

КОРОТКОВ Александр Александрович

**ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫЕ АЛГОРИТМЫ В ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ  
С МНОГОУРОВНЕВЫМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ ЧАСТОТЫ**

Специальность: 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Работа выполнена на кафедре «Электропривод и автоматизация промышленных установок» ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина».

**Научный руководитель**

**Виноградов Анатолий Брониславович,**  
доктор технических наук, доцент

**Официальные оппоненты:**

**Онищенко Георгий Борисович,**  
доктор технических наук, профессор,  
ФГБОУ ВПО «Московский государственный машиностроительный университет», профессор кафедры «Электрические системы»

**Родионов Роман Вячеславович,**  
кандидат технических наук,  
ФГБОУ ВПО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых», доцент кафедры «Мехатроника и электронные системы автомобилей»

**Ведущая организация**

ОАО «ЧЭАЗ» (Чебоксарский электроаппаратный завод), г. Чебоксары

Защита состоится «1» ноября 2013 года в 14<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного совета Д212.064.02 при ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина» по адресу: 153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34, корпус «Б», аудитория 237.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просим направлять по адресу: 153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34, Учёный совет ИГЭУ. Тел.: (4932) 38-57-12, 26-98-61, факс: (4932) 38-57-01, e-mail: [uch\\_sovet@ispu.ru](mailto:uch_sovet@ispu.ru)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Ивановского государственного энергетического университета. Автореферат диссертации размещён на сайте ИГЭУ [www.ispu.ru](http://www.ispu.ru)

Автореферат разослан “27” сентября 2013 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета

доктор технических наук, профессор

Тютиков Владимир Валентинович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы

Развитие любой современной отрасли народного хозяйства, использующей высоковольтное приводное электрооборудование, предполагает повышение эффективности производства и энергосбережение. В большинстве случаев это достигается за счёт перехода к высоковольтному частотно-регулируемому электроприводу (ВЧРП), обеспечивающему эффективное преобразование электроэнергии и регулирование технологических переменных. Повышение энергоэффективности ВЧРП представляется актуальной задачей и решается выбором схемотехнического решения и разработкой на его основе оптимального по энергетическим показателям алгоритма управления высоковольтным преобразователем частоты (ВПЧ).

Значительный вклад в исследование структур и разработку алгоритмов управления ВПЧ внесли российские учёные: Лазарев Г.Б., Шрейнер Р.Т., Онищенко Г.Б., Алтшуллер М.И., Берестов В.М., Колпаков А.И. Необходимо также отметить достижения зарубежных учёных, среди которых: Corzine K.A., Fazel S.S., Gupta A.K., McGrath V.P., McKenzie K.J., Celanovic N. Известно достаточно много различных вариантов силовых схем ВПЧ, среди которых наибольший интерес в плане энергоэффективности представляют высоковольтные многоуровневые преобразователи частоты (ВМПЧ), отличающиеся снижением напряжения, прикладываемого к полупроводниковым вентилям, и повышением качества преобразования энергии. Анализ представленных на рынке ВПЧ российских фирм-производителей показывает, что наиболее распространённым схемотехническим решением является ВМПЧ каскадной структуры с алгоритмом синусоидальной ШИМ. В настоящее время вопросы синтеза энергоэффективных алгоритмов управления ВМПЧ исследованы недостаточно, тогда как именно векторная стратегия ШИМ, по сравнению с альтернативным и широко применяемым методом синусоидальной ШИМ, обладает большим потенциалом оптимизации и энергосбережения.

Важной отличительной особенностью каскадного ВМПЧ является питание ячеек от изолированных вторичных обмоток входного трансформатора. При этом напряжение в звене ячейки определяется состоянием её ключей, общим фазным током преобразователя и не зависит от состояний других ячеек той же фазы. Неэффективное управление может приводить к существенному рассогласованию (небалансу) напряжений в звене ячеек, а также превышению допустимого напряжения в звене отдельной ячейки. Точность регулирования выходных переменных привода напрямую зависит от степени небаланса. Другой особенностью каскадного преобразователя является модульность конструкции, обеспечивающая возможность поддержания работоспособности привода в случае аварийного отключения (шунтирования) ячеек. Решение вопросов компенсации небаланса напряжений и шунтирования аварийных ячеек в рамках стратегии векторного формирования ШИМ каскадного преобразователя частоты позволяет повысить качество регулирования переменных и надёжность высоковольтного электропривода, представляет значительный научно-практический интерес и в литературных источниках рассмотрено в недостаточной степени.

Работа выполнялась в рамках договора №13.G25.31.0060 (от 22 октября 2010 г.) «Разработка и организация серийного производства мощных частотно-регулируемых приводов» между ОАО «ЧЭАЗ» (г. Чебоксары) и Минобрнауки России.

**Целью работы** является разработка, исследование и практическая реализация оптимального по энергопотерям алгоритма векторного формирования ШИМ многоуровневого каскадного преобразователя частоты с функциями компенсации небаланса напряжений и шунтирования аварийных ячеек при работе в составе высоковольтного электропривода.

В соответствии с поставленной целью решаются **следующие задачи**.

1. Провести анализ существующих методов и выбрать рациональные критерии формирования ШИМ многоуровневого каскадного преобразователя в рамках координатной и векторной стратегий управления.

2. Разработать векторный алгоритм ШИМ каскадного преобразователя с минимизацией коммутационных потерь, функциями шунтирования аварийных ячеек и компенсации небаланса входных напряжений.

3. Разработать программный комплекс для исследования статических и динамических режимов работы высоковольтного электропривода, его энергетических характеристик и показателей точности регулирования выходных переменных при различных вариантах ШИМ каскадного преобразователя.

4. Разработать методики и выполнить сравнительный анализ энергоэффективности высоковольтного электропривода на компьютерной модели с разработанным алгоритмом векторной ШИМ и традиционным способом синусоидальной ШИМ.

5. Выполнить исследование внутренней архитектуры и разработать алгоритмы сетевого взаимодействия элементов каскадного преобразователя в процессе работы.

6. Реализовать разработанные алгоритмы формирования ШИМ на макетном и опытном образце каскадного преобразователя и провести лабораторные испытания в составе низковольтной физической модели электропривода.

#### **Научная новизна работы**

1. Предложена методика синтеза алгоритма управления  $n$ -уровневым каскадным преобразователем, построенная в рамках стратегии векторного формирования ШИМ с жестко заданным законом коммутации и обеспечивающая минимизацию коммутационных потерь в силовых элементах ячеек.

2. Разработаны структуры управления, алгоритмы работы и математические модели высоковольтного электропривода, учитывающие реальную конфигурацию силовой схемы каскадного преобразователя, способ формирования ШИМ, параметры трансформатора, силовых ячеек и нагрузки, а также обеспечивающие шунтирование аварийных ячеек и компенсацию небаланса их входных напряжений.

3. Предложена методика оптимизации алгоритмов векторной и синусоидальной ШИМ каскадного преобразователя, позволяющая на основе математического моделирования высоковольтного электропривода и анализа его энергетических характеристик с учётом реальных параметров силовой схемы определить оптимальную частоту ШИМ по потерям энергии и уровню искажения синусоидальности.

4. Выполнен сравнительный анализ энергоэффективности высоковольтного привода с разработанным векторным и традиционным синусоидальным алгоритмами ШИМ на основе математического моделирования, показывающий снижение суммарных потерь в преобразователе при векторном способе ШИМ.

5. Предложена система классификации и символьно-графического обозначения векторов и треугольников диаграммы напряжений многоуровневого преобразователя, отличающаяся универсальностью подхода для любого числа уровней и позволяющая выделять определённые вектора из группы совпадающих, записывая их в установленной последовательности переключения.

#### **Практическая ценность работы**

1. Разработанные структуры и алгоритмы управления многоуровневым каскадным преобразователем частоты могут использоваться при создании высокоэффективных систем управления высоковольтным электроприводом переменного тока.

2. Разработанный комплекс программ имитационного моделирования высоковольтного электропривода позволяет на основе задания параметров силовой схемы каскадного преобразователя, асинхронного двигателя и нагрузки определить работоспособность привода в заданных режимах работы в рамках частотной системы управления, энергоэффективность алгоритмов ШИМ и соответствие качества регулирования требованиям технологического процесса и может использоваться в научных исследованиях и в учебном процессе.

3. Разработанные алгоритмы сетевого взаимодействия главного контроллера и контроллеров ячеек многопроцессорной архитектуры каскадного преобразователя позволяют эффективно организовать информационные потоки обмена данными и распределить задачи управления при реализации алгоритмов синусоидальной и векторной ШИМ в современных системах высоковольтного электропривода.

