

## МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ТРЕХФАЗНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ МОДУЛЬНОГО ТИПА

В. П. Берзан, Ю. В. Ермураки, В. М. Постолатий

*Институт энергетики Академии наук Молдовы*

**Аннотация.** В данной работе обосновывается новый подход схемной реализации FACTS устройства для использования в энергетике. Предложена концепция и описан принцип работы многофункционального трехфазного преобразователя высокого напряжения, изготовленный из единичных типовых силовых модулей для всех фаз переменного напряжения. Предложен алгоритм широтно-импульсной модуляции при переменной частоте импульсов для снижения потерь и уровня высших гармоник тока.

**Ключевые слова:** FACTS технология, широтно-импульсная модуляция, переменная частота, двунаправленная передача мощности.

### Введение

Современные электроэнергетические системы характеризуются сложной топологией и включают множество взаимосвязанных функциональных элементов. Для электроэнергетических систем (ЭЭС) характерна тенденция развития от автономных, к локальным, региональным энергосистемам, а в перспективе, и к единой планетарной энергетической системе [1]. В настоящее время совместно работают ЭЭС стран Западной Европы, объединены ЭЭС США и Канады и др. Известны проекты связывания энергосистем стран разных континентов: Европы и Африки, Азии и Америки и т.д.

Для мировой электроэнергетики присущи общие тенденции развития [2-5]: увеличение пространственной размерности за счет объединения отдельных ЭЭС, усложнение их топологии, рост количества генерирующих источников большой и малой мощности, в том числе на основе возобновляемой энергии, повышение требований к управляемости, внедрение умных сетей и технологий, влияние рыночных отношений на их режимы работы, повышение требований к устойчивости ЭЭС и качеству электроэнергии поставляемая потребителю, обеспечение устойчивости ЭЭС.

Устойчивость ЭЭС большой размерности зависит от пропускной способности электрической сети. В этом направлении были предприняты множество усилий как в области исследования статической и динамической устойчивости

ЭЭС [5-8], исследования режимов энергосистем и их силового оборудования [5,9-13], повышения пропускной способности линий электропередач [8], так и выполнения различных практических проектов в области электроэнергетического оборудования [14-18]. Большие перспективы для применения в электроэнергетике, с точки зрения обеспечения устойчивости работы энергосистем при различных влияющих факторов, открываются для силовых устройств построенных на полностью управляемых полупроводниковых приборах [19-21], а также и устройств с двусторонней направленностью передачи мощности [22] между цепями с различными частотами.

Вопрос согласования параллельной работы актуален и для отдельных национальных энергосистем из-за их большой протяженности и существования слабых участков сети. Появление слабых связей в энергосистемах, является следствием их развития. Это обусловлено тем, что в результате строительства новых линий электропередач более высокого напряжения, в разряд слабых связей переходит предыдущее поколение сетей, например, сети напряжением 110 кВ. Для исключения влияния слабых связей на статическую устойчивость энергосистем, необходимо принять определенные меры, как: установка компенсаторов реактивной мощности, регуляторов напряжения или специализированных устройств, которые могут обеспечить асинхронный режим работы региональных или локальных энергосистем. В этом случае появляется необходимость в применение специальных устройств - вставок постоянного тока (ВПТ) [18], например, как запланировано в энергосистемах Сибири и Востока в Забайкальском крае на ПС 220 кВ

© Берзан В. П., Ермураки Ю. В.,  
Постолатий В. М., 2017

«Могоча» (Россия) или в Республики Молдова (ВПТ Вулканешть 400 кВ).

Наиболее перспективным оборудованием для управляемой генерации и потреблением реактивной мощности в ЭЭС представляются устройства названные СТАТКОМ. Перспективным оборудованием для энергетики представляются устройства силовой электроники известные как Flexible AC Transmission System (FACTS). FACTS - это группа устройств, которые улучшают показатели работы энергосистемы. Изготовление этих устройств с использованием элементов силовой электроники расширяет область их применения и значительно улучшает гибкость управления с помощью этих устройств режимами энергосистемы, поскольку позволяют не только регулировать генерирование и потребление реактивной мощности, что в целом характерно для устройств названных СТАТКОМ, но и регулировать значение и направление потока активной мощности в сети [14]. В качестве ограничивающего фактора для широкого применения СТАТКОМ-ов, оборудования группы FACTS, ВПТ в сетевом хозяйстве указана их сравнительно высокая стоимость [18]. Поэтому, снижение стоимости таких устройств и обоснованное определение специальных точек или мест их применения является актуальной задачей не только для силовой электроники, но и для энергетики.

### 1. FACTS технологии в энергетике.

#### Задача исследования

FACTS - оборудование установленное в электросетях переменного тока преобразует электрическую сеть из неактивного устройства транспорта электрической энергии в активный функциональный элемент энергосистемы. В частности, управляемые линии электропередачи переменного тока, имеющие в своем составе фазоворотные устройства (ФПУ) трансформаторного типа также могут рассматриваться как активные элементы энергосистем, поскольку ФПУ являются, по сути, разновидностью FACTS установок [8, 11-13].

Задачи управления потоками мощности, согласования совместной работы сетей с разными стандартами по частоте с использованием FACTS технологий является актуальными не только вследствие развития сегмента генерации за счет ВИЭ, но и в случае решения проблем обеспечения межсистемных связей, например, по линиям которые классифицируется как слабые связи. Такой случай имеется в Республике Мол-

дова. Речь идет о четырех линиях с напряжением 110 кВ между Молдовой и Румынией, которые в настоящее время отключены, но при применении устройств FACTS они могут использоваться для обмена мощностью между энергосистемами Румынии и Молдовы.

FACTS устройства *первого поколения* обеспечивают скалярное регулирование напряжения или реактивной мощности: шунтирующие реакторы (ШР), батареи статических конденсаторов (БСК), устройства продольной компенсации (УПК), статические компенсаторы (СК) и др.

FACTS устройства *второго поколения* обеспечивают режим векторного управления (регулирования). Можно указать на следующие устройства этой группы: асинхронизированные машины (АСМ), фазовращающие трансформаторы (ФВТ), вставки постоянного тока (ВПТ) и др.

К группе *третьего поколения* FACTS устройств можно отнести оборудование в котором применяют полностью управляемые тиристоры (GTO и GCT) и мощные транзисторы (IGBT) с диапазоном напряжений от 2,5 до 6 кВ, и токами отключения от 1500 А до 4000 А. Были разработаны на основе этой элементной базы преобразователи напряжения синхронных статических компенсаторов (СТАТКОМ) [14,16], объединенный регулятор потоков мощности (ОРПМ) [24], вставка постоянного тока на основе преобразователей напряжения (ВПТН) [25], фазоворотное устройство (ФПУ) [13-13, 26] и другие.

С началом использования в 2010 преобразователей напряжения реализованных по модульной многоуровневой схеме на полностью управляемых ключах (транзисторах) можно говорить о *четвертом поколении* FACTS устройств [27]. Для четвертого поколения характерно значительное возрастание единичной мощности установок и коэффициента полезного действия, значение которого может быть 99% и более [14,27]. Снижение потерь в преобразователях напряжения является очень важным фактором, поскольку, в этом случае, появляется возможность решать проблему обеспечения нормального температурного режима меньшими усилиями и затратами.

ВПТ работающие на частоте сети требуют для работы инвертора напряжения большую реактивную мощность – 50-60% от номинальной мощности преобразователя тока или напряжения, а в случае применения схемы передачи электрической энергии на постоянном токе, стоимость преобразовательной подстанции пример-

но в три раза выше, чем стоимость подстанции переменного тока того же уровня напряжения. Отметим, что преобразователи напряжения могут потреблять и выдавать реактивную мощность в заданном диапазоне и осуществлять реверс тока в цепи [25].

Кроме высокой стоимости, необходимости применения дополнительных устройств генерации и компенсации реактивной мощности, ВПТ являются и генераторами широкого спектра высших гармоник тока и напряжения, радиопомех которые требуется фильтровать и подавлять [28].

Развитие распределенной генерации, в частности, на основе возобновляемых источников энергии также требует для их подключения к централизованным электрическим сетям использование согласующих устройств (адаптеры), которые являют в большинстве случаев вставками постоянного тока [29].

Задача настоящей работы состоит в обосновании нового подхода схемной реализации FACTS устройства, которая имела широкий спектр применения в электроэнергетике и характеризовались высокими энергетическими и функциональными показателями.

## 2. Предлагаемое техническое решение и принцип работы устройства

Необходимость преобразования параметров электрической энергии диктуется как конечным потребителем, так и требованиями по минимизации потерь при транспорте и распределении энергии, в том числе и требованиями стандартов по обеспечения качества электрической энергии. Отметим, что как производство, так и преобразование параметров электрической энергии имеют в своей основе закон электромагнитной индукции. В качестве первого такого преобразователя можно указать на электрические машины-электрохимические преобразователи.

Развитие силовой электроники открыла широкие возможности для преобразования параметров электрической энергии, в том числе и в энергетике. Это обеспечивает новое качество в управление режимами и потоками мощности, создает условия для устойчивой работы энергосистем с различными параметрами по частоте и напряжению, повышает гибкость управления и

скорость реакции при появлении нестандартных режимов в энергосистеме. В этом контексте представляются интересными и актуальными работы по созданию новых силовых энергетических устройств для применения в энергосистемах, построенных с использованием современной элементной базы силовой электроники.

