проблемы электронного приборостроения. АПЭП – 2014. – Том 7. – 2014. – С. 159 – 165.
5. Bakhovtsev I. Comparison of three-phase three-level DC-DC boosted inverters. / Igor A. Bakhovtsev, Dmitry V. Panfilov // Canadian Journal of Science, Education and Culture – No.2. (6). – Volume I. – 2014. – P. 457 – 468.
6. Bakhovtsev I.A. Modification of Quasi-Z-Source Inverter Operates in Stand-Alone Power System. / Igor A. Bakhovtsev, Dmitry V. Panfilov // -16th International Conference and Seminar. EDM2015, Section V. – Erlagol. – 2015. – P. 464 – 469.
7. Panfilov D. Comparison of three-phase three-level voltage source inverter with intermediate dc–dc boost converter and quasi-Z-source inverter. / Dmitry Panfilov, Oleksandr Husev, Frede Blaabjerg, Janis Zakis, Kamal Khandakji // IET Power Electronics. – 2016. – P. 1 – 11.

Патент на изобретение:

1. Патент РФ №2578042 МПК H02M 7/42. Трехфазный Z-инвертор / Баховцев И. А., Панфилов Д. В.; (RU) – № 2014138076/07, заявл. 19.09.2014; опубл. 20.03.2016, Бюл. №8.