4. Результаты экспериментальных исследований опытного образца каскадного преобразователя в составе низковольтной физической модели привода показывают возможность практической реализации разработанных методик и алгоритмов векторной ШИМ с использованием комплекса программ имитационного моделирования и могут использоваться при оценке эффективности известных и новых технических решений в области высоковольтного электропривода.

#### **Положения, выносимые на защиту**

1. Методика синтеза, структуры и алгоритмы формирования векторной ШИМ многоуровневого каскадного преобразователя.

2. Методика расчёта оптимальной частоты модуляции векторной ШИМ.

3. Математические модели высоковольтного привода с каскадным многоуровневым преобразователем и алгоритмами векторного формирования ШИМ.

#### **Соответствие диссертации паспорту специальности**

Диссертация соответствует паспорту специальности 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы:

**в части формулы специальности** – «... исследования по общим закономерностям преобразования, ... и использования электрической энергии, а также принципы

и средства управления объектами, определяющие функциональные свойства действующих или создаваемых электротехнических комплексов и систем промышленного, ... и специального назначения. В рамках научной специальности объектами изучения являются ... электропривода, ... могут рассматриваться как самостоятельные технологические комплексы и должны обеспечивать эффективное и безопасное функционирование ...»;

**в части области исследования** – п. 1: «... изучение системных свойств и связей, физическое, математическое, имитационное и компьютерное моделирование компонентов электротехнических комплексов и систем»; п. 2: «Обоснование совокупности технических, технологических, ... критериев оценки принимаемых решений в области проектирования, создания ... электротехнических комплексов и систем»; п. 3: «Разработка ... электротехнических комплексов и систем, их оптимизация, а также разработка алгоритмов эффективного управления»; п. 4: «Исследование работоспособности и качества функционирования электротехнических комплексов и систем в различных режимах, при разнообразных внешних воздействиях».

**Достоверность и обоснованность** изложенных в диссертации данных и выводов обеспечивается использованием современных информационно-технических средств, применением технологии моделирования для решения основных исследовательских задач, сравнением результатов моделирования с результатами, полученными опытным путем и при использовании общедоступной программы SEMISEL, распространяемой фирмой SEMIKRON – одного из лидеров на рынке силовой электроники.

#### **Личное участие автора**

Автор принимал активное участие в разработке математического аппарата созданных моделей, а так же самостоятельно разрабатывал программы, реализующие модели. Автор разработал структуры и алгоритмы управления каскадным преобразователем в рамках векторной стратегии ШИМ, предложил методики и формулы для компенсации небаланса напряжений ячеек и шунтирования аварийных ячеек. Автором были разработаны математические модели высоковольтного электропривода с каскадным преобразователем и модуляторами векторного и синусоидального алгоритмов ШИМ. Автором предложены методики поиска оптимальной частоты модуляции и сравнительного анализа энергоэффективности различных алгоритмов ШИМ. Автор показал эффект энергосбережения в высоковольтном электроприводе с разработанным векторным алгоритмом ШИМ, выполнив сравнение по предложенной им методике с известным алгоритмом синусоидальной ШИМ. Автором исследована многопроцессорная архитектура каскадного преобразователя и предложены алгоритмы взаимодействия контроллеров. Автор участвовал в написании программ для контроллеров и проводил лабораторные испытания опытного образца высоковольтного каскадного преобразователя.

#### **Апробация работы**

Результаты работы докладывались и обсуждались на Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» (г. Москва, МЭИ, 2011, 2013), Международной научно-

технической конференции «Состояние и перспективы развития электротехнологии» (Бенардосовские чтения, г. Иваново, 2011, 2013), Региональной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Энергия-2011» (г. Иваново, 2011), Международной научно-технической конференции «Силовая электроника и энергоэффективность» (СЭЭ, Крым, г. Алушта, 2012), Международной конференции по автоматизированному электроприводу (АЭП, г. Иваново, 2012).

### **Публикации**

Материалы диссертации нашли отражение в 10 опубликованных работах, в том числе в 2 статьях в ведущих рецензируемых журналах и изданиях (по списку ВАК).

### **Объём и структура работы**

Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав и заключения, списка используемой литературы из 52 наименований и 6 приложений. Количество страниц 174, в том числе рисунков 63, таблиц в тексте 15.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ**

**Во введении** обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи диссертации, научная новизна, практическая значимость полученных результатов, основные положения, выносимые на защиту, обоснована достоверность результатов и дана общая характеристика структуры работы.

**Первая глава** посвящена анализу основных схемотехнических решений и принципов построения ВПЧ, исследованы известные методы и алгоритмы формирования ШИМ ВМПЧ каскадной структуры.

Обобщённая структурная схема ВПЧ с промежуточным звеном постоянного тока/напряжения включает в себя: входной трансформатор, выпрямитель, звено постоянного тока/напряжения, инвертор и выходной фильтр. Известные силовые схемы многоуровневых инверторов напряжения, характеризующиеся снижением напряжения на силовых управляемых ключах, в рамках представленной структуры ВПЧ составляют отдельный класс ВМПЧ. Типовыми схемотехническими решениями многоуровневых инверторов у большинства производителей ВПЧ являются схемы трёхуровневого автономного инвертора напряжения (АИН) с фиксированной нулевой точкой (3L-NPC-VSC), четырёхуровневого АИН с плавающими конденсаторами (4L-FLC-VSC) и многоуровневого каскадного АИН (ML-SCHB-VSC). Сравнительный анализ этих схем выявил преимущества многоуровневой каскадной топологии: низкий уровень гармонических искажений выходного напряжения; модульность конструкции; возможность наращивания мощности добавлением в каждой фазе требуемого числа однотипных низковольтных модулей – ячеек; изолированность низковольтных источников питания ячеек; электромагнитная совместимость (ЭМС) с сетью и приводным двигателем и возможность шунтирования избыточных или аварийных ячеек. Пример силовой схемы пятиуровневого каскадного инвертора показан на рис.1.

В настоящее время известны и широко используются следующие методы ШИМ каскадного ВМПЧ: синусоидальная ШИМ (SPWM) и векторная ШИМ (SVPWM).

