

УДК 621.314

А.И. Чивенков, И.Г. Крахмалин

## УНИВЕРСАЛЬНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ КАК ОСНОВА ДЛЯ СОГЛАСОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ ИСТОЧНИКОВ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ СЕТИ С ВИЭ

Нижегородский государственный технический университет  
им. Р.Е. Алексеева

В соответствии с Концепцией развития интеллектуальной электроэнергетической системы России с активно-адаптивной сетью одной из важнейших задач современной электроэнергетики является исследование и разработка технологий автоматического управления и регулирования электрических параметров режима взаимодействующих объектов. В статье рассмотрены актуальные вопросы применения нового поколения активного силового оборудования – унифицированных систем управления энергопотоками (объединенный регулятор потоков мощности – ОРПМ). Показано, что параметры выходного напряжения возобновляемых источников энергии могут быть нестабильны. Однако применение современных систем управления адаптивными устройствами силовой электроники (активно-адаптивного универсального преобразователя напряжений на базе ОРПМ) позволяет решить эту проблему. С целью расширения функциональных возможностей и сопряжения параметров разнохарактерных источников питания выполнена модификация типовой схемы трёхфазного инвертора напряжений с нулевым проводом, определены схема силовой части универсального преобразователя и алгоритм его работы. Представлены основы формирования математических и имитационных моделей универсального преобразователя.

**Ключевые слова:** возобновляемые источники энергии, инвертор напряжения, интеллектуальная электрическая сеть, математические модели, объединенный регулятор потоков мощности, универсальный преобразователь, управление потоками энергии.

### 1. Введение

Одной из важнейших задач является исследование и разработка комплекса оборудования для построения интеллектуальной активно-адаптивной сети [1]. Особую актуальность имеет разработка устройств, обеспечивающих согласование разнохарактерных источников питания и их объединение в сети. В первую очередь это касается возобновляемых источников малой энергетики [2-6].

Термин «электропотребление» является весьма упрощенным и не отражает физики электромагнитного взаимодействия объектов генерирования и потребления электроэнергии. С другой стороны, разные аспекты

процесса обмена потоками энергии между источниками и приемниками, как с точки зрения расчетов, так и управления/регулирования, связаны с такими общепринятыми понятиями как активная и реактивная мощность, искажение форм кривых токов и напряжений, несимметрия и др. Соответственно и средства воздействия на один, реже на комплекс параметров, разрабатывались индивидуально – различные устройства компенсации реактивной мощности, силовые фильтры, симметрирующие устройства или, например, фильтро-компенсирующие устройства и прочие. Но несомненно и то, что воздействие, казалось бы, только на один параметр, вызывает изменение, в той или иной степени, всей электромагнитной обстановки по цепи «источник – сеть – приемник» даже в простейшей ее реализации.

Иными словами, желание изменять только один параметр электромагнитного взаимодействия – это очень сильное упрощение. Логично предположить, что более корректно контроль и управление взаимодействием объектов (в простейшем случае «источник – потребитель») следует осуществлять по комплексу параметров, некоторые из которых не являются традиционно принятыми в электроснабжении и управлении сетевым оборудованием. Например, «мощность искажений» или, как иногда упоминают, «электромагнитный мусор», что получается после выделения первой гармоники основной частоты. Наибольшее внимание, судя по опубликованным источникам и данным ОАО «НТЦ электроэнергетики» (ВНИИЭ, г. Москва), уделяется компенсации реактивной мощности и для этого есть веские причины – это эффективный и относительно простой способ решения вопросов регулирования напряжения, снижения потерь мощности и энергии, увеличения пропускной способности линий и силового оборудования. Подтверждением тому служат множество реализованных проектов в этом направлении [7-10]. Каждое решение имеет свои достоинства и недостатки.

Компенсация реактивной мощности весьма распространена и имеет четко обозначенную область применения, однако не может рассматриваться как основной инструмент для решения. До настоящего времени единого универсального решения для массового применения, удовлетворяющего подчас даже противоречивым требованиям, не существовало. Однако на базе обобщения опыта уже имеющихся решений и, в частности, в области компенсации реактивной мощности, статических источников, источников питания различных исполнений с учетом особенностей взаимодействия объектов в сети представляется возможным предложить одно из средств для решения общей задачи.

## II. Материалы и методы

Установившаяся классификация по типу построения преобразователей может быть достаточно просто описана: однофазные/многофазные, одно- и двухтактные, полумостовые/мостовые. Между группами есть перекрестные связи, что позволяет, например, определить преобразователь как многофазный двухтактный мостовой или однофазный однотактный. Их схемы, практическая реализация, достоинства, недостатки и области применения известны. Без потери последовательности изложения авторы опускают описание простейших преобразователей и акцентируют внимание на тех решениях, которые можно рассматривать как конкурирующие.