### 2.1. Схема многофункционального трехфазного преобразовательного устройства

Рассмотрим концепцию и принцип работы многофункционального трехфазного преобразователя высокого напряжения модульного типа, в которых в качестве силовых ключей используются транзисторы. Конструктивно, преобразователь напряжения представляет собой многомодульную структуру, причем используемые единичные модули одинаковы для всех фаз переменного напряжения. На рис. 1 представлена принципиальная схема предлагаемого многофункционального трехфазного преобразователя напряжения.

Трехфазный преобразователь напряжения *переменного/постоянного – постоянного/переменного тока (AC/DC-DC/AC)* своим выходом переменного напряжения подключается к трехфазной сети высокого напряжения (рис.1). Каждая фаза состоит из  $(M+N)$  функциональных модулей. Модули, обозначение как  $(1 \div M)$  образует полуплечо фазы, которая подключена к положительному полюсу постоянного напряжения, а модули обозначенные как  $(1 \div N)$  образуют полуплечо фазы, которая подключена к отрицательному полюсу постоянного напряжения. Каждый модуль состоит из фильтрующего конденсатора  $C_{11}$  (для группы модулей обозначенных  $(1 \div M)$ ) или  $C_{21}$  (для группы модулей обозначенный  $(1 \div N)$ ). В состав модулей также входит обмотка  $W_1$  или  $W_2$ , силовые транзисторы  $T_{11}$  и  $T_{12}$  или  $T_{21}$  и  $T_{22}$ , а также конденсатор обозначенный как  $C_{12}$  или  $C_{22}$ . Конденсатор  $C_{12}$  или  $C_{22}$  служит для накопления энергии требуемой для коммутации транзисторов  $T_{12}$  или  $T_{22}$ . Транзисторы  $T_{11}$  и  $T_{12}$  или  $T_{21}$  и  $T_{22}$  имеют внутренние обратные диоды. В схеме замещения рис.1 фазы устройства обозначены как **I**, **II** и **III**.

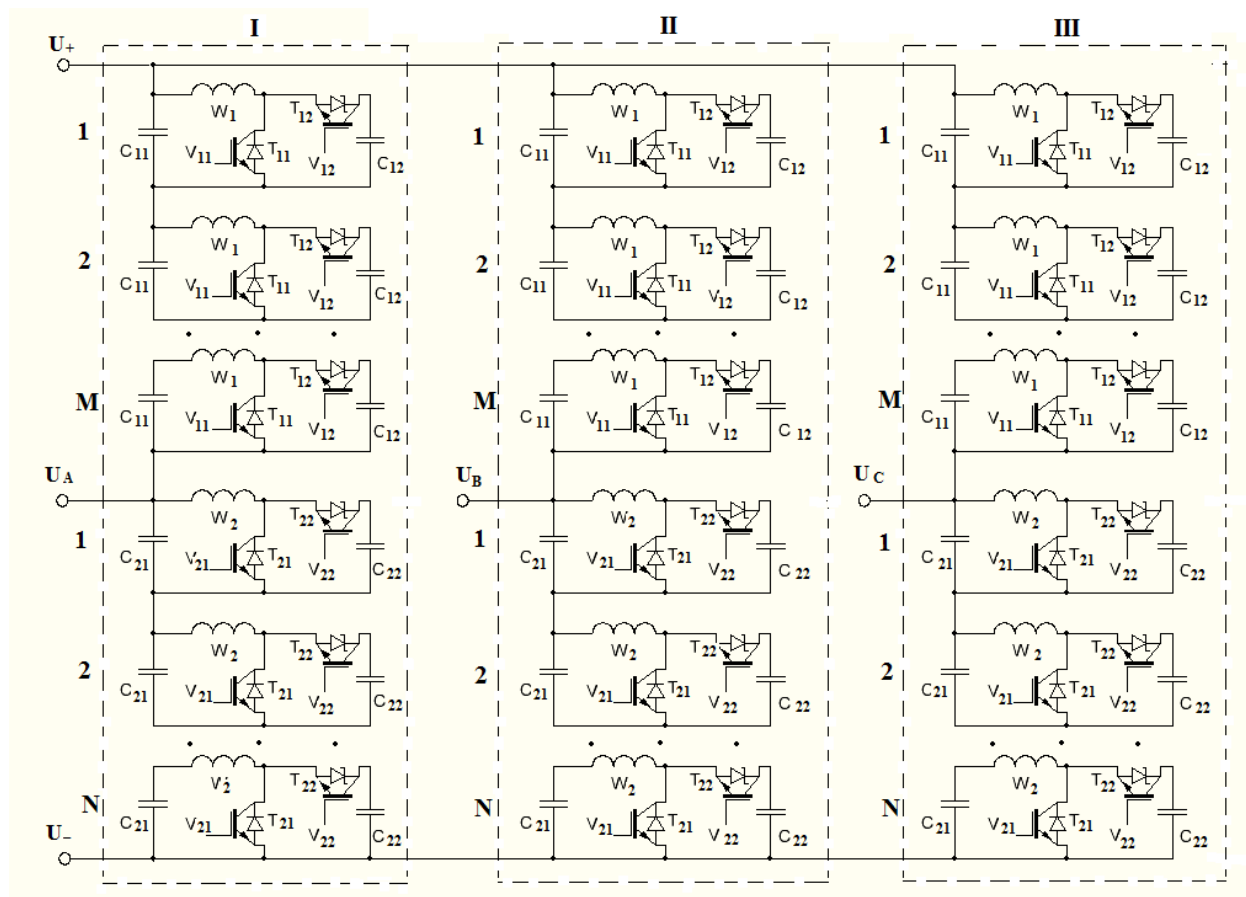


Рис.1. Принципиальная схема универсального трехфазного преобразователя высокого напряжения типа AC/DC-DC/AC

На рис. 2 приведена схема расположения обмоток  $W_1$  и  $W_2$  модулей  $(1 \div M)$  и  $(1 \div N)$  с элементом ферромагнитного сердечника  $Fe$ , разделенные слоями электрической изоляции (Диэлектрик), которые образуют одну фазу, обозначенную как **I**. Класс изоляции определяется наибольшим напряжением в цепи переменного или постоянного тока. Поскольку конструкция модулей может быть унифицирована, появляется возможности использования различных типов изоляции, в том числе и керамического типа. Вид используемого ферромагнитного материала зависит от частоты переключения транзисторов модуля. При частотах до 5 кГц, и при значительных значениях единичной (установленной) мощности модуля, целесообразно использовать в качестве сердечника  $Fe$  электротехническую сталь, а при больших частотах многокомпонентные кристаллические вещества с высокими магнитными характеристиками.

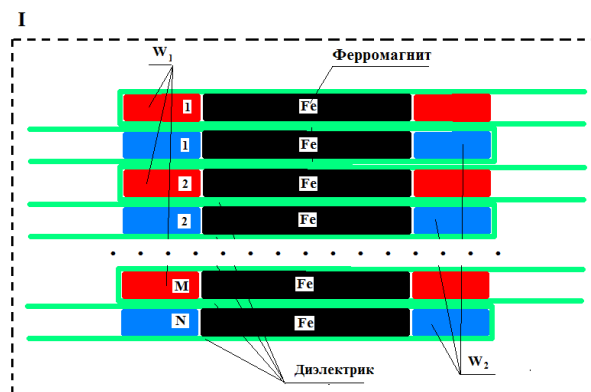


Рис.2. Принцип конструктивного расположения фазы универсального трехфазного преобразователя высокого напряжения вида AC/DC-DC/AC

## 2.2. Алгоритм управления многофункциональным трехфазным преобразователем

На входе многофункционального трехфазного преобразователя напряжения подается высоковольтное линейное напряжение (рис. 1, и рис. 3). На рис.1 и рис. 3 линейные напряжения переменного тока обозначены как  $U_A$ ,  $U_B$ , и  $U_C$ . В

рассматриваемой схеме рис. 1 можно обеспечить специальный режим работы транзисторов  $T_{11}$ ,  $T_{12}$ ,  $T_{21}$  и  $T_{22}$ .

