

УДК 621.314.27

*к.т.н. Кухарев А. Л.  
(СУНИГОТ УИПА, г. Стаханов, Украина,  
alex.kuharev@mail.ru.)*

## **РАЗРАБОТКА И ИСПЫТАНИЕ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧАСТОТЫ**

*Наведені результати розробки та дослідження високовольтного перетворювача частоти каскадного типу для електроприводу напругою 6 кВ потужністю 2 МВт. Обґрунтована необхідність та запропонована схема для удосконалення байпасного кола вентильного блоку.*

***Ключові слова:** високовольтний багаторівневий перетворювач, байпасне коло, теплові розрахунки, навантажувальні випробування.*

*Приведены результаты разработки и исследований высоковольтного преобразователя частоты каскадного типа для электропривода напряжением 6 кВ мощностью 2 МВт. Обоснована необходимость и предложена схема для усовершенствования байпасной цепи вентильной ячейки.*

***Ключевые слова:** высоковольтный многоуровневый преобразователь, байпасная цепь, тепловые расчеты, нагрузочные испытания.*

**Постановка проблемы.** На современном этапе проектирование и эксплуатация высоковольтных электроприводов неразрывно связаны с требованиями повышения их эффективности функционирования, что может быть достигнуто за счет обеспечения плавного регулирования частоты вращения электродвигателей. Для этого электроприводы, как правило, оснащаются высоковольтными преобразователями частоты (ВПЧ). В настоящее время существуют несколько топологий построения ВПЧ, наиболее перспективными из которых являются преобразователи, выполненные на базе многоуровневых автономных инверторов напряжения, которые наряду с делением напряжений на последовательно включенных полупроводниковых приборах обеспечивают форму выходного напряжения, приближающуюся к синусоиде [1–3].

**Анализ последних исследований и публикаций.** Классификация схем и принципов построения многоуровневых ВПЧ приведена в [1]. Из этих схем следует выделить многоуровневую каскадную схему, выполненную на основе последовательного соединения унифицированных вентильных ячеек, питающихся от входного многообмоточного транс-

форматора [1-4]. Главными преимуществами данной схемы являются:

- достаточная простота реализации схемотехнических, алгоритмических и конструктивных принципов построения ВПЧ;
- возможность применения в вентильных ячейках байпасной цепи, обеспечивающей при каких-либо внутренних повреждениях ячейки шунтирование ее выходных выводов; таким образом, обеспечивается вывод поврежденной ячейки из работы при непрерывном протекании тока нагрузки;
- применение унифицированных вентильных ячеек, а также возможность их использования на различные уровни выходного напряжения.

Данные схемы применяются в преобразователях частоты зарубежных компаний Mitsubishi, Robicon, Электротекс и др. [1-3]. В Украине начала выпуск опытных образцов таких преобразователей корпорация Триол (г. Харьков), в разработке и испытаниях которых участвовал автор данной статьи [4, 5].

**Целью данной статьи** является обобщение результатов разработки и испытаний ВПЧ для асинхронного электропривода напряжением 6 кВ мощностью 2000 кВт.

#### **Материалы и результаты исследований.**

На рисунке 1 приведена функциональная схема разработанного каскадного ВПЧ, а на рисунке 2 функциональная схема одной из вентильных ячеек [4, 5]. ВПЧ содержит многообмоточный трансформатор 1 с первичной обмоткой 2 и со вторичными обмотками 3–11, которые соединены по схеме «треугольник-авто» для обеспечения фазового сдвига трансформируемого напряжения. Вентильные ячейки А1...А6, В1...В6, С1...С6 входными выводами а, б, с подключены к соответствующим выводам вторичных обмоток 3–11 трансформатора 1, а выходными выводами соединяются последовательно. Управление вентильными ячейками выполняется основным блоком управления 21, который соединяется с локальными блоками управления каждой вентильной ячейки оптоволоконными кабелями.