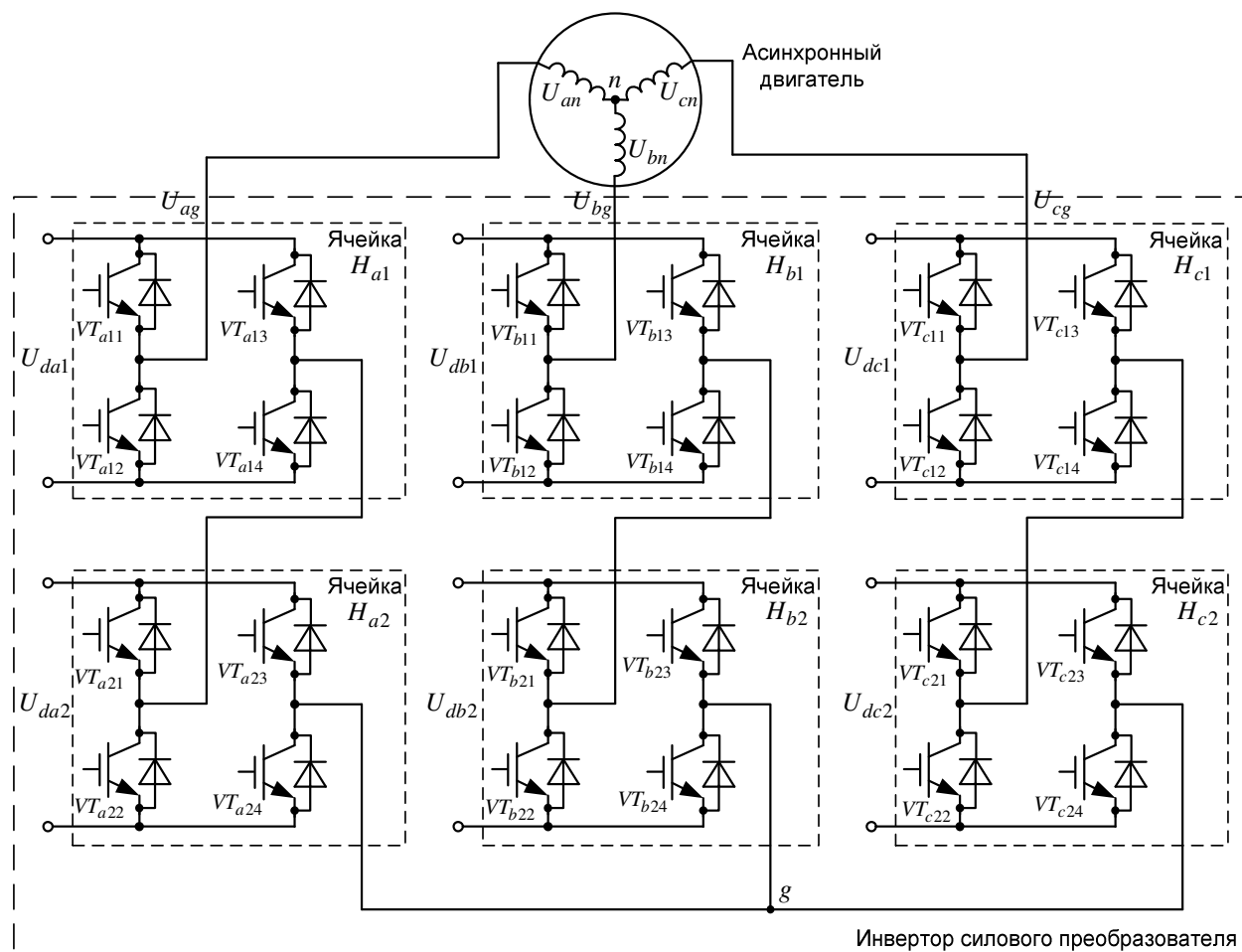


Рис.1. Схема инвертора каскадного 5-уровневого ВМПЧ

Метод SPWM заключается в сравнении управляющих и опорных сигналов. Управляющий сигнал представляет собой желаемый сигнал синусоидальной формы с добавлением составляющей нулевой последовательности (в частном случае,  $1/6$  третьей гармоники). Методы синусоидальной ШИМ подразделяются на методы сдвига по фазе (PSPWM) и смещения по уровню (CDPWM), отличающиеся формированием системы опорных сигналов. Анализ известных методов синусоидальной ШИМ показал, что основным для каскадного ВМПЧ является метод PSPWM, обеспечивающий баланс мощностей, потребляемых ячейками в каждой фазе. При этом частота коммутации ключей составляет  $(12p) \cdot f_0$ , где  $p$  – число ячеек в фазе,  $f_0$  – частота ШИМ.

Алгоритмы пространственно-векторного формирования ШИМ включают в себя две основные задачи: синтез закона модуляции и синтез закона коммутации. Известные алгоритмы в рамках симплексного закона модуляции выделяют три ближайших вектора, образующих на плоскости векторной диаграммы треугольник, и определяют длительности их включения. Векторная диаграмма на примере 5-уровневого каскадного преобразователя в первом секторе с указанием всех комбинаций состояния ключей  $(s_a, s_b, s_c)$ , соответствующих векторам выходного напряжения, представлена на рис.2. Задача синтеза закона коммутации векторной ШИМ ВМПЧ не имеет однозначного решения и основана на задании критериев, определяющих оптимальную последовательность переключения и выбор комбинаций состояния ключей векторов, вклю-



чаемых за цикл ШИМ. К таким критериям относят минимизацию числа коммутаций силовых ключей и снижение отклонения напряжения в звене ячеек от общего среднего значения, рассчитываемого по всем ячейкам.

Для удобства описания последовательностей переключения векторов предложено символьное обозначение групп векторов в вершинах треугольников I и II типов как показано на рис.3,а. Выделить определённый вектор означает указать номер его комбинации состояния ключей в верхнем индексе названия соответствующей группы **I**, **J** или **K**. Так, последовательность коммутации векторов треугольника I типа (рис.3,а) за период «симметричной» ШИМ может быть записана в следующем виде:

$$\mathbf{I}^{(i)} \rightarrow \mathbf{J}^{(i)} \rightarrow \mathbf{K}^{(i)} \rightarrow \mathbf{I}^{(i+1)} \rightarrow \mathbf{I}^{(i+1)} \rightarrow \mathbf{K}^{(i)} \rightarrow \mathbf{J}^{(i)} \rightarrow \mathbf{I}^{(i)}.$$

Во второй главе разработаны методика синтеза алгоритма коммутации и структуры управления многоуровневым каскадным преобразователем в рамках векторного формирования ШИМ с функциями компенсации небаланса входных напряжений ячеек и шунтирования аварийных ячеек в процессе работы.

В основу разработанного алгоритма управления каскадным ВМГЧ положена известная методика расчёта длительностей включения векторов в рамках симплексного закона модуляции векторной ШИМ. Данная методика определяет номер сектора  $S_i$  векторной диаграммы (рис.2), а также тип и номер треугольника, в котором расположена вершина заданного вектора. Рассматривая найденный треугольник как первый сектор условно выделенной диаграммы напряжений, соответствующей двухуровнево-му преобразователю, алгоритм вычисляет проекции вершины заданного вектора в рамках новой системы координат и определяет длительности включения векторов **I**, **J**, **K** в вершинах треугольника по известным формулам двухуровневого АИН.

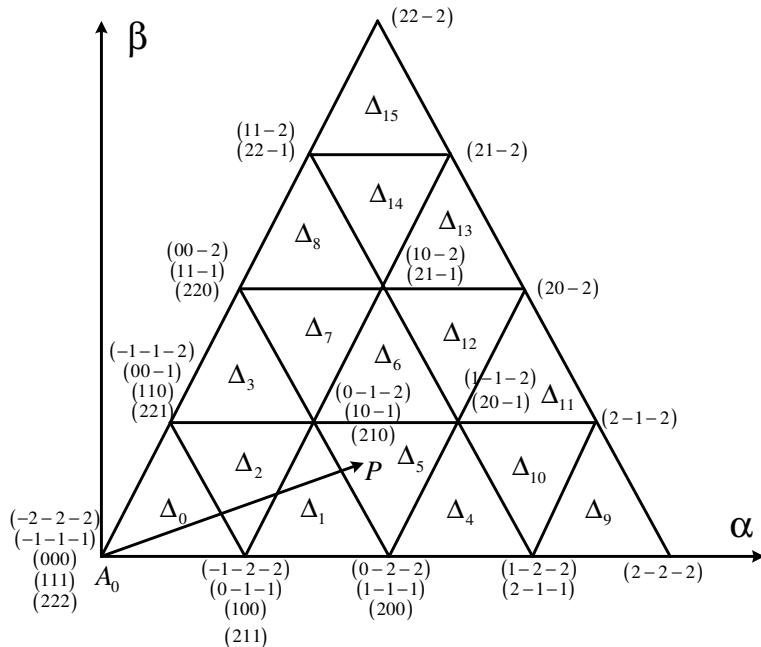


Рис.2. Векторная диаграмма напряжений пятиуровневого каскадного преобразователя в первом секторе

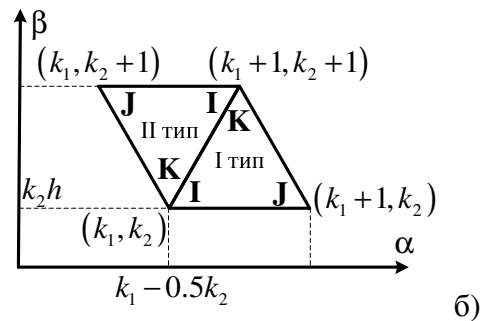
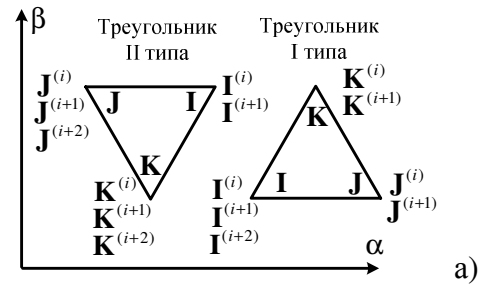


Рис.3. Обозначение векторов в вершинах треугольников (а) и расчёт их проекций (б)

Как показано на рис.3,б, для каждого вектора в вершинах треугольника I или II типа предложено ввести набор коэффициентов  $(k_i, k_j)$ , значения которых составляют

коэффициенты  $k_1$  и  $k_2$ , определяющие проекции этих векторов и рассчитываемые по известным формулам:

$$k_1 = \text{int}(u_\alpha + u_\beta / \sqrt{3}), k_2 = \text{int}(u_\beta / h), \quad (1)$$

где  $u_\alpha, u_\beta$  - проекции нормализованного заданного вектора напряжения,  $h = \sqrt{3}/2$ ,  $\text{int}(x)$  - функция выделения целой части аргумента.