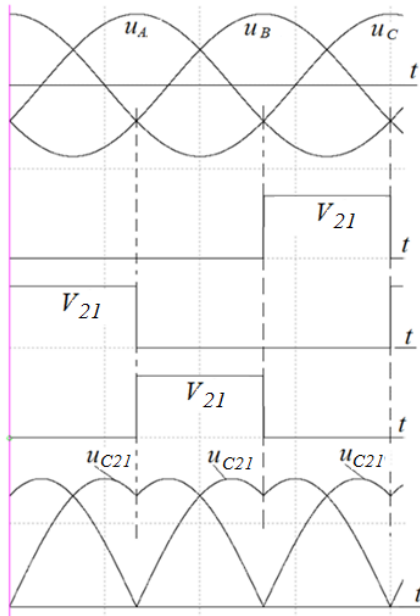


Рис.3. Кривые изменения напряжения на конденсаторах  $C_{11}$  и  $C_{21}$

Каждый транзистор  $T_{21}$ , и  $T_{22}$  работает в двух режимах в течение периода изменения линейного напряжения, подаваемого на преобразователь. В первом режиме транзистор работает с переменной частотой переключения. Этот режим длится 240 электрических градусов. Второй режим рабочего цикла длится 120 градусов. Группы транзисторов  $T_{11}$ ,  $T_{12}$  и  $T_{21}$ ,  $T_{22}$  работают в противофазе. Для исключения образования сквозных токов (короткое замыкание транзистор-транзистор) импульсы управления данных пар транзисторов подаются с определенной задержкой, которая определяется временем отключения транзисторов. Переход от одного режима работы к другому режиму происходит в момент равенства мгновенных линейных напряжений разных фаз с одинаковой полярностью. Начало процесса преобразования энергии (синхронизация) происходит в момент равенства мгновенных значений линейного напряжения для отрицательных чередований фаз (рис. 3). При достижении равенства мгновенных значений напряжений отрицательной полярности (второй режим работы транзисторов) на транзистор  $T_{21}$  подает управляющий импульс с длительностью 120 градусов (см. рис.3, управляющий импульс  $V_{21}$ ). Транзисторы разных фаз имеют аналогичный рабочий цикл, как описано выше, но подача управляющих импульсов на транзисторы  $T_{21}$  выполняется со

сдвигом по фазе на 120 градусов. Благодаря этому алгоритму напряжение  $u_{C21}$  на конденсаторах  $C_{21}$  изменяется согласно кривым, представленным на рис. 3 (диаграмма работы транзисторов).

В то же время, напряжение конденсатора  $C_{21}$  служит для формирования закона изменения частоты коммутации транзисторов преобразователя [21, 22, 30]. Этот закон описывается формулой  $f = (u_{AB} / U_{m,AB}) * f_{nom}$ , где  $U_{m,AB}$  - значение амплитуды линейного напряжения трехфазной сети высокого напряжения;  $u_{AB}$  - мгновенное значение линейного напряжения цепи высокого напряжения;  $f_{nom}$  - номинальная частота, которая определяется допустимым значением частоты переключения транзисторов, используемых в многофункциональном трехфазном преобразователе.

Закон изменения частоты управляющих импульсов транзисторов  $T_{11}$  и  $T_{21}$  преобразователя показан на фиг.4 (см.кривые). Алгоритм управления для первого режима и второго режима работы транзисторных групп  $T_{11}$  и  $T_{21}$  иллюстрируется диаграммами на фиг. 4, которая получена при моделирование работы устройства.

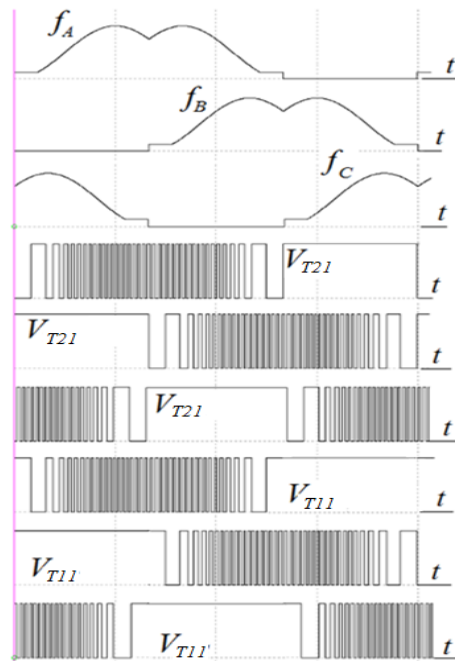


Рис.4. Закон изменения частоты импульсов управления и их распределение по фазам

Транзистор работает при переменной частоте  $f$  переключения в течение 2/3 периода сетевой частоты, а оставшийся интервал 1/3 периода сетевой частоты транзистор не коммутируется

(открыт). Это обеспечивает уменьшение потерь на коммутацию транзисторов многофункционального трехфазного преобразователя. Это очень важный момент в повышении энергетической эффективности данного устройства. В итоге это приводит и к снижению температурных нагрузок активных и пассивных элементов модуля.

Предлагаемое техническое решение реализации многофункционального трехфазного преобразователя позволяет расширить диапазон функций, которые может реализовать данное устройство. Этот преобразователь может обеспечить компенсацию реактивной мощности (функция СТАТКОМа), обеспечить связь между цепью переменного тока и цепью постоянного тока (выпрямитель), электрическая связь между цепью постоянного тока и цепью переменного тока (инвертор), а при использовании группы из двух трехфазных преобразователей предложенного схемного исполнения имеется возможность реализовать связь между двумя цепями с разными частотами тока и напряжения (вставка постоянного тока –  $VtB$ ), электрическими цепями с разными значениями номинального напряжения (функция традиционного автотрансформатора).

Если использовать последнюю из перечисленных функции устройства, то можно реализовать, например, автотрансформаторную связь между электрическими линиями разного класса напряжений, например, 10/20 кВ или 110/220кВ. Устройство, построенное по предложенному принципу можно применять также в мощных высоковольтных частотно - управляемых электроприводах.

### 2.3. Принцип работы многофункционального трехфазного преобразователя

Рассмотрим работу многофункционального трехфазного преобразователя. Процессы в фазах трехфазного преобразователя аналогичны, но эти процессы сдвинуты во времени на интервал времени равный 120 электрическим градусам сетевой частоты. Исходя из этого, мы представим описание рабочего цикла только для модифицированного линейного напряжения, показанного кривой  $u_{C21}$ . Описание принципа работы трехфазного преобразователя представлено для наиболее сложного режима работы, то есть для режима максимальной мгновенной передаваемой мощности, которая имеет место при максимальном значении мгновенного линейного напряжения, например  $u_{AB} = U_{m,AB}$ , где  $U_{m,AB}$  - амплитуда линейного напряжения подаваемого на вход

трехфазного преобразователя. Концепция алгоритма переключения транзисторов трехфазного преобразователя описана в работе [20].

Пусть, в момент времени  $t_0$  управляющий импульс  $V_{21}$  подается на транзистор  $T_{21}$  (рис. 5). В этот момент, транзистор  $T_{21}$  открывается и формирует контур из элементов (в каждом из модулей): конденсатор  $C_{21}$ -обмотка  $W_2$  - транзистор  $T_{21}$ - конденсатор  $C_{21}$ . В этом контуре появляется ток  $I_{T21}$ , который течет по обмотке  $W_2$  и создает магнитный поток в ферромагнитном сердечнике, который имеет воздушные зазоры. Размер воздушных зазоров, задается толщиной изоляции. Толщина изоляции определяется классом напряжения электрической цепи. В результате имеет место процесс накопления энергии в магнитном поле, создаваемого током  $I_{T21}$  до момента времени  $t_1$ . В момент  $t_1$  закрывается транзистор  $T_{21}$ . Поскольку имеется взаимная магнитная связи между обмотками  $W_2$  и  $W_1$  открываются внутренние диоды транзисторов  $T_{11}$  и  $T_{22}$ . В результате образуются два контура. Контур с транзистором  $T_{11}$  состоит из элементов: обмотка  $W_1$ - конденсатор  $C_{11}$ -транзистор  $T_{11}$ - обмотка  $W_1$ , который обтекается током  $I_{T11}$ . Второй контур с транзистором  $T_{22}$  состоит из: обмотка  $W_2$  -транзистор  $T_{22}$  - конденсатор  $C_{22}$ -конденсатор  $C_{21}$ - обмотка  $W_2$  и обтекается током  $I_{T22}$ . В первом контуре энергия, накопленная в магнитном поле ферромагнитного сердечника, передается электрическому полю конденсатора  $C_{11}$ . Во втором контуре имеет место передача энергии магнитного поля рассеяния обмотки  $W_2$ , электрическому полю конденсатора  $C_{22}$ . Этот процесс продолжается до момента времени  $t_2$  пока ток в этом контуре не спадет до нуля. В этот момент  $t_2$  открывается транзистор  $T_{22}$ , который образует контур: конденсатор  $C_{22}$ - транзистор  $T_{22}$  - обмотка  $W_2$ -конденсатор  $C_{21}$ - конденсатор  $C_{22}$ . В этот момент, ток  $I_{T22}$  в этом контуре изменяет свое направление. Следствие изменения направления тока  $I_{T22}$  и существования магнитной связи между обмотками  $W_2$  и  $W_1$ , энергия накопленная в электрическом поле конденсатора  $C_{22}$  передается в конденсатор  $C_{11}$ , а следовательно, в выходную цепь постоянного тока преобразователя напряжения. Этот процесс продолжается до момента времени  $t_3$ . При достижении времени  $t_3$  завершился элементарный цикл работы преобразователя. После момента времени  $t_3$  повторяется цикл работы транзисторов подобный тому, который начался в момент времени  $t_0$ .

Отметим следующую особенность преобразователя напряжения, а именно, что установ-

ленная мощность транзисторов  $T_{12}$  и  $T_{22}$  определена интенсивностью потока рассеивания обмоток  $W_1$  и  $W_2$  и не превышает 10 % от установленной мощности единичного модуля преобразователя напряжения.