Вентильные ячейки данного ВПЧ проектировались таким образом, чтобы напряжение в звене постоянного тока  $U_d$  составляло 1000 В. При работе ВПЧ выходное напряжение ячейки регулируется в диапазоне от  $-U_d$  до  $+U_d$  с помощью широтно-импульсной модуляции. Таким образом, максимальный уровень выходного напряжения ВПЧ определяется суммой напряжений  $U_d$  работающих в фазе вентильных ячеек (рисунки 1.б, 1.с). Следует отметить, что при проектировании ВПЧ рекомендуется некоторый запас по напряжению, чтобы обеспечить нормальное функционирование электропривода при выходе из строя части ячеек [3]. Как видно из рисунка 1, в данном ВПЧ для выходного линей-

ного напряжения 6 кВ используется 18 вентиляльных ячеек, устанавливаемых по 6 ячеек в каждой фазе, причем 5 работающих ячеек в каждой фазе достаточно для обеспечения полной выходной мощности электропривода. При повреждении двух и более вентиляльных ячеек в каждой фазе система управления ВПЧ автоматически снижает частоту и соответственно мощность электропривода до уровня, при котором значение выходного тока будет находиться в допустимых пределах.

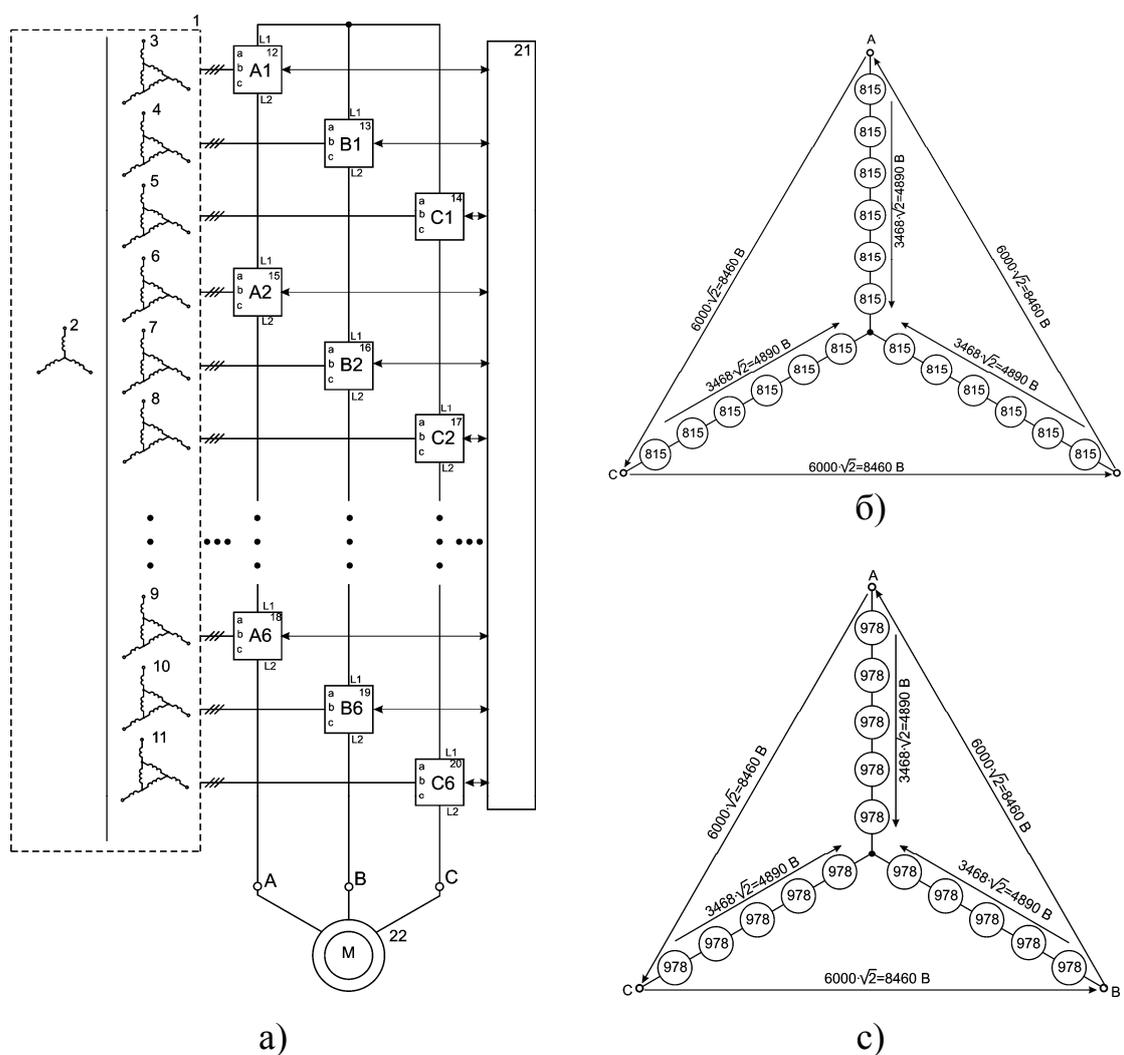


Рисунок 1 – Принцип построения каскадного ВПЧ:

- а)– функциональная схема каскадного ВПЧ; б)– формирование выходного напряжения ВПЧ при работе шести ячеек в фазе;
- с)– формирование выходного напряжения ВПЧ при работе пяти ячеек в фазе

Силовая схема вентиляльной ячейки включает входные предохранители 23–25, неуправляемый мостовой выпрямитель, выполненный на шести диодах 29–34, конденсаторное звено 35 и однофазный инвертор в виде управляемого моста, выполненный на четырех IGBT-модулях с

обратными диодами 36–39. Между выходными выводами управляемого моста включена байпасная цепь. В данном варианте байпасная цепь выполнена на базе двух встречно-последовательно соединенных IGBT-модулей с обратными диодами 40, 41.