На сегодняшний момент наиболее удачным, по мнению авторов, следует считать статические компенсаторы на базе тиристорных преобразователей параметров электрической энергии, которые позволяют одновременно решать несколько задач (регулирование и симметрирование напряжений, компенсация реактивной мощности, мощности искажений). Помимо затрат, главным их недостатком считается то, что они являются источниками высших гармонических при реализации плавных способов регулирования напряжения и токов.

Лучшими показателями в этом отношении обладают компенсирующие устройства (КУ) на базе силовых IGBT транзисторов. Силовая часть КУ может быть представлена как преобразователь AC/DC/AC (рис. 1), т.е. как устройство двойного преобразования с промежуточным звеном постоянного тока [11, 12]. В приведённой схеме, инвертор, подключенный посредством трансформатора параллельно питающей сети, выполняет функцию активного выпрямителя, а инвертор, подключенный посредством сериесных трансформаторов в рассечку линии электропитания – функцию генерации реактивной и мощности высших гармонических составляющих тока. Дополнительно данное схемотехническое решение может выполнять функцию фазоповоротного устройства.

Принцип компенсации реактивной мощности основан на генерации реактивной составляющей тока  $I_r$  с противоположным знаком. Аналогичным способом производится компенсация высших составляющих токов, сгенерированных преобразовательными установками потребителей. На рис. 2 приведены временные диаграммы токов четырёх проводной сети с выпрямительной нагрузкой и подключенном компенсаторе искажений.

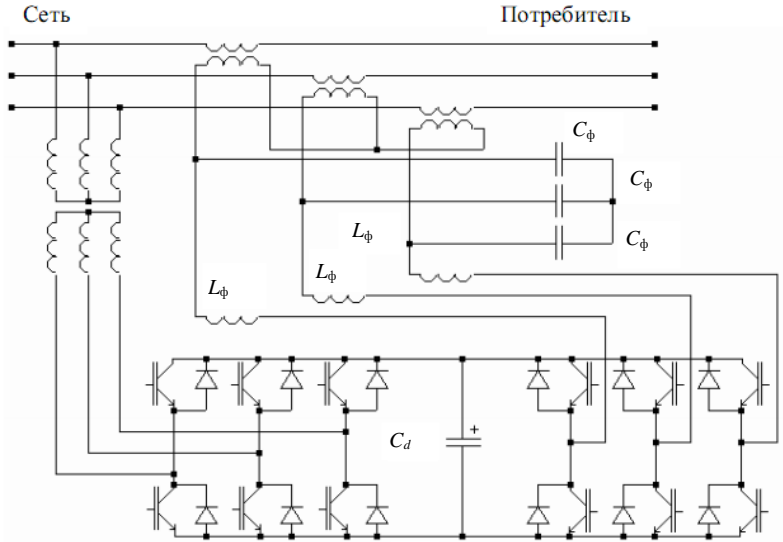


Рис. 1. Компенсирующее устройство параллельно-последовательного типа

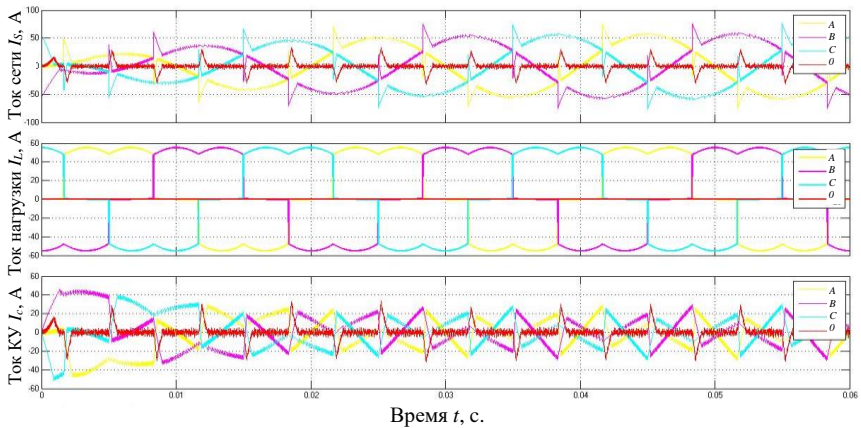


Рис. 2. Временные диаграммы для нелинейного режима нагрузки: сети, нагрузки и КУ

В обоих случаях КУ работает как источник тока с заданными выходными параметрами по отношению к питающей сети.