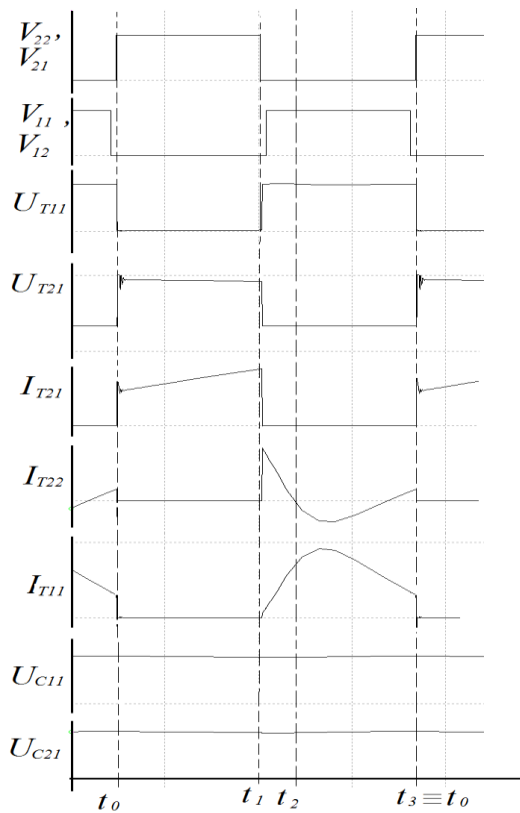


Рис. 5. Диаграмма процесса коммутации транзисторов преобразователя [20]

На рис.5 приняты следующие обозначения величин:  $V_{11}$ ,  $V_{12}$ ,  $V_{21}$ ,  $V_{22}$  - управляющие импульсы транзисторов  $T_{11}$ ,  $T_{12}$ ,  $T_{21}$  и  $T_{22}$ ;  $U_{T11}$  и  $U_{T21}$  - напряжение на транзисторах  $T_{11}$ , и  $T_{21}$ ;  $U_{C11}$  и  $U_{C21}$  - напряжение на конденсаторах  $C_{11}$  и  $C_{21}$ ;  $I_{T11}$ ,  $I_{T21}$ ,  $I_{T22}$  - токи контуров с транзисторами  $T_{11}$ ,  $T_{21}$  и  $T_{22}$

### 3. Результаты моделирования режима работы преобразователя AC/DC

На рис.6 приведена математическая модель преобразователя в среде MULTISIM.

На рис.7-9 приведены диаграммы напряжений и токов транзисторов, импульсов управления и напряжения на конденсаторе сглаживающего фильтра при постоянной нагрузке единичного модуля и заданных дискретных значений линейного напряжения цепи переменного тока. Эти диаграммы получены в результате моделирования работы преобразователя напряжения с предложенной топологией силовой схемы.

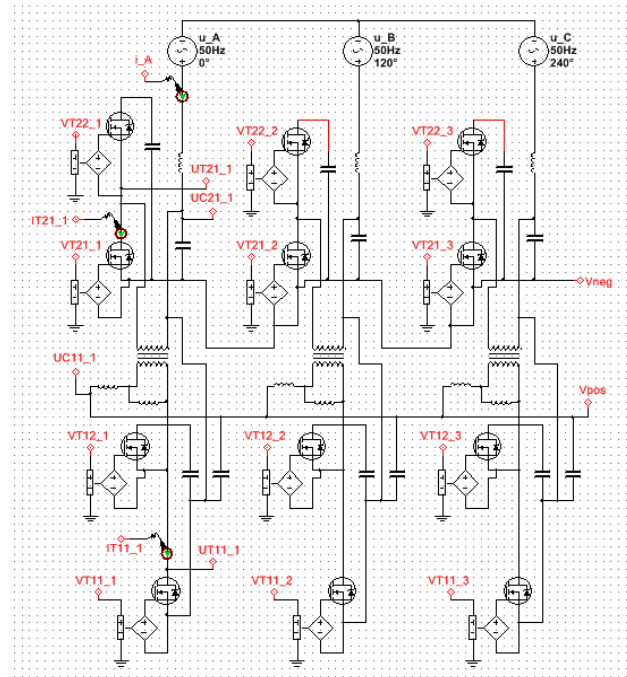
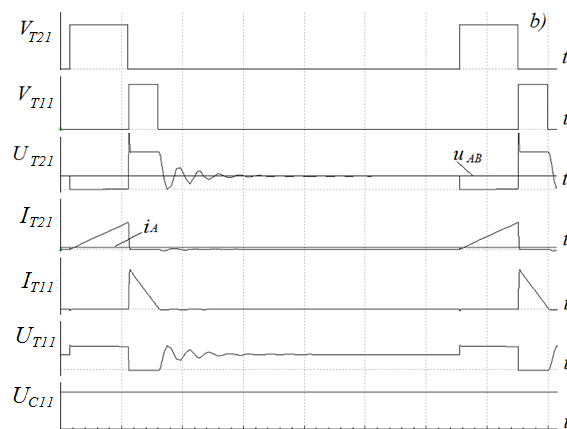
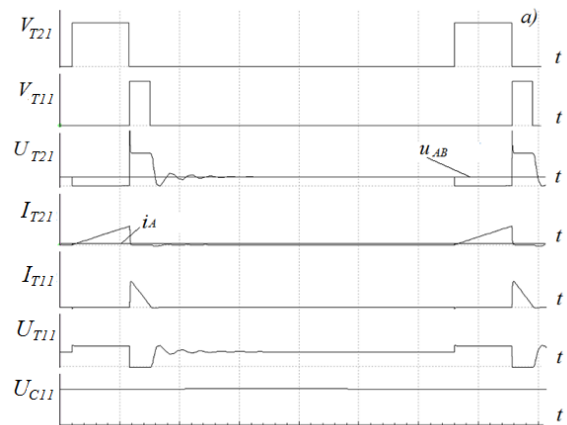


Рис. 6. Структурная схема математической модели преобразователя в среде MULTISIM





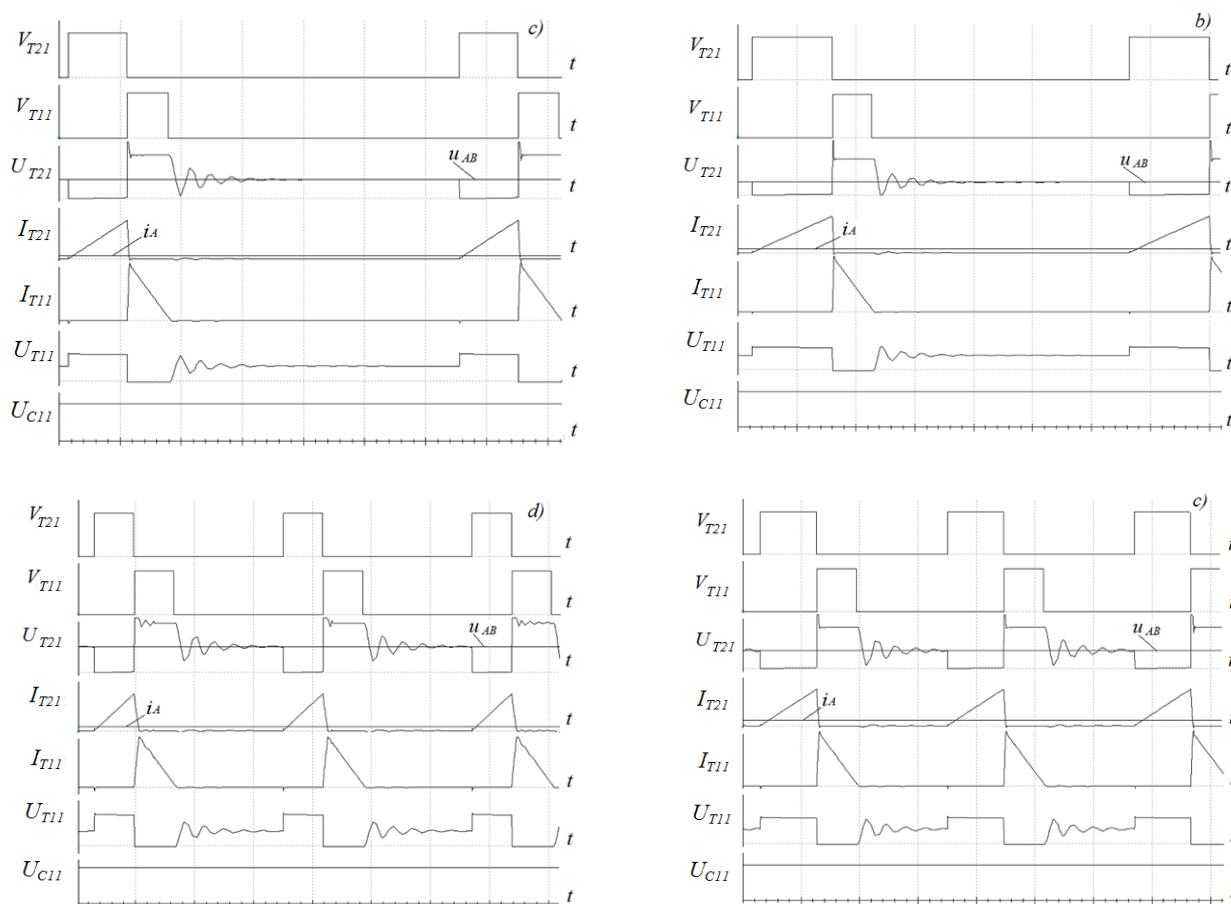


Рис. 7. Диаграммы напряжения и тока для значения нагрузки  $P = 0,25 P_{\text{ном}}$  преобразователя:  $u_{AB} = 0,25U_{m,AB}$  (а),  $u_{AB} = 0,5U_{m,AB}$  (б),  $u_{AB} = 0,75U_{m,AB}$  (с),  $u_{AB} = 1,0U_{m,AB}$  (д)