Очевидно, что обеспечение безаварийной работы каскадного ВПЧ при повреждении одной из вентиляных ячеек, существенно зависит от надежности включения байпасной цепи. Поэтому при разработке ВПЧ нами были проведены дополнительные исследования различных схем байпасных цепей.

На первом этапе были рассмотрены схемы байпаса, выполненные на базе однофазного электромагнитного контактора. Однако, в связи с имеющимися недостатками, присущими механическим контактными системам (дуговой износ контактов, их вибрации и т.д.) данная схема на наш взгляд, менее перспективна.

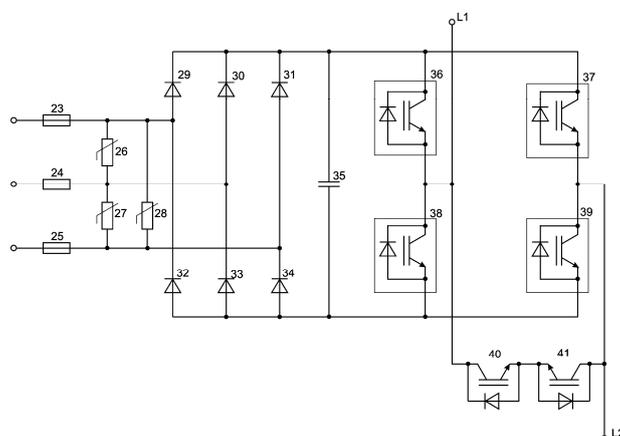


Рисунок 2 – Функциональная схема вентиляной ячейки

Далее исследовалась схема, выполненная на базе однофазного диодного моста и тиристора, включенного в диагонали постоянного напряжения этого моста [3]. Как показали исследования, данная схема требует применения высокочастотных диодных и тиристорных модулей, имеющих низкие значения величин заряда  $Q_{rr}$  и времени  $t_{rr}$ . Применение низкочастотных полупроводниковых модулей приводило к их повреждениям в связи с достаточно большими скоростями  $du/dt$  выходного напряжения вентиляной ячейки. Кроме того, конструкция байпасной цепи состояла из четырех диодных и одного тиристорного модуля и получалась достаточно сложной и громоздкой.

Исходя из вышеизложенного, была предложена и испытана схема байпасной цепи на базе двух встречно-последовательно соединенных IGBT-модулей с обратными диодами (рисунок 2). Проведенные исследования показали приемлемую надежность данной схемы. Компоновка

байпасной цепи была выполнена на двух IGBT-модулях, что позволило, по сравнению с предыдущей схемой, упростить конструкцию вентиляльной ячейки, сократить количество полупроводниковых элементов и соединительных шин и, в целом, снизить стоимость вентиляльной ячейки приблизительно на 10 %.