КУ с использованием IGBT транзисторов это пример нового поколения устройств по сути являющихся комплексными компенсаторами и

более того, что важно, преобразователь AC/DC/AC уже имеет в своей структуре цепи непосредственного преобразования (конвертора) и регулирования параметров напряжения различного характера, что позволяет решать и другие задачи. Например, согласовывать параметры различных источников.

Для приведения постоянных напряжений низковольтных источников средней и большой мощности к требуемому уровню, его стабилизации и/или регулирования целесообразно использование устройств, осуществляющих прямое однокаскадное преобразование постоянного напряжения в постоянное без использования промежуточного инвертирования исходного постоянного напряжения с последующим его выпрямлением. Традиционно область их применения ограничивалась устройствами малой мощности. Однако появление современных мощных IGBT транзисторов и модулей на их основе, позволяют создавать мощные однокаскадные DC/DC-конвертеры.

Таким образом, на базе аналогичных КУ и преобразователей можно разработать универсальное устройство для решения задач интеграции возобновляемых источников энергии в общепромышленную сеть электропитания. Это полностью вписывается в Концепцию интеллектуальной энергосистемы [1]. Для поставленной задачи требуется многофазный преобразователь. В качестве примера рассмотрим более подробно классический повышающий шестиканальный преобразователь параллельного типа [13]. Он представляет собой трехфазный мостовой инвертор напряжения, работающий в режиме активного выпрямителя, с дозирующими катушками индуктивности в цепи питания переменного тока (рис. 3) и обеспечивающий заряд емкостного накопителя до напряжения, превышающего амплитуду линейного напряжения сети. Причем, заряд осуществляется за два такта работы. Первый такт осуществляется при условии предварительного заряда конденсатора через обратные диоды ключей. Процесс накопления энергии индукторами можно описать уравнениями:

$$u_{ij}(t) = i_i(t) \cdot R_i + L_i \frac{di_i(t)}{dt} - \frac{1}{C} \int i_j(t) dt + L_j \frac{di_j(t)}{dt} + i_j(t) \cdot R_j; \quad (1)$$

$$\frac{1}{C} \int i_j(t) dt = i_i(t) \cdot R_i + L_i \frac{di_i(t)}{dt} + L_j \frac{di_j(t)}{dt} + i_j(t) \cdot R_j - u_{ij}(t), \quad (2)$$

где  $i, j$  – фазы сети ( $i - A, B, C; j - B, C, A$ );  $C$  – емкость накопительного конденсатора;  $i_j(t)$  – мгновенное фазного тока;  $R_i, R_j$  – активное сопротивление индуктора соответствующей фазы;  $L_i, L_j$  – индуктивность индуктора соответствующей фазы;  $u_{ij}(t)$  – соответствующее линейное сетевое напряжение.

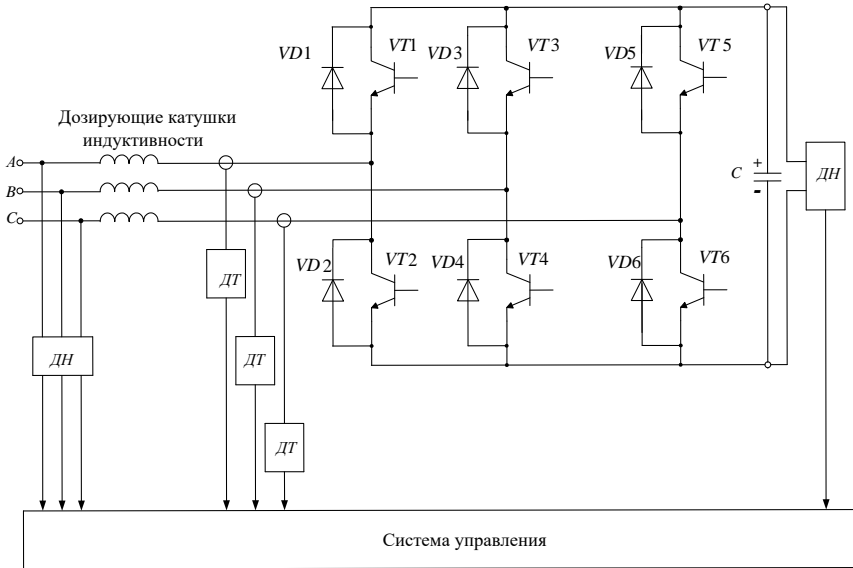


Рис. 3. Трехфазный мостовой инвертор напряжения

Процесс отдачи энергии индукторами описывается как:

$$u_{ij}(t) = i_i(t) \cdot R_i - L_i \frac{di_i(t)}{dt} + \frac{1}{C} \int i_j(t) dt - L_j \frac{di_j(t)}{dt} + i_j(t) \cdot R_j; \quad (3)$$

$$\frac{1}{C} \int i_j(t) dt = u_{ij}(t) + L_i \frac{di_i(t)}{dt} + L_j \frac{di_j(t)}{dt} - i_j(t) \cdot R_j - i_i(t) \cdot R_i. \quad (4)$$