Разработанная методика синтеза алгоритма коммутации для векторной стратегии ШИМ каскадного ВМПЧ основана на принципе симметричного формирования импульсов напряжения (закон «центрированной» ШИМ), является инвариантной к числу уровней и включает в себя следующие этапы:

1. Выбор одной из установленных «разрешённых» комбинаций векторов. «Разрешённой» комбинацией векторов предложено обозначать группу образующих векторов, выбранных для найденного треугольника векторной диаграммы и записанных в оптимальном порядке их коммутации по предложенной системе обозначения. Всего составлено 2 вида таких комбинаций для треугольников I типа:

- $\mathbf{I}^{(i_1)} \Leftrightarrow \mathbf{J}^{(i_j)} \Leftrightarrow \mathbf{K}^{(i_k)} \Leftrightarrow \mathbf{I}^{(i_1+1)} \Leftrightarrow \mathbf{J}^{(i_j+1)} \Leftrightarrow \mathbf{K}^{(i_k+1)} \Leftrightarrow \mathbf{I}^{(i_1+2)}$ , если  $k_1$  - чётно,
- $\mathbf{J}^{(i_j)} \Leftrightarrow \mathbf{K}^{(i_k)} \Leftrightarrow \mathbf{I}^{(i_1)} \Leftrightarrow \mathbf{J}^{(i_j+1)} \Leftrightarrow \mathbf{K}^{(i_k+1)} \Leftrightarrow \mathbf{I}^{(i_1+1)} \Leftrightarrow \mathbf{J}^{(i_j+2)} \Leftrightarrow \mathbf{K}^{(i_k+2)}$ , если  $k_1$  - нечётно,

и 2 вида для треугольников II типа:

- $\mathbf{K}^{(i_k)} \Leftrightarrow \mathbf{J}^{(i_j)} \Leftrightarrow \mathbf{I}^{(i_1)} \Leftrightarrow \mathbf{K}^{(i_k+1)} \Leftrightarrow \mathbf{J}^{(i_j+1)} \Leftrightarrow \mathbf{I}^{(i_1+1)} \Leftrightarrow \mathbf{K}^{(i_k+2)} \Leftrightarrow \mathbf{J}^{(i_j+2)}$ , если  $k_1$  - чётно,
- $\mathbf{I}^{(i_1)} \Leftrightarrow \mathbf{K}^{(i_k)} \Leftrightarrow \mathbf{J}^{(i_j)} \Leftrightarrow \mathbf{I}^{(i_1+1)} \Leftrightarrow \mathbf{K}^{(i_k+1)} \Leftrightarrow \mathbf{J}^{(i_j+1)} \Leftrightarrow \mathbf{I}^{(i_1+2)}$ , если  $k_1$  - нечётно,

Индексы  $i_1, i_j, i_k$  - номера первой используемой комбинации состояния ключей векторов  $\mathbf{I}, \mathbf{J}, \mathbf{K}$  треугольника, определяемые по значению коэффициента  $k_i$  этих векторов и числу уровней  $n$  преобразователя по формулам:

$$i_1 = \text{int}((n - k_{i1})/2), i_j = \text{int}((n - k_{ij})/2), i_k = \text{int}((n - k_{ik})/2). \quad (2)$$

2. Расчёт комбинаций состояния ключей для каждого вектора «разрешённой» комбинации в первом секторе ( $S_i=1$ ) диаграммы напряжений по формулам:

$$\text{для вектора } \mathbf{I}^{(i_1)}: s_a = k_{i1} - m_3 + i_1 - 1, s_b = k_{j1} - m_3 + i_1 - 1, s_c = -m_3 + i_1 - 1,$$

$$\text{для вектора } \mathbf{J}^{(i_j)}: s_a = k_{ij} - m_3 + i_j - 1, s_b = k_{jJ} - m_3 + i_j - 1, s_c = -m_3 + i_j - 1, \quad (3)$$

$$\text{для вектора } \mathbf{K}^{(i_k)}: s_a = k_{iK} - m_3 + i_k - 1, s_b = k_{jK} - m_3 + i_k - 1, s_c = -m_3 + i_k - 1,$$

где  $m_3 = (n-1)/2$ .

Модификация составленных комбинаций  $(s_a, s_b, s_c)$  в соответствии с номером сектора заданного вектора напряжения, если  $S_i=2\dots 6$ .

3. Определение псевдо-нулевого вектора (ПНВ) как вектора с максимальной длительностью включения. *Псевдо-нулевым вектором* предложено называть один из векторов  $\mathbf{I}, \mathbf{J}$  или  $\mathbf{K}$  треугольника, включаемый в начале и в конце полупериода «центрированной» ШИМ. Псевдо-нулевой вектор выделяет две-три комбинации состояния ключей с последовательными номерами в записи «разрешённой» комбинации.

4. Составление «элементарной» последовательности. «Элементарной» последовательностью предложено называть последовательность коммутации векторов на пе-

риоде ШИМ, составленную из векторов «разрешённой» комбинации в соответствии с законом «центрированной» ШИМ и выбранным ПНВ. Пример составления такой последовательности для треугольника II типа с чётным коэффициентом  $k_1$  и ПНВ I:

$$\mathbf{I}^{(i_1)} \rightarrow \mathbf{K}^{(i_{k+1})} \rightarrow \mathbf{J}^{(i_{j+1})} \rightarrow \mathbf{I}^{(i_{1+1})} \rightarrow \mathbf{I}^{(i_{1+1})} \rightarrow \mathbf{J}^{(i_{j+1})} \rightarrow \mathbf{K}^{(i_{k+1})} \rightarrow \mathbf{I}^{(i_1)}.$$

Прямая послед-ть
Обратная послед-ть

5. Выбор одной из двух-трёх комбинаций состояния ключей ПНВ, включаемого в начале цикла ШИМ, по условию минимума числа переключений.

6. Равномерное распределение коммутаций по ячейкам в фазах ВМПЧ. Предложенная методика моделирует переключения за период ШИМ и отбирает коммутируемые ячейки в каждой фазе ВМПЧ по условиям чередования нулевых ( $0^+$  и  $0^-$ ) и ненулевых (+1 и -1) состояний одной ячейки (при этом ненулевые состояния ячеек в одной фазе должны быть одного знака) и выбора ячейки с наименьшим счётчиком числа коммутаций. Алгоритм идентифицирует и хранит состояния всех ячеек ВМПЧ.

Разработанная методика синтеза алгоритма коммутаций и исходный алгоритм расчёта длительностей включения векторов составляют *базовую* (основную) часть алгоритма векторного формирования ШИМ каскадного преобразователя. По исходным проекциям заданного вектора напряжения базовый алгоритм векторной ШИМ формирует управление ячейками, определяя номера (порядковые индексы) коммутируемых ячеек, их состояния и моменты коммутации относительно начала цикла ШИМ.

Базовый векторный алгоритм ШИМ использует  $U_d$  - среднее напряжение всех ячеек и не учитывает возможное рассогласование (небаланс) напряжений, что приводит к амплитудной и фазовой ошибке формирования выходного вектора. Разработанная методика компенсации небаланса напряжений ячеек заключается в «косвенной» коррекции вектора выходного напряжения. На основе установленной последовательности коммутации векторов  $\mathbf{V}_0 \rightarrow \mathbf{V}_1 \rightarrow \mathbf{V}_2 \rightarrow \mathbf{V}_0$  за полуцикл «симметричной» ШИМ и полученной информации о напряжении в звене коммутируемых ячеек алгоритм определяет требуемое допустимое смещение моментов коммутации по формулам:

$$\Delta d_1 = \frac{\Delta V_{r\alpha}(V_{2\beta} - V_{0\beta}) - \Delta V_{r\beta}(V_{2\alpha} - V_{0\alpha})}{(V_{2\beta} - V_{0\beta})(V_{1\alpha} - V_{0\alpha}) - (V_{2\alpha} - V_{0\alpha})(V_{1\beta} - V_{0\beta})}, \text{ при } d'_1 = d_1 + \Delta d_1 \geq 0, \quad (4)$$

$$\Delta d_2 = \frac{\Delta V_{r\beta}(V_{1\alpha} - V_{0\alpha}) - \Delta V_{r\alpha}(V_{1\beta} - V_{0\beta})}{(V_{2\beta} - V_{0\beta})(V_{1\alpha} - V_{0\alpha}) - (V_{2\alpha} - V_{0\alpha})(V_{1\beta} - V_{0\beta})}, \text{ при } d'_2 = d_2 + \Delta d_2 \geq 0, \quad (5)$$

$$\Delta d_0 = -\Delta d_1 - \Delta d_2, \text{ при } d'_0 = d_0 + \Delta d_0 \geq 0, \quad (6)$$