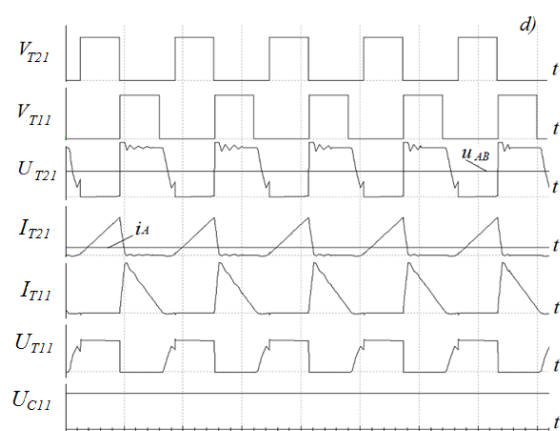
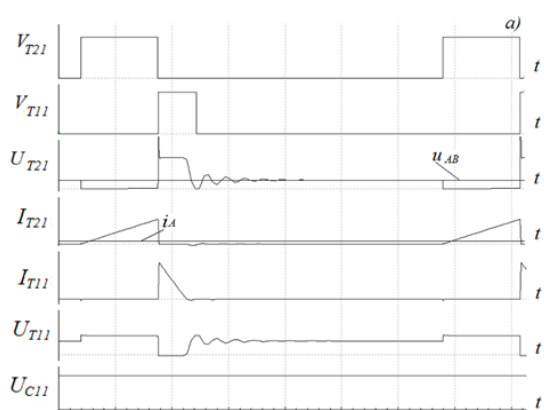


Рис. 8. Диаграммы напряжения и тока для значения нагрузки  $P = 0,5 P_{\text{ном}}$  преобразователя:  $u_{AB} = 0,25U_{m,AB}$  (а),  $u_{AB} = 0,5U_{m,AB}$  (б),  $u_{AB} = 0,75U_{m,AB}$  (с),  $u_{AB} = 1,0U_{m,AB}$  (д)



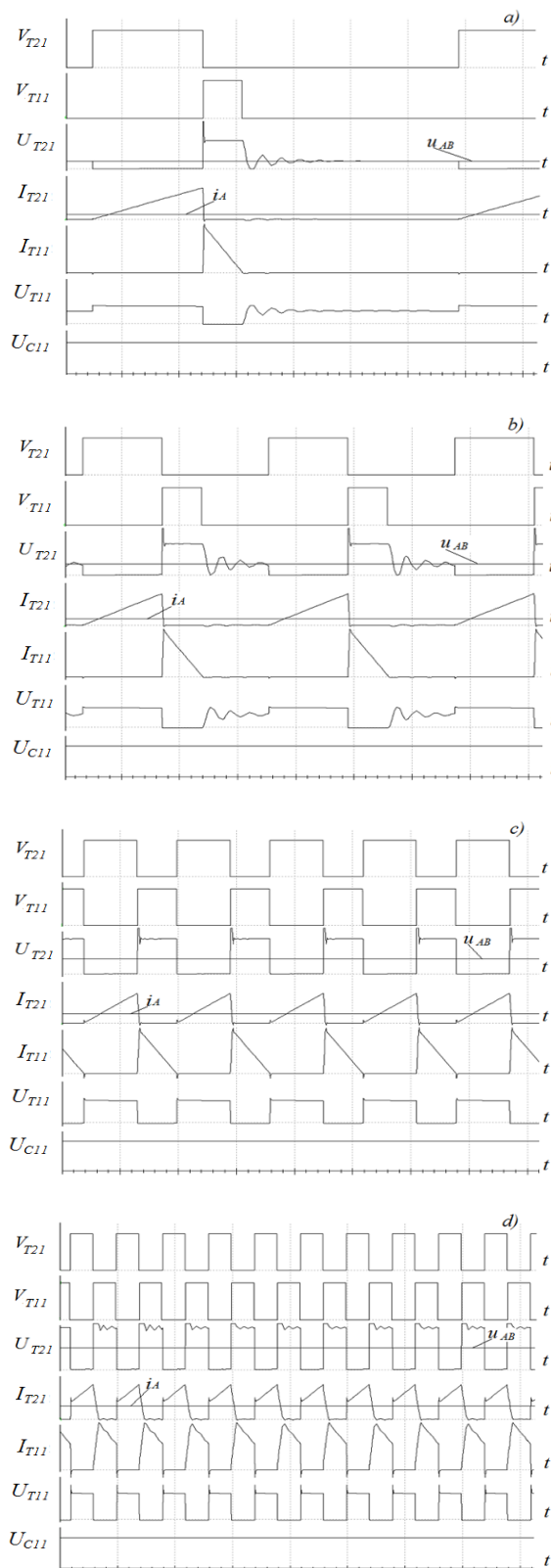


Рис. 9. Диаграммы напряжения и тока для значения нагрузки  $P = 1,0 P_{\text{ном}}$  преобразователя:  $u_{AB} = 0,25U_{m,AB}$  (а),  $u_{AB} = 0,5U_{m,AB}$  (б),  $u_{AB} = 0,75U_{m,AB}$  (с),  $u_{AB} = 1,0U_{m,AB}$  (д)

Моделирование трехфазного преобразователя напряжения на имитационной модели подтверждает, что транзисторы работают при переменной частоте переключения. Частота переключения транзисторов растет с повышением как мгновенного значения линейного напряжения цепи переменного тока, так и при росте нагрузки преобразователя на стороне постоянного тока. Таким образом, это приводит к уменьшению потерь в силовых транзисторах.

На рис 10 представлены результаты моделирования работы преобразователя AC/DC при условии, что эффективный коэффициент преобразования напряжения переменного тока (амплитуда) в напряжение постоянного тока равно 2. Таким образом, можно согласовать цепи с разным классом напряжения.

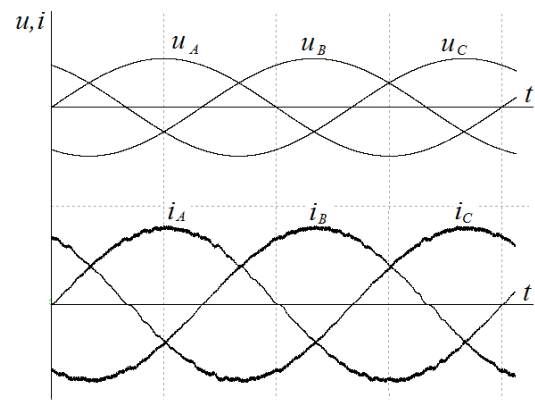


Рис. 10. Диаграмма линейных напряжений и токов в питающей сети при работе преобразователя AC/DC на высоковольтную цепь постоянного тока

В качестве примера практического применения режима работы преобразователя представленного на рис.10 можно указать на возможность согласования сетей напряжением 110 кВ и 220 кВ переменного тока без использования силовых трансформаторов традиционного исполнения, когда данный преобразователь используется как функциональный силовой элемент вставки постоянного тока. Изменение значения эффективного коэффициента трансформации обеспечивается ШИМ регулированием, т.е. за счет управления углом открытия и закрытия транзисторов. Получаем при этом плавное регулирование выходного постоянного напряжения устройства, например, в пределах 1:2 от номинального входного напряжения. Таким же образом можно регулировать и напряжение переменного тока, поскольку устройство может передавать мощность в двух направлениях - из цепи переменного тока в

цепь постоянного тока (преобразователь AC/DC) из цепи постоянного тока в цепь переменного тока (преобразователь DC/AC).

Существенным моментом для последнего режима (DC/AC) является то, что частота выходного переменного напряжения преобразователя определяется автоматически частотой сети переменного напряжения.

Моделирование режима работы преобразователя показывает, что высшие гармоники тока, генерированные преобразователем, не превышают допустимые значения по ГОСТу. Увеличение значения емкости конденсаторов фильтра приводит к снижению уровня высших гармоник тока инжектируемые преобразователем в сеть.

### Выводы

1. Предложена концепция и топология схемной реализации нового трехфазного многофункционального преобразователя напряжения, позволяет добиваться высокой гибкости проектирования и физического исполнения силовых энергетических устройств различного функционального назначения на общих принципах конструирования.

2. Предложен преобразователь, который характеризуется малой металлоемкостью и легко интегрируется в существующую инфраструктуру электроэнергетики. В данном устройстве обмен энергией между цепями происходит на высокой частоте, что и обеспечивает существенное снижение материалоемкости, массогабаритных и стоимостных показателей.

3. Для управления коммутацией силовых транзисторов предложен комбинированный алгоритм управления с автоматической подстройкой режима работы в зависимости от мощности нагрузки и мгновенного значения напряжения сети переменного тока, что обеспечивает снижение собственных потерь преобразователя. Алгоритм реализует управление при переменной частоте коммутации силовых транзисторов и переменной ширины управляющих импульсов, причем транзисторы 2/3 периода работают при ШИМ коммутации при изменении частоты импульсов, а 1/3 периода полностью открыты, что и обеспечивает снижение потерь энергии в силовых ключах.