При проектировании ВПЧ на напряжение 6 кВ и мощность 2000 кВт для вентиляльных ячеек были выбраны полупроводниковые приборы компании SEMIKRON (Германия), которые, на наш взгляд, обладают приемлемым соотношением цена-качество. Выпрямитель был выполнен на диодных модулях SKKD162/22H4, инвертор – на IGBT-модулях SEMiX453GB176HDs, а байпасная цепь – на IGBT-модулях SKM600GA176D. Фильтр постоянного тока был выполнен на основе последовательно-параллельного соединения конденсаторов В43458-5600-450V (EPCOS), суммарная емкость звена 11200 мкФ. В качестве входного трансформатора использовался многообмоточный трансформатор PZSG-2400/6, изготовленный компанией Sunel (Китай). Данный трансформатор содержит одну первичную обмотку и 3 группы вторичных обмоток (по 6 обмоток каждой группе). Фазовый угол выходного напряжения обмоток в группе распределяется в следующем порядке: -25°; -15°; -5°; 5°; 15°; 25°. Таким образом, обмотки трансформатора и выпрямители ячеек реализуют 36-пульсную схему выпрямления переменного напряжения.

Для измерения токов и напряжений использовались датчики, основанные на эффекте Холла (LEM-датчики). Система управления ВПЧ была выполнена с использованием контроллеров TMS320F28335PGFA. Для обеспечения параллельного управления восемнадцатью вентиляльными ячейками основной блок управления также включал микросхему программируемой логики FPGA CYCLON-3 EP3C25Q240. Для отображения и хранения информации использовался промышленный компьютер SIMATIC HMI IPC577C. Таким образом, предложенные схемотехнические решения позволили разработать ВПЧ, обладающий широким диапазоном изменения выходного напряжения (50–6000 В) и частоты (1–120 Гц).

Важнейшим вопросом разработки, во многом определяющим надежность работы ВПЧ, является проведение тепловых расчетов вентиляльных ячеек. Данные расчеты позволяют подтвердить правильность выбора и применения электронных компонентов, а также адекватно спроектировать систему охлаждения. При проведении данных расчетов в качестве главного критерия, как правило, используется температура кристалла в наиболее напряженном режиме работы, предельное значение которой для выбранных полупроводниковых модулей составляет 125 °С. Для проведения данных расчетов нами широко использовалась

программа Semisel (Semikron Semiconductor Selection), разработанная специалистами фирмы SEMIKRON [6]. Эта программа позволяет в интерактивном режиме рассчитывать потери мощности и температуру кристалла для конкретной схемы применения. В качестве примера в таблице 1 приведены результаты теплового расчета инвертора вентиляционной ячейки на номинальный ток 250 А. Инвертор выполнен на четырех IGBT-модулях SEMiX453GB176HDs [5].

Таблица 1 – Результаты тепловых расчетов вентиляционных ячеек

ЗАДАВАЕМЫЕ ПАРАМЕТРЫ		РАССЧИТЫВАЕМЫЕ ПАРАМЕТРЫ	
Входное напряжение, В	1000	Потери мощности: длительный режим (перегрузка):	
Выходное напряжение, В	690	На IGBT-транзисторе:	
Выходной ток, А	250	потери проводимости, Вт	68 (90)
Коэффициент перегрузки,	1,2	потери на переключение, Вт	41 (51)
Номинальная выходная частота, Гц	50	суммарные потери, Вт	109 (141)
Cos φ	0,7	На обратном диоде:	
Частота ШИМ, кГц	1,0	потери проводимости, Вт	16 (20)
Время перегрузки, с	600	потери на переключение, Вт	12 (15)
Минимальное выходное напряжение, В	116	суммарные потери, Вт	28 (35)
Температура окружающей среды, °С	40	Общие потери на радиаторе, Вт	1098 (1408)
Количество параллельных модулей	2	Температура длительный режим (перегрузка)	
Количество модулей на радиаторе, всего	4	Температура радиатора, °С	74 (83)
Типоразмер радиатора	P16_300	Температура корпуса модуля, °С	85 (97)
Охлаждение	воздушное	Температура кристалла транзистора, °С	92 (106)
Скорость обдува воздуха, м <sup>3</sup> /ч	295	Температура кристалла обратного диода, °С	88 (101)