где  $\Delta V_{r\alpha} = 3 \cdot (-d_0(\Delta V_{01\alpha} + \Delta V_{02\alpha})/2 - \Delta V_{1\alpha}d_1 - \Delta V_{2\alpha}d_2)/2U_d$ ,

$\Delta V_{r\beta} = 3 \cdot (-d_0(\Delta V_{01\beta} + \Delta V_{02\beta})/2 - \Delta V_{1\beta}d_1 - \Delta V_{2\beta}d_2)/2U_d$ ,

$\mathbf{V}_0, \mathbf{V}_1, \mathbf{V}_2$  - включаемые за полуцикл ШИМ векторы напряжения, соответствующие векторам I, J, K треугольника векторной диаграммы ВМПЧ,  $V_{0\alpha}, V_{0\beta}, V_{1\alpha}, V_{1\beta}, V_{2\alpha}, V_{2\beta}$  - проекции векторов  $\mathbf{V}_0, \mathbf{V}_1, \mathbf{V}_2$ , рассчитываемые по коэффициентам  $k_1$  и  $k_2$  (рис. 3,б),  $\Delta V_{01\alpha}, \Delta V_{01\beta}, \Delta V_{02\alpha}, \Delta V_{02\beta}, \Delta V_{1\alpha}, \Delta V_{1\beta}, \Delta V_{2\alpha}, \Delta V_{2\beta}$  - смещения проекций ПНВ  $\mathbf{V}_0$  (в начале и в конце полуцикла ШИМ) и векторов  $\mathbf{V}_1, \mathbf{V}_2$  при учёте небаланса напряже-

ний,  $d_0, d_1, d_2$  и  $d'_0, d'_1, d'_2$  - относительные длительности включения векторов до и после компенсации небаланса.

Если условия в формулах (4)-(6) не выполняются, относительные длительности включения  $d'_0, d'_1, d'_2$  пересчитываются по условиям:

$$\begin{aligned} \text{если } d'_1 < 0 \text{ и } d'_1 < 0, \text{ то } d_1'' = 0, d_2'' = 0, d_0'' = 1, \\ \text{если } d'_1 < 0 \text{ и } d'_2 > 0, \text{ то } d_1'' = 0, d_0'' = d'_0 - 0.5d'_1, d_2'' = 1 - d_0'', \\ \text{если } d'_2 < 0 \text{ и } d'_1 > 0, \text{ то } d_2'' = 0, d_0'' = d'_0 - 0.5d'_2, d_1'' = 1 - d_0''. \end{aligned} \quad (7)$$

Векторный алгоритм ШИМ каскадного преобразователя поддерживает работоспособность системы при срабатывании защиты в одной или нескольких ячейках схмотехнически – шунтированием выхода аварийной ячейки и алгоритмически – автонастройкой на изменяемые параметры структуры преобразователя (число уровней). Предложенная методика шунтирования ячеек обрабатывает флаги срабатывания защит, передаваемые контроллерами ячеек, и рассчитывает количество отключённых в каждой фазе ВМПЧ ячеек и соответствующее новой конфигурации число уровней  $n^*$  по формуле:

$$n^* = p_{min} + p_{mid} + 1, \quad (8)$$

где  $p_{min}, p_{mid}$  - минимальное и среднее количество готовых к работе ячеек в фазах преобразователя, причём  $p_{min} \leq p_{mid}$ .

Параметр  $n^*$  (взамен параметра  $n$ ) введён для унификации векторного алгоритма ШИМ и имеет смысл изменяющегося в процессе работы ВМПЧ числа уровней.

Интеграция модулей шунтирования аварийных ячеек и компенсации небаланса напряжений ячеек в структуру базового алгоритма векторной ШИМ представлена на рис.4.

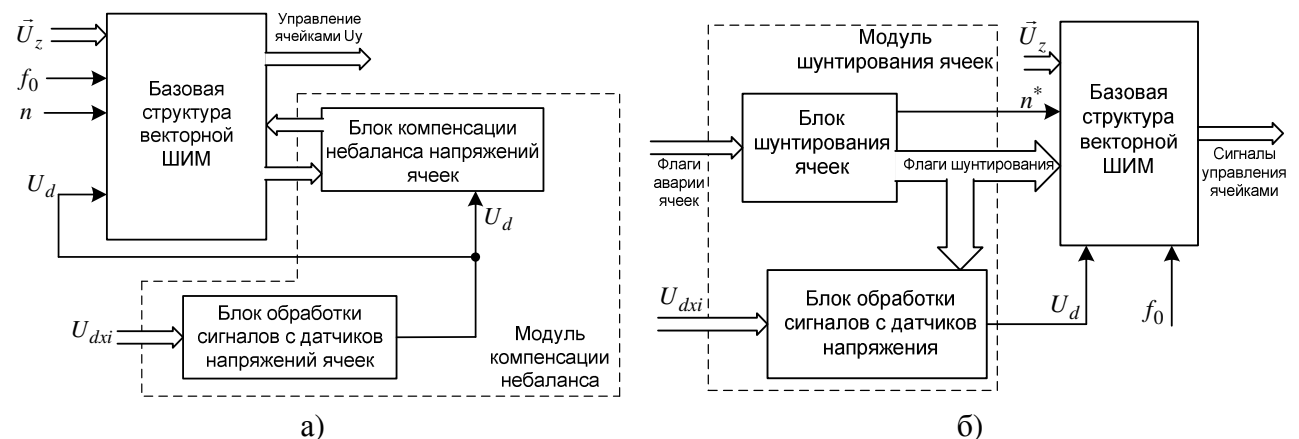


Рис.4. Модули компенсации небаланса (а) и шунтирования ячеек (б) базовой структуры векторного алгоритма ШИМ

Компьютерное моделирование 17-уровневого каскадного ВМПЧ с разработанным векторным алгоритмом ШИМ показало, что модуль компенсации небаланса напряжений ячеек снижает действующее значение ошибок выходного напряжения по модулю и по фазе на 70-80% (при заданном распределении постоянных напряжений ячеек), а алгоритм шунтирования обеспечивает работоспособность ВМПЧ при срабатывании защиты в ячейках.

В третьей главе проведён сравнительный анализ предложенного векторного алгоритма ШИМ базовой структуры с традиционным алгоритмом синусоидальной ШИМ (метод PSPWM). Критерием сравнения алгоритмов выбран *критерий энергоэффективности*, основанный на расчёте энергетических показателей и потерь мощности в системе «высоковольтный преобразователь частоты – асинхронный двигатель» (ВПЧ-АД).

Для численной оценки и сравнения энергоэффективности алгоритмов ШИМ разработана компьютерная модель ВЧРП, показанная на рис.5. По известным параметрам и характеристикам силовых IGBT-модулей преобразователя модель ВЧРП определяет зависимые от алгоритма и частоты ШИМ потери мощности в системе «ВПЧ-АД», к которым относятся:

- суммарные потери мощности в преобразователе, представляющие собой сумму коммутационных потерь и потерь проводимости инверторов всех ячеек преобразователя;
- дополнительные потери от ШИМ в обмотках статора и ротора АД.

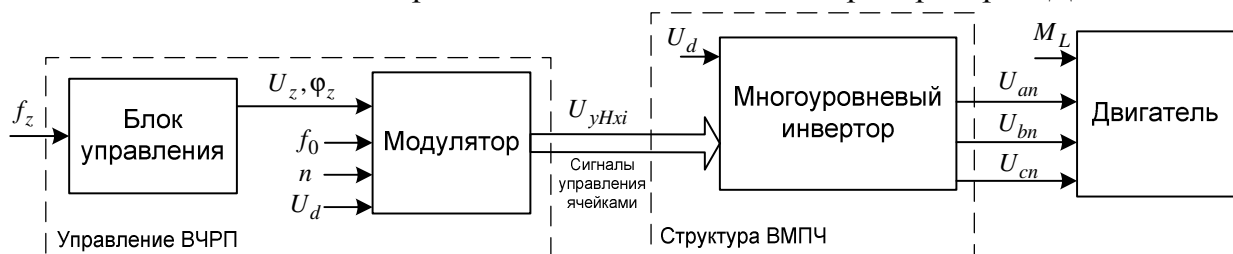


Рис.5. Математическая модель ВЧРП с каскадным преобразователем частоты

Сравнение энергоэффективности различных алгоритмов ШИМ предложено выполнять в одинаковых режимах работы и на оптимальной для каждого алгоритма частоте модуляции. Разработанная методика поиска оптимальной частоты модуляции включает в себя:

1. Определение минимально допустимой частоты модуляции  $f_{0\_min}$  в заданных режимах работы по условию достижения коэффициентом искажения синусоидальности выходного напряжения нормально допустимого уровня, устанавливаемого в соответствии с ГОСТом
2. Определение частоты минимума потерь  $f_{0\_Pmin}$  по зависимостям суммарных потерь мощности в преобразователе от частоты модуляции.
3. Выбор оптимальной частоты модуляции  $f_{0\_opt}$  как наибольшей из частот  $f_{0\_min}$  и  $f_{0\_Pmin}$ .