За эти два такта в конденсаторе увеличивается запасенная энергия на величину:

$$\Delta W_c = C \cdot \left( U_c \cdot \Delta U_c + \frac{1}{2} \cdot \Delta U_c^2 \right), \quad (5)$$

где  $\Delta U_c$  – приращение напряжения на обкладках конденсатора.

В данном устройстве применен принцип накопления энергии фазных токов, при этом функциональная зависимость напряжения емкости от времени  $u_c(t)$  близка к гиперболе. Заданная амплитуда токов фаз определяет темп роста  $u_c(t)$ . В этом случае максимально возможное напряжение накопительного конденсатора, а также максимальная скорость накопления

энергии, определяются допустимыми параметрами использованных элементов схемы.

Анализ существующих схем преобразователей однозначно подтверждает, что в основу для реализации поставленной задачи может быть положено решение, представленное на рис 3.

### III. Расширение функциональности типового трёхфазного инвертора напряжения

На базе трёхфазного мостового инвертора напряжения авторами предложено построение шестиканального преобразователя постоянного тока, модифицированного путем введения токовой развязки катодных и анодных цепей обратных диодов и общих узлов соединения коллекторов и эмиттеров *IGBT* [14]. Схема преобразователя представлена на рис. 4.

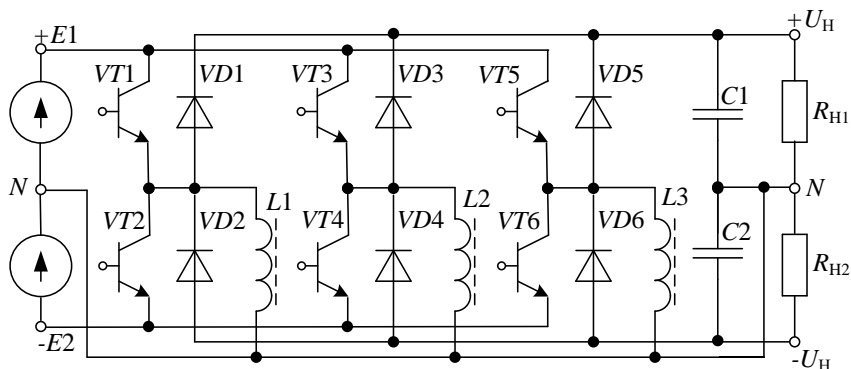


Рис. 4. Структурная схема шестизвенного DC/DC преобразователя

Отличительными особенностями предложенного преобразователя являются: обеспечение постоянства потребления электроэнергии от источника питания; лучшее использование сглаживающих фильтров; равномерное распределение мощности между модулями; высокий КПД преобразования и надежность функционирования устройства в системе электропитания [15].

Последовательность трансформации схемы преобразователя при изменении проводящего состояния полупроводниковых элементов структуры показана на рис. 5.