Следующим не менее важным этапом является проектирование системы охлаждения и разработка конструкции ВПЧ. Учитывая зарубежный опыт разработки, конструктивно ВПЧ мощностью более 1000

кВт целесообразно выполнять в виде секционированной структуры, состоящей из нескольких шкафов. Разработанный ВПЧ состоял из шкафа входного трансформатора, шкафа вентиляльных ячеек и шкафа управления. Каждый из шкафов был выполнен в виде напольной металлической конструкции одностороннего обслуживания. Шкафы имели специальные приспособления для электрического соединения между собой.

Система охлаждения разработанного ВПЧ была спроектирована с применением всасывающих центробежных вентиляторов R3G630-AA08-03 мощностью 1,7 кВт каждый. Вентиляторы устанавливались на крыше шкафа входного трансформатора и шкафа вентиляльных ячеек. Таким образом, при работе ВПЧ, в шкафу вентиляльных ячеек холодный воздух поступает через вентиляционные отверстия в дверцах шкафа, проходит через отдельные воздушные каналы каждой вентиляльной ячейки и далее отбрасывается вентилятором на крыше шкафа (рисунок 3). Особенностью разработанной системы охлаждения является реализация программного регулирования производительности вентилятора в зависимости от температуры вентиляльных ячеек. При выборе вентиляторов предварительно проводились тепловые и аэродинамические расчеты всей охлаждающей конструкции с помощью пакета программ Solid Works.

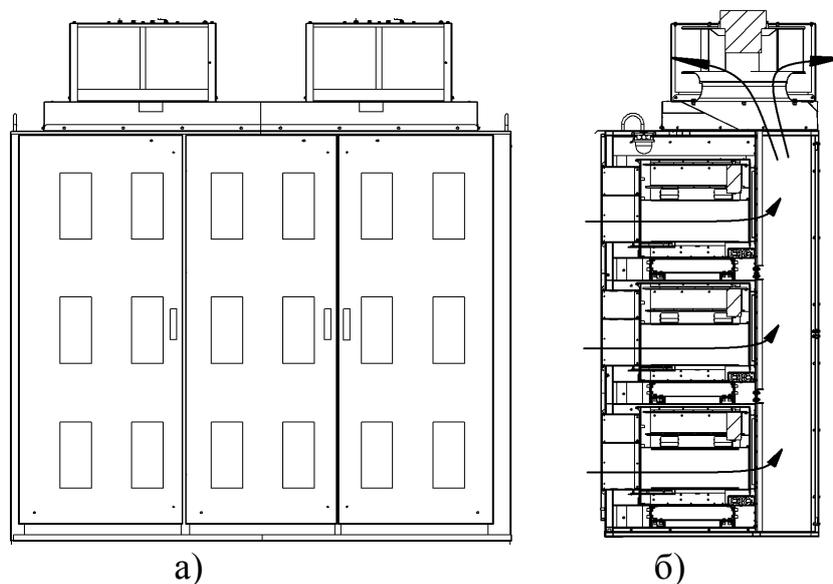


Рисунок 3 – Конструктивный вид шкафа вентиляльных ячеек ВПЧ:  
а) – вид спереди; б) – разрез шкафа

Завершающим этапом разработки является проведение приемосдаточных испытаний преобразователя под номинальной нагрузкой. Испытания разработанного ВПЧ проводились на ТЭЦ-4 (г. Харьков). Номинальная нагрузка на ВПЧ обеспечивалась параллельной работой трех двигателей сетевых насосов А4-400У-4У3 мощностью по 630 кВт и

одного электродвигателя дымососа ДАЗО-2-17-69-8/10У1 мощностью 1000 кВт. В ходе испытаний проводилась проверка основных параметров преобразователя с выполнением измерений входных и выходных токов и напряжений. Также проводилась оценка искажений, вносимых преобразователем в спектр гармоник входного линейного напряжения 6 кВ. При данных испытаниях использовались цифровой осциллограф FLUKE-199В и анализатор качества электроэнергии «Ресурс», подключаемые к силовым цепям через высоковольтный делитель напряжения. Измерения входного и выходного токов выполнялись с помощью токовых клещей, входящих в комплект осциллографа FLUKE-199В. На рисунке 4 приведена одна из осциллограмм выходного напряжения при работе ВПЧ на частоте 40 Гц.