4. Предложенное техническое решение изготвления преобразователя может обеспечить реализации функции компенсации реактивной мощности (СТАТКОМа), связь между цепью переменного тока и цепью постоянного тока (выпрямитель), электрическую связь между цепью

постоянного тока и цепью переменного тока (инвертор), а при использовании группы из двух трехфазных преобразователей предложенного схемного исполнения имеется возможность реализовать связь между двумя цепями с разными частотами тока и напряжения (вставка постоянного тока – VtV), а также связь между электрическими цепями с разными значениями номинального напряжения (функция традиционного автотрансформатора).

### Список использованной литературы

1. Планетарная электроэнергетическая система [Электронный ресурс]. Режим доступа: [http://www.km.ru/referats/EED283AB\(2018.03.20\)](http://www.km.ru/referats/EED283AB(2018.03.20)).
2. Бондаренко, А. Ф., Лисицын, Н. В., Морозов, Ф. Я., Окин, А. А., Семёнов, В. А. Зарубежные энергообъединения [Текст]. М.: "Издательство НЦ ЭНАС". 2001.
3. Электроэнергетика России. История и перспективы развития [Текст]. Под общей редакцией члена-корреспондента РАН Дьякова, М. "Информэнерго". 1997. 568 с.
4. Автоматизация диспетчерского управления в электроэнергетике [Текст]. Под общей ред. Руденко, Ю. Н. и Семёнова, В. А. М.: Издательство МЭИ. 2000. 648 с.
5. Постолатий, В. М., Голуб, И. В. Моделирование переходных режимов молдавской энергосистемы по условиям статической устойчивости [Электронный ресурс]. Проблемы региональной энергетики, 1 (21)/2013, сс.1-13. ISSN 1857-0070. Режим доступа: [http://journal.ie.asm.md/assets/files/m71\\_2\\_226.pdf](http://journal.ie.asm.md/assets/files/m71_2_226.pdf)
6. Лебедев, С. А., Жданов, П. С. Устойчивость параллельной работы электрических систем [Текст]. М.; Л.: ГЭИ, 1934. – 387 с.
7. Веников, В. А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах [Текст]. М.: Высшая школа, 1978 – 415 с.
8. Постолатий, В. М., Быкова, Е. В., Сулов, В. М., Шакарян, Ю. Г., Тимашова, Л. В., Карева, С. Н. Эффективность компактных управляемых высоковольтных линий электропередачи [Электронный ресурс]. Проблемы региональной энергетики, 3 (29)/2015, сс.1-17. ISSN 1857-0070. Режим доступа: [http://journal.ie.asm.md/assets/files/04\\_03\\_29\\_2015.pdf](http://journal.ie.asm.md/assets/files/04_03_29_2015.pdf)
9. Постолатий, В. М., Берзан, В. П., Быкова, Е. В. Режимы энергосистемы Молдовы при введе-

нии в работу вставки постоянного тока на подстанции Вулканешть для связи с энергосистемой Румынии [Электронный ресурс]. Електротехнічні та комп'ютерні системи. 2017. № 25 (101), pp.230-239. ISSN 2221-3805. Режим доступа: <http://etks.opu.ua/?fetch=articles&with=info&id=907>.

10. Постолатий, В. М., Голуб, И. В., Быкова, Е. В., Шевченко, Н. К., Суслов, В. М., Горе, Н. С. Моделирование вариантов развития электроэнергетической системы Республики Молдова с учетом параллельной работы с энергосистемами соседних стран [Электронный ресурс]. Проблемы региональной энергетики, 1 (15)/2011, сс.18-30. ISSN 1857-0070. Режим доступа: <http://journal.ie.asm.md/ro/contents/elektronnyj-zhurnal-n-115-2011>

11. Калинин, Л. П., Зайцев, Д. А., Тыршу, М. С., Голуб, И. В. Характеристики фазоворотного трансформатора, выполненного по схеме «многоугольник» [Электронный ресурс]. Проблемы региональной энергетики, 3 (35) 2017, сс.1-8. ISSN 1857-0070. Режим доступа: [http://journal.ie.asm.md/assets/files/01\\_03\\_35\\_2017.pdf](http://journal.ie.asm.md/assets/files/01_03_35_2017.pdf)

12. Голуб, И. В. Однотрансформаторное фазорегулирующее устройство для управления потоками мощности в электрических сетях [Электронный ресурс]. Проблемы региональной энергетики, 2 (31)/2016, сс.1-10. ISSN 1857-0070. Режим доступа: [http://journal.ie.asm.md/assets/files/01\\_02\\_31\\_2016.pdf](http://journal.ie.asm.md/assets/files/01_02_31_2016.pdf)

13. Бошняга, В. А., Суслов, В. М. Трехэлементное реакторно-конденсаторное устройство для связи асинхронно работающих энергосистем переменного тока [Электронный ресурс]. Проблемы региональной энергетики, 2 (31)/2016, сс.39-47. ISSN 1857-0070. Режим доступа: [http://journal.ie.asm.md/assets/files/05\\_02\\_31\\_2016.pdf](http://journal.ie.asm.md/assets/files/05_02_31_2016.pdf)

14. ABB's HVDC and SVC Light - technology and applications [Electronic resource]. Access Mode: [www.cerien.upc.edu/jornades/jiie2014/pnencies/3%20Jan%20Svensson.pdf](http://www.cerien.upc.edu/jornades/jiie2014/pnencies/3%20Jan%20Svensson.pdf)

15. Mats Hyttinen, Jan – Olof Lamell, Tom F. Nestli. New application of voltage source converter (VSC) HVDC to be installed on the gas platform Troll A. [Electronic resource]. B4-210, Session 2004, CIGRÉ, Access Mode: <https://pdfs.semanticscholar.org/a20d/72b6c5bc22c69ad6e5ee11db8d44ca635557.pdf>

16. SVC Light® The next generation [Electronic resource]. Access Mode: [www05.abb.com/global/scot/scot221.nsf/veritydisplay/.../SVC%20Light\\_brochure.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot221.nsf/veritydisplay/.../SVC%20Light_brochure.pdf)

17. Устройства регулирования реактивной мощности на базе современной силовой электроники [Электронный ресурс]. Режим доступа: [http://www.ntc-powr.ru/innovative\\_projects/reactive\\_power\\_control\\_device\\_based\\_on\\_the\\_modern\\_power\\_electronics/](http://www.ntc-powr.ru/innovative_projects/reactive_power_control_device_based_on_the_modern_power_electronics/)

18. Зачем нам СТАТКОМ [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.energyland.info/analitic-show-129974>

19. Ermurachi, Iu. V. Transformator electronic de putere pentru rețelele de distribuție a energiei electrice [Electronic resource]. Problemele energiei regionale, 3 (35) 2017, сс.17-24. ISSN 1857-0070. Access Mode: [http://journal.ie.asm.md/assets/files/12\\_03\\_35\\_2017.pdf](http://journal.ie.asm.md/assets/files/12_03_35_2017.pdf)

20. Berzan, V. P.; Ermurachi, Iu. V. Single Phase Inverter with Hybrid Topology and Efficient Switching Principles [Electronic resource]. Proceedings- 2017 International Conference on Modern Power Systems (MPS 2017), Cluj-Napoca, Romania 6-9 June 2017, IEEE Catalog Number: CFP17MPR-POD, ISBN 978-1-5090-6565-3. DOI:10.1109/MPS.2017.7974370. Access Mode: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7974370/>

21. Berzan, V.; Ermurachi, Iu. High-Efficiency Electronic Transformer for Powering of Individual Consumers from the Medium Voltage Grid. Proceedings- 2017 International Conference on [Electronic resource]. Electromechanical and Power Systems (SIELMEN 2017), Chișinău, Republic of Moldova October 11-13, 2017. pp. 516-521. Access Mode: DOI: 10.1109/SIELMEN.2017.8123386.

22. Berzan, V. P., Ermurachi, Iu. V. High Efficiency Bridgeless AC/DC Power Supply with Single Step Conversion for the Data Centers Powered from the Three-Phase Network [Electronic resource]. 5<sup>th</sup> International Symposium on Electrical and Electronics Engineering ISEEE 2017, Galati, Romania, October 20 - 22, 2017 DOI:10.1109/ISEEE.2017.8170654

23. Тихонов, А. В. Моделирование устройств FACTS при оценивании состояния современных ЭЭС [Электронный ресурс]. Дисс. на соиск. ученой степени к.т.н. Специальность 05.14.02 – Электрические станции и электроэнергетические системы. Институт систем энергетики им. Л. А. Мелентьева СО РАН, Иркутск, 2017. 178с. Режим доступа: <http://isem.irk.ru/upload/iblock/479/4794f10df0730445aead777f34fcbfbc.pdf>

24. Егоров, И. С., Гольдштейн, М. Е. Регулирование напряжения блока «синхронный генератор – объединенный регулятор потока мощности» [Электронный ресурс]. Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика», 2014, том 14, № 3, сс.19-24.