Модель ВЧРП на рис.5 представлена блоком управления по статическому закону  $u/f$ -регулирувания, блоком модулятора, формирующего сигналы управления ячейками многоуровневого инвертора, блоком многоуровневого инвертора, представляющего собой модель каскадной структуры 17-уровневого ВМПЧ, и блоком модели асинхронного высоковольтного двигателя типа АОД-1000-6ДУ1. Результаты расчёта потерь в преобразователе при синусоидальном алгоритме ШИМ, полученные на модели ВЧРП и с использованием программы SEMISEL, сведены в таблицу.

Расчёт потерь мощности в каскадном преобразователе

Потери мощности в силовых вентилях ВПЧ		Задание по частоте, Гц		
		20	50	100
Модель ВЧРП	общие коммутационные потери, Вт	29,9	30,3	27,8
	общие потери проводимости, Вт	45,8	48,5	42,3
SEMISEL	потери проводимости транзистора, Вт	32	43	41
	потери проводимости диода, Вт	14	5	3
	коммутационные потери транзистора, Вт	22	22	21
	потери обратного восстановления диода, Вт	7	7	7

Сопоставление представленных в таблице данных подтверждает достоверность результатов расчёта, полученных на математической модели ВЧРП.

На рис.6 и рис.7 приведены результаты компьютерного моделирования ВЧРП с модулятором векторного алгоритма ШИМ (отмечены символом «●») и синусоидального алгоритма ШИМ (отмечены символом «▲»). Рассчитанные по предложенной методике значения оптимальной частоты модуляции  $f_{0\_opt}$  (рис.6) в диапазоне 10-100Гц совпадают с минимальной частотой  $f_{0\_min}$ , соответствующей нормально допустимому уровню коэффициента искажения синусоидальности выходного напряжения (5%). Частоты минимума потерь  $f_{0\_Pmin}$  определяют минимум суммарных потерь мощности в преобразователе.

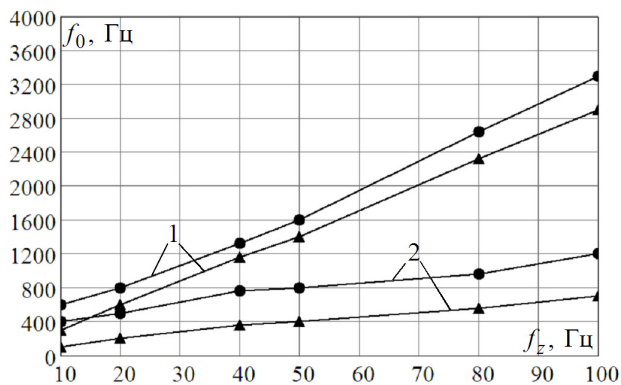


Рис.6. Зависимости частоты ШИМ, соответствующей минимуму потерь  $f_{0\_Pmin}$  (1), и оптимальной частоты ШИМ  $f_{0\_opt}$  (2) от частоты задания напряжения

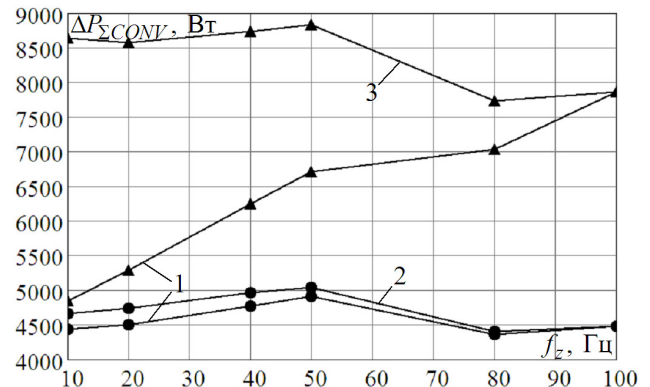


Рис.7. Зависимости потерь в преобразователе от частоты задания напряжения на оптимальной частоте ШИМ  $f_{0\_opt}$  (1), на частоте 2,9кГц (2) и 3,3кГц (3)

Модельный расчёт дополнительных потерь от ШИМ в обмотках АД показал, что на оптимальной частоте модуляции и выше величина этих потерь мала по сравнению с суммарными потерями в преобразователе и не учитывается в оценке энергоэффективности. При снижении частоты модуляции ниже оптимальной величина дополнительных потерь от ШИМ возрастает и может составить значительную часть потерь мощности в системе «ВПЧ-АД». Таким образом, суммарные потери в преобразователе, рассчитанные на оптимальной частоте ШИМ (рис.7), являются показателем энергоэффективности алгоритма. Принимая частоту модуляции постоянной во всём диапазоне регулирования и равной максимальному из значений  $f_{0\_opt}$ , векторный алго-

ритм ШИМ (на частоте 3,3кГц), по сравнению с синусоидальным алгоритмом ШИМ (на частоте 2,9кГц), показывает снижение суммарных потерь в преобразователе на 43-46%.

**Четвертая глава** посвящена вопросам практической реализации алгоритмов ШИМ и экспериментальным исследованиям на низковольтном макете и опытном образце многоуровневого каскадного преобразователя.

Архитектура многопроцессорной системы управления каскадного ВМПЧ показана на рис.8 и состоит из центрального контроллера и контроллеров силовых ячеек. Центральный контроллер (ЦК) в секции управления объединяет в единую сеть контроллеры ячеек (КЯ) и организует потоки обмена информацией по линиям волоконно-оптической связи (ВОЛС). Устройство управления служит для мониторинга параметров и задания регулируемой переменной, а вводная секция – для контроля напряжений и токов в сети питания.

Основные задачи практической реализации алгоритмов ШИМ на базе представленной архитектуры включают в себя: организацию информационно-вычислительных потоков, обеспечение мониторинга напряжений в звене ячеек и компенсацию небаланса напряжений ячеек.

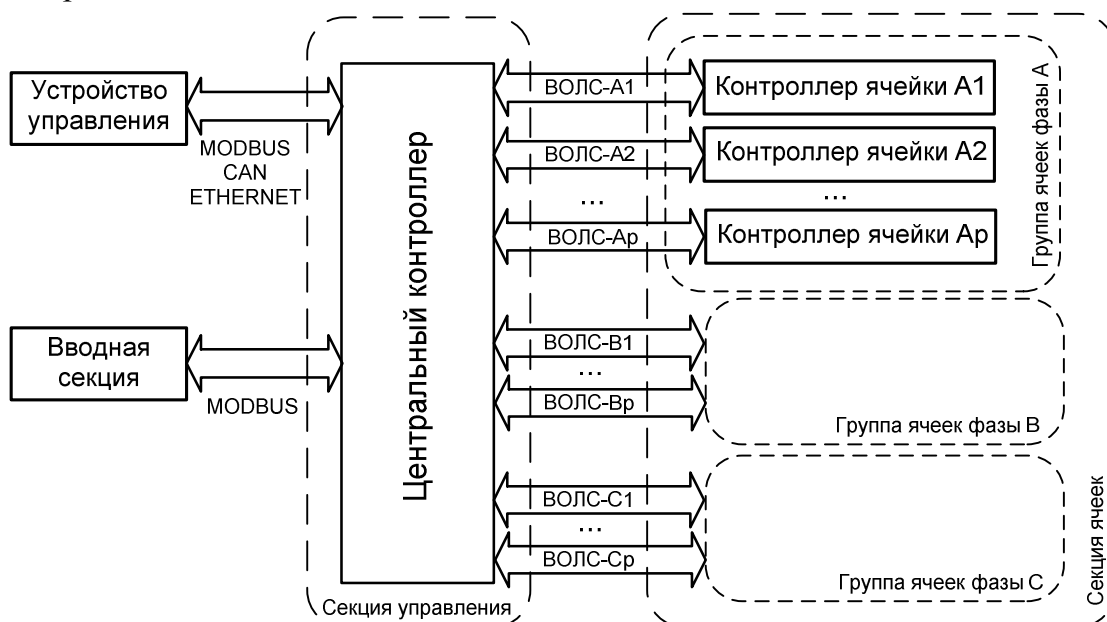


Рис.8. Сетевая топология многопроцессорной архитектуры ВМПЧ

Задача организации информационно-вычислительных потоков и разделения функций управления между ЦК и КЯ решается неоднозначно. Например, векторному алгоритму ШИМ характерна централизация управления и сосредоточение основных расчётов в ЦК. При этом ЦК по сети непосредственно управляет и контролирует состояние каждой ячейки. Напротив, синусоидальный алгоритм ШИМ распределяет управление по ячейкам, передавая основную функцию ШИМ в КЯ.