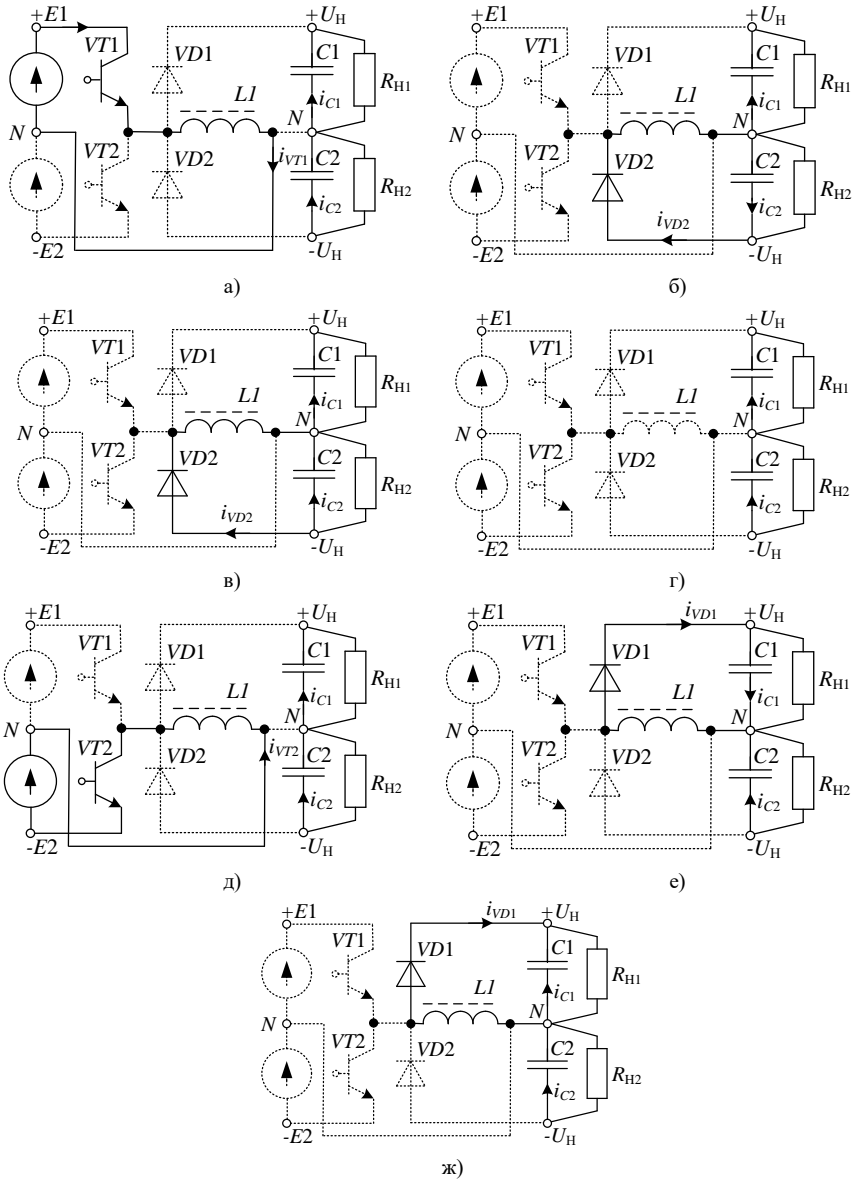


Рис. 5. Последовательность формирования цепей преобразователя напряжения



Цепь заряда дозирующей катушки индуктивности  $L1$  формируется за счет отпирания транзистора  $VT1$ , период работы которого составляет величину, обратную частоте его переключения (рис. 6). За время его открытого состояния  $t_1$  в дозирующей катушке накопится энергия  $W_3$ , которая при условии линейного изменения тока заряда может быть описана выражениями:

$$W_3 = U_n \cdot I_{cp} \cdot t_3; \quad (6)$$

$$U_n = L \frac{di_3}{dt}; \quad (7)$$

$$\frac{di_3}{dt} = \frac{U_n}{L}; \quad (8)$$

$$W_3 = \frac{2 \cdot U_n^2 \cdot \gamma^2}{L \cdot f^2}, \quad (9)$$

где  $U_n$  – напряжение источника питания,  $I_{cp}$  – среднее значения тока заряда дозирующей индуктивности,  $t_3$  – время заряда,  $L$  – индуктивность дозирующей катушки,  $f$  – частота переключения транзистора,  $\gamma = 2t_1/T$  – коэффициент заполнения импульсов.

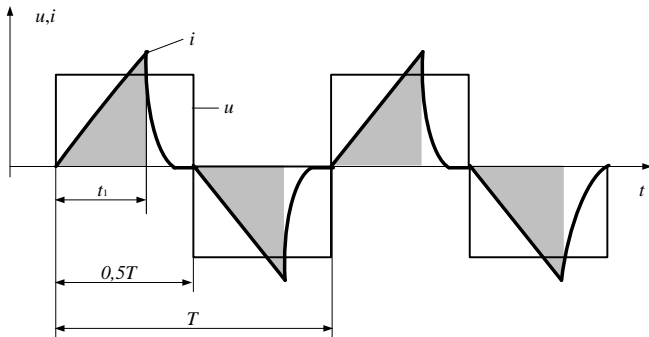


Рис. 6. Диаграммы токов и напряжений дозирующего дросселя

При запираии транзистора  $VT1$  энергия, накопленная дозирующей катушкой, передается в конденсатор емкостного накопителя по цепи  $L1$ ,  $VD2$ ,  $C2$ . Учитывая, что  $W_3 = W_p = \Delta W_c$ , величина изменения напряжения конденсатора может быть определена из выражения:

$$\Delta W_c = \frac{\Delta U_c^2 \cdot C}{2}, \quad (10)$$

где  $\Delta W_c$  – изменение энергии конденсатора;  $W_3$  – энергия, накопленная дозирующей катушкой за время заряда;  $W_p$  – энергия, отданная дозирующей катушкой за время разряда.