Режим доступа: <https://vestnik.susu.ru/power/article/view/2573>

25. Концепция развития электропередач и вставок постоянного тока в ЕЭС России. Краткая техническая информация [Электронный ресурс]. Санкт-Петербург, 2016. Режим доступа: [www.niip.ru/news/conception\\_ppt.pdf](http://www.niip.ru/news/conception_ppt.pdf) (2018.03.21)

26. Патент на изобретение №2450420. Полупроводниковое фазоповоротное устройство [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://ru-patent.info/24/50/2450420.html>

27. Системы передачи постоянного тока: текущее состояние и перспективы развития [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://matveev-igor.ru/articles/354343> (2018.03.21)

28. Основные недостатки сетей высокого напряжения постоянного тока [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://forca.ru/stati/energetika/osnovnye-nedostatki-setey-vysokogo-napryazheniya-postoyannogo-toka.html>

29. Zhe Chen, Josep M. Guerrero, and Frede Blaabjerg. A Review of the State of the Art of Power Electronics for Wind Turbines [Text]. IEEE Transactions on power electronics, Vol. 24, No. 8, August 2009.- pp.1859-1875.

30. Berzan, V., Ermurachi, Iu. Zero-voltage and Zero-current-switching of Half-bridge PWM Converter for High Power Applications [Electronic resource]. Problemele energeticii regionale, vol. 2(28)/2015. pp. 21–28. Access Mode: [http://journal.ie.asm.md/assets/files/04\\_02\\_28\\_2015\(1\).pdf](http://journal.ie.asm.md/assets/files/04_02_28_2015(1).pdf)

### References

1. "Planetary electric power system" (2018). [Planetarnaia electroenergeticeskaia sistema], available at: <http://www.km.ru/referats/EED283AB> (2018.03.20)

2. Bondarenko, A. F., Lisitsyn, N. V., Morozov, F. Ya., Okin, A. A., Semenov, V. A. (2001). Foreign energy associations. [Zarubiejnie energoobiedinenia]. M.: "Publishing house of NTs ENAS".

3. Power engineering in Russia. History and development prospects (1997). [Electroenergetica Rossii. Istoria i perspective razvitiia]. Under the general editorship of Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences. Dyakova, M. JSC "Informenergo". 568 p.

4. Automation of dispatching management in electric power industry (2000). [Avtomatizatsia dispetcherskogo upravleniia v electroenergetike]. Under the general ed. Rudenko, Yu. N. and Semyonov, V. A. M.: Publishing house MEI. 648 p.

5. Postolatiy, V. M., Golub, I. V. (2013). Modeling of transitional regimes of the Moldovan power system according to the conditions of static stability. [Modelirovanie perehodnih rejimov moldavskoi energosistemi po usloviam staticheskoi ustoychivosti] Problems of regional energy, 1 (21), pp. 1-13. SN 1857-0070. Access mode: [http://journal.ie.asm.md/assets/files/m71\\_2\\_226.pdf](http://journal.ie.asm.md/assets/files/m71_2_226.pdf)

6. Lebedev, S. A., Zhdanov, P. S. (1934). Stability of parallel operation of electrical systems. [Ustoychivost' parallelnoi raboti elektricheskikh sistem] M.-L.: GEI, 387p.

7. Venikov, V.A. (1978). Transient electromechanical processes in electrical systems. [Perehodnie elektromekhanicheskie protsessy v elektricheskikh sistemakh]. M.: Higher School, 415 p.

8. Postolatiy, V. M., Bykova, E. V., Suslov, V. M., Shakarya, Yu. G., Timashova, L. V., Kareva, S. N. (2015). The efficiency of compact controlled high-voltage power lines. [Effektivnosti kompaktnih upravlyaemih vysokovoltnih liniy elektropereдачи]. Problems of regional energy, 3 (29), pp.117. ISSN 1857-0070. Access mode: [http://journal.ie.asm.md/assets/files/04\\_03\\_29\\_2015.pdf](http://journal.ie.asm.md/assets/files/04_03_29_2015.pdf)

9. Postolatiy, V. M., Berzan, V. P., Bykova, E. V. (2017). Modes of the Moldovan energy system with the introduction of a DC insertion at the Vulcanesti substation for connection with the power system of Romania. [Rejimi energosistemi Moldovi pri vvedenii v rabotu vstavki postoiannogo toka na podstantii Vulkaneshti dlea sveazi s energosistemoi Rumunii]. Electrical systems and computer systems. No. 25 (101), pp. 230-239. ISSN 2221-3805. Access mode: <http://etks.opu.ua/?fetch=articles&with=info&id=907>

10. Postolatiy, V. M., Golub, I. V., Bykova, E. V., Shevchenko, N. K., Suslov, V. M., Gore, N.S. (2011). Modeling options for the development of the electricity system of the Republic of Moldova, taking into account the parallel work with the energy systems of neighboring countries. [Modelirovanie variantov razvitiia electroenergeticeskoi sistemi Respubliki Moldova s uciotom parallelnoi raboti s energosistemami sosednih stran]. Problems of regional energy, 1 (15), pp.18-30. ISSN 1857-0070. Access mode: <http://journal.ie.asm.md/ro/contents/elektronnyj-zhurnal-n-115-2011>

11. Kalinin, L. P., Zaitsev, D. A., Tyrshu, M. S., Golub, I. V. (2017). Characteristics of the phase-reversing transformer, made according to the scheme "polygon". [Harakteristiki fazopovorotnogo transformatora, vipolnenogo po sheme «mnogougolnik»]. Problems of regional energy, 3

- (35), pp. 1-8. ISSN 1857-0070. Access mode: [http://journal.ie.asm.md/assets/files/01\\_03\\_35\\_2017.pdf](http://journal.ie.asm.md/assets/files/01_03_35_2017.pdf)
12. Golub, I. V. (2016). Single-transformer phase-regulating device for controlling power flows in electrical networks. [Odnofazovoe fazoreguliruiuschee ustroistvo dlea upravleniya potokami moscinosti v elektriceskikh seteah]. Problems of regional energy, 2 (31), pp. 1-10. ISSN 1857-0070. Access mode: [http://journal.ie.asm.md/assets/files/01\\_02\\_31\\_2016.pdf](http://journal.ie.asm.md/assets/files/01_02_31_2016.pdf)
13. Boshnyaga, V. A., Suslov, V. M. (2016). Three-element reactive capacitor device for coupling of asynchronously operating AC power systems. [Trehelementnoe reaktornoe kondensatornoe ustroistvo dlea sveazi asinhronno rabotaiuschih energosistem peremennogo toka]. Problems of regional energy, 2 (31), pp.39-47. ISSN 1857-0070. Access mode: [http://journal.ie.asm.md/assets/files/05\\_02\\_31\\_2016.pdf](http://journal.ie.asm.md/assets/files/05_02_31_2016.pdf)
14. ABB's HVDC and SVC Light - technology and applications (2014). Access Mode: [www.cerien.upc.edu/jornades/jiie2014/ponencies/3%20Jan%20Svensson.pdf](http://www.cerien.upc.edu/jornades/jiie2014/ponencies/3%20Jan%20Svensson.pdf)
15. Mats Hyttinen, Jan - Olof Lamell, Tom F. Nestli. Troll A (2004). B4-210, Session 2004, CI-GRÉ, Access Mode: <https://pdfs.semanticscholar.org/a20d/72b6c5bc22c69ad6e5ee11db8d44ca635557.pdf>
16. SVC Light® The next generation (2011). Access Mode: [www05.abb.com/global/scot/scot221.nsf/veritydisplay/.../SVC%20Light\\_brochure.pdf7.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot221.nsf/veritydisplay/.../SVC%20Light_brochure.pdf7.pdf)
17. "Devices regulating reactive power based on modern power electronics" (2018). [Ustroistvo regulirovaniya reaktivnoi moscinosti na baze sovremennoi silovoi elektroniki]. Access mode: [http://www.ntc-powr.ru/innovative\\_projects/reactive\\_power\\_control\\_device\\_based\\_on\\_the\\_modern\\_power\\_electronics/](http://www.ntc-powr.ru/innovative_projects/reactive_power_control_device_based_on_the_modern_power_electronics/)
18. Why do we need STATCOM (2018). [Zacem nam STATCOM]. Access mode: <http://www.energyland.info/analitic-show-129974>
19. Ermurashi, Iu. V. (2017). Electronic power transformer for power distribution networks. [Transformator electronic de putere pentru rețelele de distribuție a energiei electrice]. Problems of regional energetics, 3 (35), pp. 17-24. ISSN 1857-0070. Access Mode: [http://journal.ie.asm.md/assets/files/12\\_03\\_35\\_2017.pdf](http://journal.ie.asm.md/assets/files/12_03_35_2017.pdf)
20. Berzan, V. P., Ermurachi, Iu. V. (2017). Single Phase Inverter with Hybrid Topology and Efficient Switching Principles. Proceedings- 2017 Conferința Internațională privind Sistemele de Putere Moderne (MPS 2017), Cluj-Napoca, România 6-9 iunie 2017, IEEE Număr de catalog: CFP17MPR-POD, ISBN 978-1-5090-6565-3. DOI: 10.1109 / MPS.2017.7974370. Access Mode: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7974370/>
21. Berzan, V., Ermurachi, Iu. (2017). High-Efficiency Electronic Transformer for Powering of Individual Consumers from the Medium Voltage Grid. Proceedings- 2017 International Conference on Electromechanical and Power Systems (SIELMEN 2017), Chișinău, Republic of Moldova October 11-13, 2017. pp. 516-521. Access Mode: DOI: 10.1109/SIELMEN.2017.8123386.
22. Berzan, V. P., Ermurachi, Iu. V. (2017) High Efficiency Bridgeless AC/DC Power Supply with Single Step Conversion for the Data Centers Powered from the Three-Phase Network. 5th International Symposium on Electrical and Electronics Engineering ISEEE 2017, Galati, Romania, October 20 - 22, 2017 DOI:10.1109/ISEEE.2017.8170654
23. Tikhonov, A. V. (2017). Modeling of FACTS devices in evaluating the state of modern EPS [Modelirovanie ustroistv FACTS pri otenivanii sostoienii sovremennih EES]. Diss. to the soisk. Ph.D. Specialty 05.14.02 - Electric stations and electric power systems. Institute of Power Systems. L.A. Melentyev, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, 178s. Access mode: <http://isem.irk.ru/upload/iblock/479/4794f10df0730445aead777f34fcbfbc.pdf>
24. Egorov, I. S., Goldstein, M. E. (2014). Regulation of the voltage of the "synchronous generator - integrated power flow regulator" block [Regulirovanie napreajenia bloca «sinhronnii generator – obiedinennii reguleator potoka moscinosti»]. Herald of SUSU. Series "Energy". Volume 14, № 3, cc.19-24. Access mode: <https://vestnik.susu.ru/power/article/view/2573>
25. The concept of the development of power transmission and DC inserts in the UES of Russia (2016). Brief technical information [Kontseptia razvitiia electropredac i vstavok postoianogo toka v EES Rossii. Kratkaia tehniceskaja informacia]. St. Petersburg. Access mode: [www.niipt.ru/news/conception\\_ppt.pdf](http://www.niipt.ru/news/conception_ppt.pdf) 2018.03.21).
26. Semiconductor phase-rotation device (2011). [Poluprovodnikovoe fazopovorotnoe ustroistbo]. Patent for invention No. 2450420. Access mode: <http://en-patent.info/24/50/2450420.html>
27. DC transmission systems: current status and development prospects (2017) [Sistemi peredaci postoianogo toka: tekushee sostoianie i perspektivi razvitiia]. Access mode: <http://matveev-igor.ru/articles/354343> (2018.03.21).