Задача мониторинга напряжений в звене ячеек устанавливает частоту обновления данных в ЦК по текущим напряжениям ячеек и может решаться путём трансляции в каждом цикле ШИМ напряжений от всех ячеек, либо выборочно, например, только от одной ячейки в каждой фазе преобразователя.

Задачу компенсации небаланса напряжений ячеек для векторного алгоритма ШИМ, при синфазном колебании напряжений ячеек в фазах ВМПЧ, предложено решать коррекцией управления по отклонениям средне-фазных напряжений ячеек  $U_{dA}$ ,  $U_{dB}$ ,  $U_{dC}$  от общего среднего напряжения. Компенсационная составляющая  $U_k$ , в этом случае, рассчитывается по текущим значениям средне-фазных напряжений и эквивалентным относительным уровням напряжений с предыдущего цикла расчёта -  $s_{ae}, s_{be}, s_{ce}$  по формуле:

$$U_k = [H] \cdot [s_{ae}\Delta U_{dA} \quad s_{be}\Delta U_{dB} \quad s_{ce}\Delta U_{dC}]^T, \quad (9)$$

где  $[H] = \begin{bmatrix} 2/3 & -1/3 & -1/3 \\ -1/3 & 2/3 & -1/3 \\ -1/3 & -1/3 & 2/3 \end{bmatrix}$  - матрица преобразований,  $\Delta U_{dA}, \Delta U_{dB}, \Delta U_{dC}$  - отклонения

средне-фазных напряжений  $U_{dA}, U_{dB}, U_{dC}$  от общего среднего значения, определяемого выражением  $U_d = (U_{dA} + U_{dB} + U_{dC})/3$ .

Исследование эффективности управления выполнялось на уточнённой компьютерной модели ВЧРП, разработанной с учётом физических процессов перераспределения энергии между ячейками ВМПЧ и нагрузкой – асинхронным двигателем, приводящих к периодическим колебаниям напряжений на конденсаторах в звене ячеек. Основными критериями оценки предложены: *критерий перенапряжения*, оценивающий работоспособность привода по условию превышения мгновенного напряжения в звене ячеек допустимого уровня, *критерий энергоэффективности*, определяющий потери мощности в системе «ВПЧ-АД» и *технологический критерий*, оценивающий пульсации выходной переменной привода (скорости, момента).

Оценка технологического критерия на уточнённой компьютерной модели ВЧРП с векторным формированием ШИМ показала, что эффект от предложенной методики компенсации по-фазного небаланса заключается в снижении пульсаций момента АД с 80-90% до 5-10% внизу диапазона регулирования (10Гц) в режимах близких к холостому ходу (<1кНм).

Экспериментальное исследование первого опытного образца каскадного 17-уровневого ВПЧ (рис.11) на низком напряжении выполнено по схеме, приведённой на рис.9.

На испытательном стенде, включающем в себя трёхфазный входной трансформатор БКЖИ.671131.006, формирующий напряжение в звене каждой ячейки на уровне 31В, опытный образец 17-уровневого ВМПЧ, трёхфазный АД типа 5А80МВ6У3 мощностью 1,1кВт и нагрузочный агрегат, собранный на базе преобразователя частоты ЭПВ-ТТПТ-32-380-3СП-УХЛ4 и синхронного двигателя 5ДВМ215 А25ЕТ2УХЛ4, проведены экспериментальные исследования разработанных алгоритмов. На рис.10 показаны осциллограммы работы ВЧРП на холостом ходу в установленном режиме с номинальной частотой 50 Гц.

Разработанные алгоритмы управления также использованы на низковольтном макете и во втором опытном образце каскадного преобразователя (10кВ, 1300кВт).



Сходимость экспериментальных кривых напряжений и токов с результатами компьютерного моделирования показана на рис.12 при  $f_z = 50$  Гц и подтверждает адекватность разработанных математических моделей ВЧПЧ.

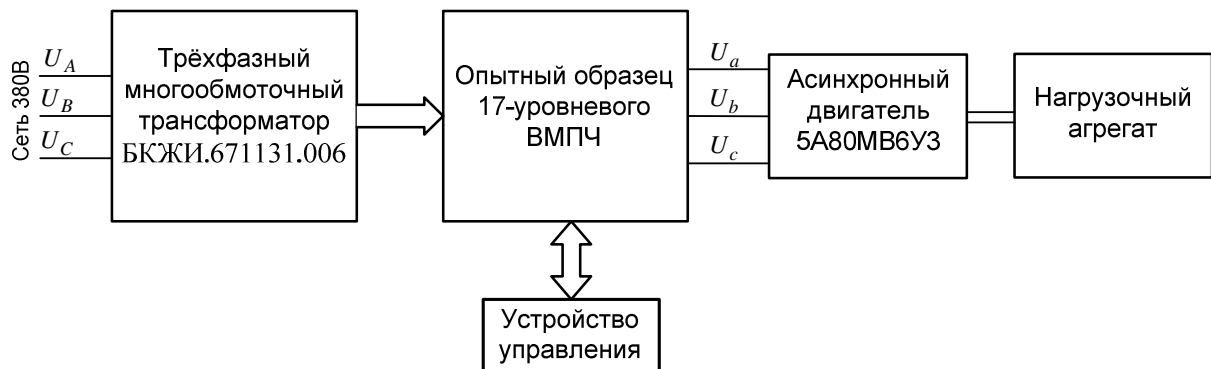


Рис.9. Низковольтная схема испытания опытного образца ВМПЧ

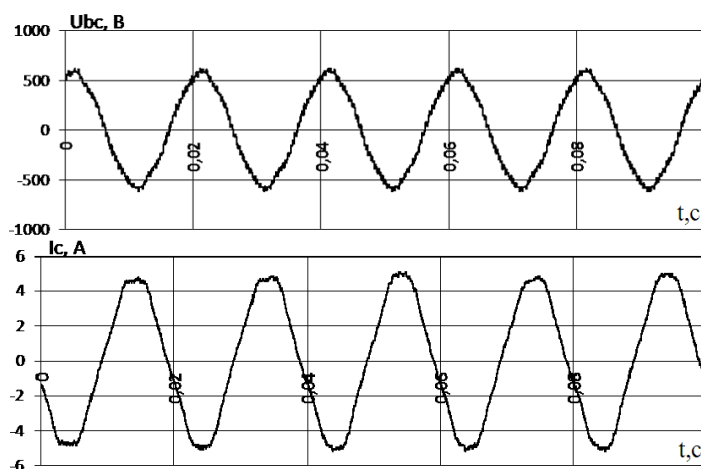


Рис.10. Экспериментальные кривые выходного линейного напряжения и фазного тока АД