Изменение напряжения на конденсаторе:

$$\Delta U_c = \frac{2 \cdot U_n \cdot \gamma}{f} \cdot \sqrt{\frac{1}{L \cdot C}} = \sqrt{\frac{2 \cdot W_3}{C}}, \quad (11)$$

где  $\Delta U_c$  – величина дозированного изменения напряжения конденсатора.

При работе транзистора  $VT2$  в другом полупериоде  $L1$  перемагничивается в обратном направлении, что позволяет более эффективно использовать катушки индуктивности, так как исключается постоянная составляющая тока подмагничивания. Аналогичные процессы происходят при работе остальных пяти каналов.

Единая частота преобразования и порядок переключения транзисторных ключей определяются общим для всех модулей задающим генератором. Схема управления обеспечивает синхронную работу модулей с фазовым сдвигом  $1/6$  рабочего периода. Обязательным условием является то, что время открытого состояния транзисторов не может превышать значения  $0,5 \cdot T$ , так как в противном случае будет протекать ток сквозного короткого замыкания двух модулей, работающих в противофазе.

При увеличении периода работы ключа (уменьшении частоты) время его открытого состояния увеличивается ( $\gamma = \text{const}$ ), что приводит к пропорциональному увеличению тока транзистора в момент его записания. В реальной физической установке время открытого состояния транзистора будет ограничено его максимально допустимым током  $I_{\text{max доп}}$ . Это означает, что при дальнейшем снижении частоты  $\gamma$  будет пропорционально уменьшаться, а, следовательно, и коэффициент преобразования тоже. Зависимость  $f_{\text{min}}$  от максимально допустимого тока транзистора может быть определена из:

$$\frac{di}{dt} = \frac{U_n}{L}; \quad (12)$$

$$I_{\text{max доп}} = \frac{U_n}{L} \cdot t_1; \quad (13)$$

$$f_{\text{min}} = \frac{U_n \cdot \gamma}{L \cdot I_{\text{max доп}}}. \quad (14)$$

Исследование работы модели шестиканального ИП на активностную нагрузку в среде *MATLAB/Simulink* позволило получить зави-

симось коэффициента преобразования  $k = U_{н}/U_{п}$  от частоты при установленных значениях  $\gamma=0,7$  ( $f > f_{min}$ ),  $U_{п} = 220\text{В}$ ,  $L = 300\text{ мкГн}$ ,  $C = 100\text{ мкФ}$ ,  $I_{max\ доп} = 200\text{А}$ , представленную на рис. 7.

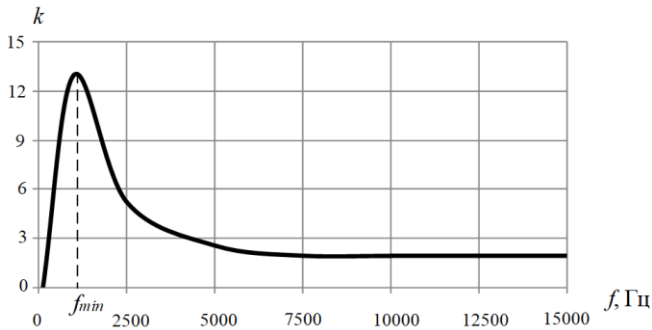


Рис. 7. Зависимость коэффициента преобразования от частоты

Проведенные исследования показали реальную возможность получения на основе однокаскадного преобразователя постоянного напряжения коэффициента преобразования больше 10, что позволило сформировать входной блок универсального преобразователя, обеспечивающий работу в режиме шестиканального конвертора постоянного напряжения (рис. 8).