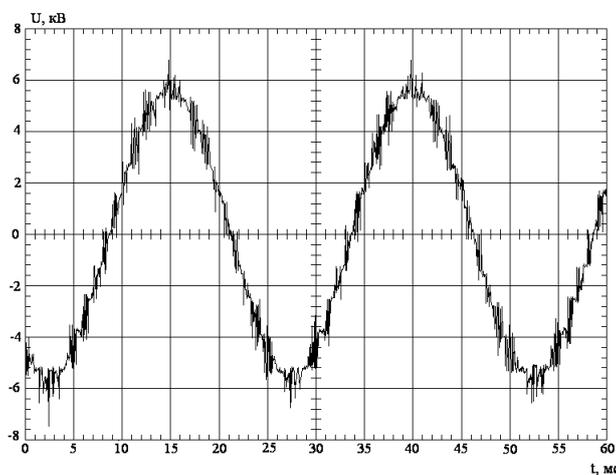


Рисунок 4 – Осциллограмма выходного линейного напряжения ВПЧ при частоте 40 Гц

Как видно из приведенных данных, форма выходного напряжения ВПЧ близка к синусоидальной. Коэффициент искажения синусоидальности составляет приблизительно 5 %.

На рисунке 5 приведены осциллограммы входного и выходного тока ВПЧ. Из осциллограмм видно, что форма токов является практически синусоидальной. Для выходного тока коэффициент искажения составил 0,74 %, а для входного тока 3,94 %. Следует также отметить, что коэффициент мощности нагрузки, измеряемый в выходной цепи ВПЧ находился в диапазоне 0,8-0,83, а коэффициент мощности входного тока составлял 0,96–0,97. Таким образом, одним из преимуществ данного ВПЧ является компенсация реактивной мощности, потребляемой высоковольтными электродвигателями из сети.

Спектр гармоник входного линейного напряжения при работе ВПЧ приведен на рисунке 6. Как показал анализ гармонического состава

ва, коэффициент искажения кривой напряжения и коэффициенты n-й гармонической составляющей напряжения не превышают норм, приведенных в ГОСТ 13109-97 [7].

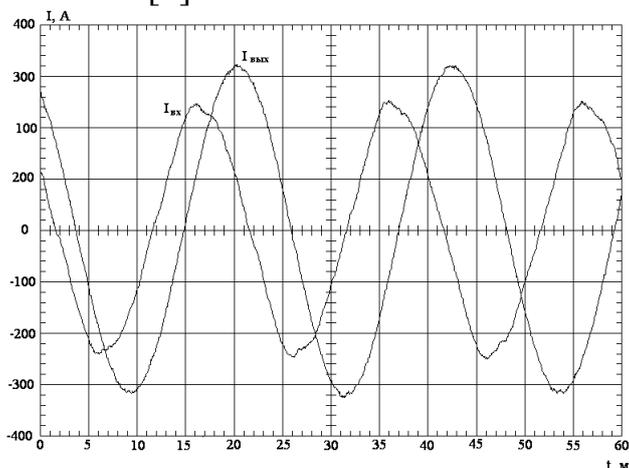


Рисунок 5 – Осциллограммы входного и выходного токов ВПЧ при номинальной нагрузке