Рис.11. Опытный образец каскадного ВМПЧ

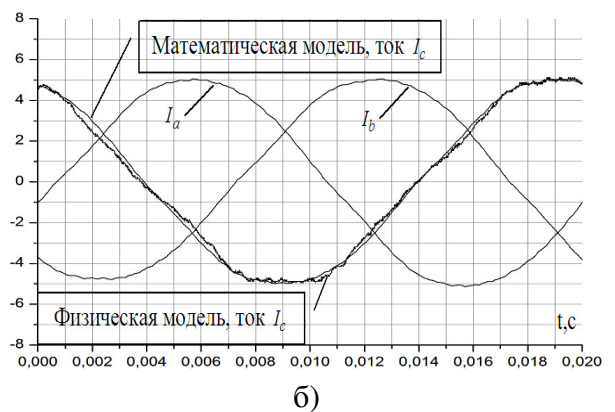
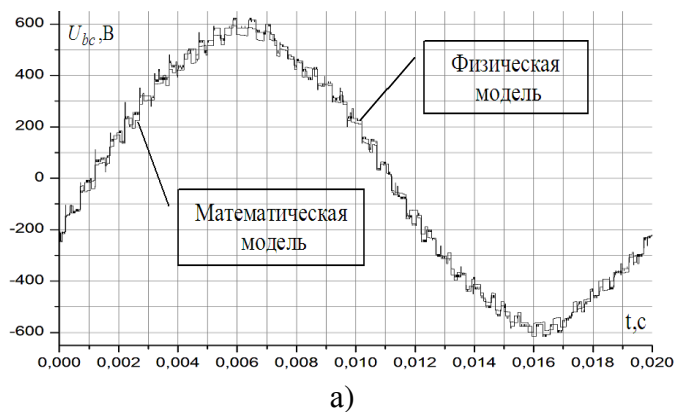


Рис.12. Диаграммы выходного линейного напряжения (а) и фазного тока АД (б), полученные на математической модели и экспериментальном стенде

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Сравнительный анализ известных схемотехнических решений высоковольтных многоуровневых преобразователей частоты и методов формирования ШИМ показал актуальность разработки нового энергоэффективного алгоритма векторного формирования ШИМ, обеспечивающего: минимизацию частоты коммутаций без превы-

шения допустимого уровня гармонических искажений выходного напряжения, равномерное распределение коммутаций по всем ячейкам в фазах, возможность шунтирования аварийных ячеек, компенсацию небаланса напряжений в звене ячеек и минимизацию ресурсов процессора.

2. С использованием предложенной системы символьного обозначения векторов в пределах треугольника по номеру комбинации состояния ключей был разработан новый векторный алгоритм формирования ШИМ многоуровневого каскадного преобразователя, отличающийся инвариантностью к числу уровней процедурой синтеза алгоритма коммутации с минимизацией коммутационной составляющей потерь преобразователя, равномерным распределением коммутаций по ячейкам, компенсацией небаланса напряжений ячеек за счёт коррекции относительных длительностей включения векторов за цикл ШИМ и шунтированием минимально возможного числа ячеек при их выходе из строя без нарушения работоспособности преобразователя.

3. Разработан комплекс программ имитационного моделирования высоковольтного электропривода с каскадным преобразователем частоты, позволяющий для различных способов формирования ШИМ: традиционной синусоидальной ШИМ и предложенного алгоритма энергоэффективной векторной ШИМ, – по известным параметрам и характеристикам силовых модулей ячеек, входного трансформатора и неуправляемого выпрямителя с ёмкостным фильтром оценить потери энергии и нормируемые показатели качества выходного напряжения. Сопоставление результатов моделирования с результатами низковольтных лабораторных испытаний опытного образца электропривода с 17-уровневым каскадным преобразователем, показало адекватность предложенных математических моделей электропривода.

4. Предложены универсальные для различных алгоритмов ШИМ и основанные на модельном расчёте энергетических характеристик высоковольтного привода методика поиска оптимальной частоты модуляции, обеспечивающая оптимум потерь энергии в преобразователе при допустимом уровне искажений выходного напряжения, и методика анализа энергоэффективности ШИМ, позволяющая на оптимальной частоте модуляции получить количественную оценку потерь. Сравнительный анализ энергоэффективности алгоритмов синусоидальной и векторной ШИМ, выполненный на основе моделирования процессов в электроприводе с 17-уровневым каскадным преобразователем частоты, показал снижение потерь в преобразователе при векторном формировании ШИМ с частотой 3,3кГц, по сравнению с синусоидальной ШИМ на частоте 2,9кГц, на 43-46% в диапазоне регулирования 10-100Гц.

5. Разработаны алгоритмы сетевого взаимодействия элементов многопроцессорной архитектуры каскадного преобразователя, обеспечивающие практическую реализацию алгоритмов синусоидального и векторного формирования ШИМ с распределением функций управления между центральным контроллером и контроллерами ячеек. Разработанные структуры, методики и алгоритмы векторного формирования ШИМ реализованы на низковольтном макетном образце и двух высоковольтных опытных образцах (10кВ, 1300кВт) каскадного преобразователя частоты, собранных по заказу и при участии ООО «ЧЭАЗ-ЭЛПРИ» Чебоксарского электроаппаратного завода.

## ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### *Научные статьи, опубликованные в изданиях по списку ВАК*

1. **Коротков, А.А.** Анализ энергоэффективности алгоритмов управления преобразователем высоковольтного частотно-регулируемого привода / А.А. Коротков, А.Б. Виноградов // Вестник ИГЭУ. – 2013. – №2. – С.47–52.

2. **Коротков, А.А.** Новый алгоритм векторного формирования ШИМ высоковольтного преобразователя с минимизацией коммутационных потерь / А.А. Коротков, А.Б. Виноградов // Вестник ИГЭУ. – 2013. – №4. – С.64–69.

### *Публикации в других изданиях*

3. **Коротков, А.А.** Управление многоуровневым преобразователем напряжения / А.А. Коротков, А.Б. Виноградов, П.А. Колосов // Материалы XVII Междунар. науч.–техн. конф. студ. и асп. «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика». – М.: МЭИ. – 2011. – Т.2. – С. 149-150.

4. **Коротков, А.А.** Разработка алгоритма управления многоуровневым преобразователем / А.А. Коротков, А.Б. Виноградов, С.В. Журавлёв // Материалы XVI Междунар. научн.-техн. конф. «Бенардосовские чтения» – Иваново: ГОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – 2011. – Т.3. – С. 35-36.

5. **Коротков, А.А.** Синтез алгоритма управления многоуровневым высоковольтным преобразователем / А.А. Коротков, А.Б. Виноградов // Материалы региональной науч.-тех. конф. студ и асп. «Энергия 2011». – Иваново: ГОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – 2011. – Т.2. – С. 11-12.

6. **Коротков, А.А.** Оценка энергоэффективности и сравнительный анализ алгоритмов ШИМ высоковольтного преобразователя / А.А. Коротков, А.Б. Виноградов, А.Н. Сибирцев, Д.А. Монов // Технічна Електродинаміка. Тематичний випуск. Силова електроніка та енергоефективність. Частина 1. – Харків, 2012. – С. 90-95.

7. **Коротков, А.А.** Сравнительный анализ энергетических показателей алгоритмов управления высоковольтным многоуровневым преобразователем / А.А. Коротков, А.Б. Виноградов, А.Н. Сибирцев, Д.А. Монов // Труды VII Междунар. (XVIII Всероссийской) конфер. по автоматизированному электроприводу (АЭП-2012). – Иваново, 2012г. – С.109–113.

8. **Коротков, А.А.** Управление высоковольтным электроприводом с многоуровневым каскадным преобразователем частоты / А.А. Коротков, А.Б. Виноградов // Материалы IXX Междунар. науч.–техн. конф. студ. и асп. «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика». – М.: МЭИ. – 2013. – Т.2. – С. 258.

9. **Коротков, А.А.** Разработка алгоритма векторного управления высоковольтным каскадным преобразователем / А.А. Коротков, А.Б. Виноградов // Материалы XVII Междунар. научн.-техн. конф. «Бенардосовские чтения». – Иваново: ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – 2013. – Т.3. – С. 42-45.

10. **Коротков, А.А.** Дополнительные функции и экспериментальная апробация алгоритма векторного управления высоковольтным каскадным преобразователем / А.А. Коротков, А.Б. Виноградов // Материалы XVII Междунар. научн.-техн. конф. «Бенардосовские чтения». – Иваново: ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – 2013. – Т.3. – С. 45-48.

11. **Виноградов А.Б., Коротков А.А., Журавлёв С.В.** Модель высоковольтного частотно-регулируемого электропривода каскадной топологии с векторным формированием ШИМ / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. – М.: Федеральная служба по интеллектуальной собственности. – 25.06.2013. – № 2013616006.

---

КОРОТКОВ Александр Александрович

**ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫЕ АЛГОРИТМЫ В ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ  
С МНОГОУРОВНЕВЫМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ ЧАСТОТЫ**

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Подписано в печать \_\_.\_\_.2013. Формат 60x84 1/16.

Печать плоская. Усл. печ. л. \_\_\_\_. Тираж 100 экз. Заказ № \_\_\_\_.

ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет  
имени В.И. Ленина»

153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34.

Отпечатано в УИУНЛ ИГЭУ