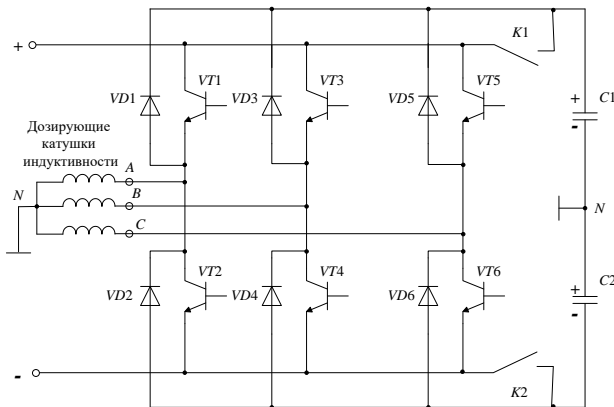


Рис. 8. Структурная схема базового блока универсального преобразователя

#### IV. Заключение

Введение в схему трёхфазного инвертора напряжения дополнительных ключей  $K1$ ,  $K2$  и объединение дозирующих катушек индуктивности без изменения их параметров позволяют сформировать структурную схему универсального повышающего преобразователя напряжений (рис. 8). Ис-

пользование в качестве базового модуля однокаскадного инвертирующего преобразователя позволило модифицировать схему трехфазного инвертора напряжения, обеспечить подключение его входных цепей к источникам постоянного тока и расширить функциональные возможности. В данном устройстве реализуется одно из достоинств, а именно – независимость параметров токов дозирующих и регулирующих элементов от величины сопротивления и токов нагрузки.

Заменяя неуправляемые вентили в схеме, приведенной на рис. 8, на управляемые – тиристоры, можно получить преобразователь, не только повышающий, но и понижающий напряжение относительно напряжения источника питания.

© Чивенков А.И., 2018

© Крахмалин И.Г., 2018

### Библиографический список

- [1] Основные положения Концепции интеллектуальной энергосистемы с активно-адаптивной сетью, 2012. – 51 с. [Электронный ресурс] // Режим доступа: [http://www.fsk-ees.ru/upload/docs/ies\\_aas.pdf](http://www.fsk-ees.ru/upload/docs/ies_aas.pdf) (Дата обращения 01.03.2018).
- [2] Амерханов Р.А. Оптимизация сельскохозяйственных энергетических установок с использованием возобновляемых видов энергии. М.: Колос-Пресс, 2003. – 532 с.
- [3] Виллемс П. Современное состояние и перспективы развития возобновляемых источников энергии в России // Энергетический вестник. 2008. №2. С. 30-39.
- [4] Иванова И.Ю., Попов С.П., Тугузова Т.Ф. Развитие малой энергетики с вовлечением возобновляемых источников энергии // ЭнергоРынок. 2005. № 5. С. 922-928.
- [5] Шейндлин А.Е. О целевом видении стратегии развития электроэнергетики России на период до 2030 г. М.: ОИВТ РАН, 2007.
- [6] Пейсахович В.Я. Роль малой энергетики в решении проблем энергетического обеспечения потребителей // ЭнергоРынок. 2005. № 5. С. 24-29.
- [7] Змиева К.А. Применение автоматических компенсаторов реактивной мощности для повышения энергоэффективности управления электроприводом металлообрабатывающих станков // Электротехника. 2009. №11. С. 26-32.
- [8] Компенсация реактивной мощности и гармонических искажений в электрических сетях промышленных предприятий, Компания Эн Эйч Инжиниринг [Электронный ресурс] // Режим доступа: [http://www.nh-engineering.ru/industry\\_detail.aspx?id=66](http://www.nh-engineering.ru/industry_detail.aspx?id=66) (Дата обращения 01.03.2018).
- [9] Кочкин В.И., Нечаев О.П. Применение статических компенсаторов реактивной мощности в электрических сетях энергосистем и предприятий. М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2002. – 248 с.
- [10] Параллельный статический компенсатор [Электронный ресурс] // Режим доступа: <http://leg.co.ua/info/podstancii/parallelnyy-staticheskiy-kompensator.html> (Дата обращения 01.03.2018).

- [11] Соснина Е.Н., Чивенков А.И. Вопросы сопряжения параметров источников малой распределенной энергетики // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2012. №2. С.158-163.
- [12] Чивенков А.И. Структурный анализ схем устройств сопряжения параметров электрической энергии // В трудах VIII Всерос. науч.-техн. конф. ДНДС-2009, 2009, Чебоксары, Россия. С. 319-328.
- [13] Мещеряков В.Н., Коваль А.А. Устройство для заряда накопительного конденсатора, Пат. 2279748 РФ, заявл. 09.03.05; опубл. 10.07.06. – Бюл. №19.
- [14] Чивенков А.И., Гребенщиков В.И., Михайличенко Е.А., Соснина Е.Н., Шалухо А.В. Устройство заряда накопительного конденсатора, Пат. 2503113 РФ, заявл. 18.06.12; опубл. 27.12.13. – Бюл. №36.
- [15] Чивенков А.И., Гребенщиков В.И., Антропов А.П., Михайличенко Е.А. Расширение функциональных возможностей инвертора напряжения систем интеграции возобновляемых источников энергии и промышленной сети // Инженерный вестник Дона. 2013. №1(24). С. 93.