28. Main disadvantages of high voltage DC networks (2018) [Osnovnnie nedostatki setei vysokogo napreajenia postoiannogo toka]. Access mode: <http://forca.ru/stati/energetika/osnovnye-nedostatki-setey-vysokogo-napryazheniya-postoyannogo-toka.html>

29. Zhe Chen, Josep M. Guerrero, and Frede Blaabjerg. (2009). A Review of the State of the Art of Power Electronics for Wind Turbines. IEEE

Transactions on power electronics, Vol. 24, No. 8, August .- pp.1859-1875.

30. Berzan, V., Ermurachi, Iu. (2015). Zero-voltage and Zero-current-switching of Half-bridge PWM Converter for High Power Applications Problemele energeticii regionale, vol. 2(28), pp. 21-28. Access Mode: [http://journal.ie.asm.md/assets/files/04\\_02\\_28\\_2015 \(1\) pdf](http://journal.ie.asm.md/assets/files/04_02_28_2015%20(1).pdf)

## MULTIFUNCTIONAL THREE-PHASE HIGH VOLTAGE MODULAR TYPE COVERER

V. P. Berzan, Yu. V. Ermurachi, V. M. Postolaty

*Institute of Power Engineering of the Academy of Science of the Moldova*

**Abstract.** *Parallel operation of electric power systems is an actual task, since it allows increasing the reliability of energy supply and the quality of electricity supplied to consumers. Modern technical devices implemented on the basis of power electronics, which are developing intensively, allow solving qualitatively many problems of modern energy. In this paper, a new approach to the circuit realization of the FACTS device is substantiated, which had a wide range of applications in the electric power industry and would be characterized by high energy and functional indicators. The concept and operation principle of a multifunctional three-phase high-voltage converter of modular type is considered, in which are used of the transistors. The voltage converter is a multimodule structure of single power modules that are the same for all AC phases. This structure can be extended to obtain the required parameters for voltage and power. The proposed voltage converter can perform the following functions: reactive power compensation (STATCOM function), communication between the AC circuit and the DC circuit (rectifier), the connection between the DC circuit and the AC circuit (inverter), and when using a group of two three-phase converters it is possible to carry out a communication device between two circuits with different current and voltage frequencies (DC link - BtB), as well as communication between circuits with different values of the voltage (the function of the traditional autotransformer). Pulse-width modulation with a variable pulse repetition frequency is used in the converter, which reduces the converter's own losses at variable load and of that various voltage levels in the power circuit. A mathematical model of a three-phase AC / DC converter has been developed, and the operating mode has been studied for a load variation in the range from zero to the nominal value. It is shown that the spectrum of the current harmonics generated by the converter is at the level permitted by normative documents.*

**Keywords:** *FACTS technology, pulse width modulation, variable frequency, bi-directional power transfe*

## БАГАТОФУНКЦІОНАЛЬНИЙ ТРИФАЗНИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ ВИСОКОЇ НАПРУГИ МОДУЛЬНОГО ТИПУ

В. П. Берзан, Ю. В. Єрмуракі, В. П. Постолатій

*Інститут енергетики Академії наук Молдови*

**Анотація.** *Паралельна робота електроенергетичних систем є актуальним завданням, оскільки дозволяє підвищити надійність енергопостачання і якість електроенергії, що поставляється споживачам. Сучасні технічні пристрої, реалізовані на базі силової електроніки, які інтенсивно розвиваються, дозволяють якісно вирішувати багато проблем сучасної енергетики. У даній роботі обґрунтовується новий підхід схемної реалізації FACTS пристрою, яке повинно мати широкий спектр застосування в електроенергетиці і характеризувалися високими енергетичними і функціональними показниками. Розглянуто концепцію та принцип роботи багатофункціонального трифазного перетворювача високої напруги модульного типу, в якому в якості силових ключів використовуються*



транзистори. Перетворювач напруги являє собою багатомодульну структуру з одиничних силових модулів, однакових для всіх фаз змінної напруги. Цю структуру можна наростити для отримання необхідних параметрів по напрузі і потужності. Запропонований перетворювач напруги може виконати наступні функції: компенсацію реактивної потужності (функція СТАТКОМа), зв'язок між ланцюгом змінного струму і ланцюгом постійного струму (випрямляч), зв'язок між ланцюгом постійного струму і ланцюгом змінного струму (інвертор), а при використанні групи з двох трифазних перетворювачів запропонованого схемного виконання, можливо виконувати пристрій зв'язку між двома ланцюгами з різними частотами струму і напруги (вставка постійного струму - VtB), а також зв'язок між ланцюгами з різними значеннями номінальної напруги (функція традиційного автотрансформатора). У перетворювачі використана широтно-імпульсна модуляція зі змінною частотою проходження імпульсів, що забезпечує зниження власних втрат перетворювача при змінному навантаженні і різних рівнях напруги в мережі живлення. Розроблено математичну модель трифазного перетворювача типу AC / DC, досліджений режим роботи при зміні навантаження в діапазоні від нуля до номінального значення. Показано, що спектр генерується перетворювачем вищих гармонік струму, знаходяться на рівні допустимого нормативними документами.

**Ключові слова:** FACTS технологія, широтно-імпульсна модуляція, змінна частота, двонаправлена передача потужності.

Получено 30.03.2018



**Берзан Владимир Петрович**, доктор хабилитат технических наук, зам.директора по науке Института энергетики Академии наук Молдовы. Ул. Академическая, 5, МД2028, Кишинэу, Республика Молдова, E-mail: berzan@ie.asm.md, тел. +373 22 735384

**Vladimir Berzan**, Dr. of Science, Deputy Director for Science of the Institute of Power Engineering of the Academy of Sciences of Moldova. 5, Academy str, MD2028, Chisinau, Republic of Moldova, E-mail: berzan@ie.asm.md, тел. +373 22 735384

**ORCID ID:** 0000-0001-7645-7304



**Ермураки Юрий Васильевич**, научный сотрудник Института энергетики Академии наук Молдовы. Ул. Академическая, 5, МД2028, Кишинэу, Республика Молдова, E-mail: ermurachi.iurie@ie.asm.md, тел. +373 22 735384

**Iuri Ermurachi**, a researcher at the Institute of Energy of the Academy of Sciences of Moldova. 5, Academy str., MD2028, Chisinau, Republic of Moldova, E-mail: ermurachi.iurie@ie.asm.md, tel. +373 22 735384

**ORCID ID:** 0000-0002-5270-6553



**Постолатий Виталий Михайлович**, доктор хабилитат технических наук, академик, заведующий лабораторией управляемые линии электропередачи Института энергетики Академии наук Молдовы. Ул. Академическая, 5, МД 2028, Кишинэу, Республика Молдова, E-mail: vpostolati@rambler.ru, тел. +373 22-735388

**Postolatiy Vitaliy**, doctor habilitat of technical sciences, academician, head of the laboratory controlled power transmission lines of the Institute of Power Engineering the Academy of Sciences of Moldova. 5, Academy str., MD 2028, Chisinau, Republic of Moldova, E-mail: vpostolati@rambler.ru, тел. +373 22-735388

**ORCID ID:** 0000-0001-8709-9493