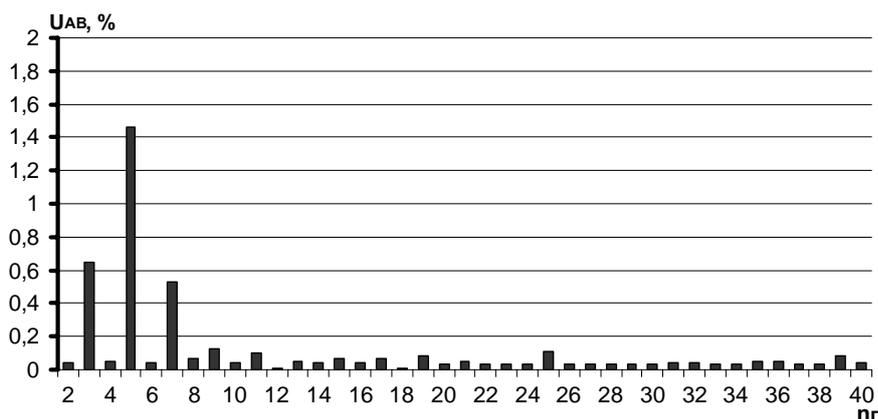


Рисунок 6 – Спектр гармоник входного линейного напряжения

Таким образом, применение ВПЧ с входным многообмоточным трансформатором, обеспечивающим 36-пульсную схему выпрямления, обеспечивает приемлемые показатели качества напряжения.

**Выводы:**

1. Показана перспективность использования современных программных комплексов в процессе проектирования и конструирования преобразователей, что позволяет автоматизировать основные этапы их разработки.
2. Предложенные схемотехнические решения позволили разработать и испытать высоковольтный преобразователь частоты для электропривода напряжением 6 кВ мощностью 2000 кВт. Разработанная схема

байпасной цепи для вентиляционной ячейки, выполненная на базе встречно-последовательно соединенных IGBT-модулей с обратными диодами по сравнению с аналогичными схемами является более надежной и экономичной.

3. На основе проведенных нагрузочных испытаний показано, что многоуровневый ВПЧ имеет приемлемые показатели качества электроэнергии, а также обеспечивает компенсацию реактивной мощности, потребляемой высоковольтными электродвигателями.

### **Библиографический список**

1. Донской Н. Многоуровневые автономные инверторы для электропривода и электроэнергетики / Н. Донской, А. Иванов, В. Матисон, И. Ушаков // *Силовая электроника*. – 2008. – № 1. – С. 43–46.

2. Park Y.M. Design of a Cascaded H-Bridge Multilevel Inverter Based on Power Electronics Building Blocks and Control for High Performance / Young-Min Park, Han-Seong Ryu, Hyun-Won Lee, Myung-Gil Jung, Se-Hyun Lee // *Journal of Power Electronics*. – 2010. – Vol. 10. – №3. – P. 262–269.

3. Пат. 2289191 Россия МПК6 H02M5/453. Устройство для управления преобразователем частоты с многоуровневым инвертором напряжения и способ управления таким преобразователем / Смирнов Д.П., Львов М.Л., Бородин А.А.; Заявители и патентообладатели Смирнов Дмитрий Петрович, Львов Максим Леонидович, Бородин Александр Алексеевич. – №2005130603/09, заявл. 04.10.2005; опубл. 10.12.2006, Бюл. № 34.

4. Пат. 63759 Украина МПК6 H02M5/45, H02H7/12. Частотно-регулируемый высоковольтный электропривод / Кухарев О.Л., Селюков И.И., Заявники та патентовласники Кухарев Олексій Леонідович, Селюков Ігор Іванович. – №u201101206, заявл. 03.02.2011; опубл. 25.10.2011, Бюл. № 20.

5. Пат. 107422 Россия МПК6 H02M5/458. Ячейка высоковольтного многоуровневого преобразователя частоты / Селюков И.И., Шатерный А.В., Кухарев А.Л.; Заявитель и патентообладатель ООО «Триол-нефть». – №2011115847/07, заявл. 22.04.2011; опубл. 10.08.2011, Бюл. № 22.

6. Колпаков А. Программа SemiSel – «скорая помощь» разработчику / А. Колпаков // *Современная электроника*. – 2006. – № 8. – С. 60–66.

7. ГОСТ 13109-97. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. - Введ. 18.06.1999. - К.: Госстандарт Украины, 1999. - 32 с.

*Рекомендована к печати д.т.н., проф. Луциком В.Д.*