**A.I. Chivenkov<sup>1</sup>, I.G. Krakhmalin<sup>2</sup>**

## **UNIVERSAL CONVERTER AS BASIS FOR PARAMETERS HARMONIZATION OF DISTRIBUTED NETWORKS WITH RENEWABLE ENERGY SOURCES**

<sup>1</sup> Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev

**Abstract.** In accordance with the Concept for the development of the intelligent electric power system of Russia with an active-adaptive network, one of the most important tasks of modern electric power industry is the research and development of technologies for automatic control and electrical parameters regulation of the mode of interacting objects. The issues of application of the new generation of active power equipment - unified power flow controller (UPFC) are considered. It is shown that output voltage parameters of renewable energy sources can be unstable. However, the use of modern control systems for power electronics adaptive devices (active-adaptive universal voltage converter based on UPFC structure) makes it possible to solve this problem. In order to expand the functionality and to couple parameters of different types of power sources, a modification of the typical three-phase voltage inverter with zero conductor has been performed. The scheme of power unit of the universal converter and a algorithm of its operation are determined. The foundations of mathematical and simulation models formation of the universal converter are presented.

**Keywords:** intelligent electrical network, inverter, mathematical models, power flow control, renewable energy sources, unified power flow controller, universal converter.

## References

- [1] The main provisions of the concept of an intelligent power system with an actively-adaptive network, 2012. [Online]. Available at: [http://www.fsk-ees.ru/upload/docs/ies\\_aas.pdf](http://www.fsk-ees.ru/upload/docs/ies_aas.pdf).
- [2] R.A. Amerkhanov, Optimization of agricultural power plants using renewable energy types. Moscow: Kolos-Press, 2003.
- [3] P. Willems, "Renewable energy sources: current situation and development prospects", Energy Bulletin, no. 2, pp. 26-34, Oct.-Nov. 2008.
- [4] I.Y. Ivanova, S. P. Popov and T. F. Tuguzova. Development of small-scale energy with the involvement of renewable energy sources // EnergoRynok, no. 5, pp. 922-928, 2005.
- [5] A.E. Sheindlin. On the target vision of the strategy for the development of the Russian electric power industry for the period up to 2030. Moscow: JIHT RAS, 2007.
- [6] V.Y. Peisakhovich. The role of small-scale power engineering in solving problems of power supply for consumers // EnergoRynok, no. 5, pp. 24-29, 2005.
- [7] K.A. Zmieva. Application of automatic reactive power compensators to improve the energy efficiency of electric drive control of metal working machines // Electrical Engineering, no. 11, pp. 26-32, Nov. 2009.
- [8] Compensation of reactive power and harmonic distortion in electrical networks of industrial enterprises, NH Engineering Company [Online]. Available at: [http://www.nh-engineering.ru/industry\\_detail.aspx?id=66](http://www.nh-engineering.ru/industry_detail.aspx?id=66).
- [9] V.I. Kochkin and O.P. Nechaev. Application of static compensators of reactive power in electrical networks of power systems and enterprises. Moscow: NC ENAS, 2002.
- [10] Parallel static compensator. [Online]. Available at: <http://leg.co.ua/info/podstancii/parallelnyy-staticheskiy-kompensator.html>. [Accessed: Sep. 12, 2018].
- [11] E.N. Sosnina and A.I. Chivenkov. The questions of interface of parameters of sources the small distributed power // Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov, no. 2, pp. 158-163, 2012.
- [12] A.I. Chivenkov. Structural analysis of circuits of devices for conjugation of electric energy parameters // in proc. VIII All-Russian scienc. and tech. conf. DDDS-2009, 2009, Cheboksary, Russia, pp. 319-328.
- [13] V.N. Meshcheryakov and A. A. Koval. Device for charging the storage capacitor // R. F. Patent 2279748, July 10, 2006.
- [14] A.I. Chivenkov, V.I. Grebenshchikov, E. A. Mikhaylichenko, E. N. Sosnina and A. V. Shalukho. Charging device for capacitor storage. R. F. Patent 2503113, Dec. 27, 2013.
- [15] A.Y. Chivenkov, V.Y. Grebenshchikov, A.P. Antropov and E.A. Mihaylichenko, "Enhancing the functionality of the inverter voltage systems interfacing renewable energy and industrial network". [Online], Engineering journal of Don, no. 1(24), p. 93, 2013. Available at: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2013/1564>.