

05.09.03  
С20

На правах рукописи

САРВАРОВ Анвар Сабулханович

**ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД  
ВЕНТИЛЯТОРНЫХ МЕХАНИЗМОВ ПО СИСТЕМЕ ИПЧ-АД  
С ПРОГРАММНЫМ ФОРМИРОВАНИЕМ НАПРЯЖЕНИЯ**

Специальность 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук

Челябинск 2002

Работа выполнена в Магнитогорском государственном техническом  
университете им. Г.И. Носова на кафедре  
"Электроника и микроэлектроника"

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
О. И. Осипов;  
доктор технических наук, профессор  
С. В. Хватов;  
доктор технических наук, профессор  
А. Я. Микитченко.

Ведущее предприятие –  
ОАО "Магнитогорский металлургический комбинат".

Защита состоится 25 апреля 2002 г. в 10<sup>00</sup> час. на заседании  
диссертационного Совета Д212.298.05 при Южно-Уральском государственном  
университете по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. Ленина, 76, ауд. 380.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета.

Автореферат разослан "22" марта..... 2002 г.

Учёный секретарь диссертационного Совета  
доктор технических наук, профессор



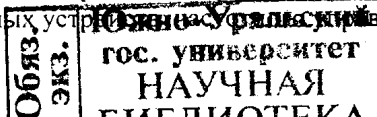
Ю. С. Усынин

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность проблемы.** Постоянный рост цен на электроэнергию и другие виды энергоресурсов привели к обострению проблем энергосбережения во многих отраслях производства, особенно энергоёмких. В этих условиях электротехнические службы промышленных предприятий обратили серьезное внимание на комплекс электроприводов вспомогательных механизмов и в первую очередь на механизмы с вентиляторной нагрузкой (вентиляторы, насосы, компрессоры, воздуходувки, дымососы и др). На их долю приходится около 25-30% всей потребляемой электроэнергии. Являясь самыми массовыми, электроприводы вентиляторных механизмов продолжают оставаться в своем большинстве нерегулируемыми.

В этих электроприводах при работе с постоянной частотой вращения отсутствует возможность снижения потребляемой мощности при снятии технологических нагрузок. Кроме того, тяжелые условия прямого пуска вынуждают оставлять их в работе во время плановых остановок и простоев технологических агрегатов. Названные особенности эксплуатации являются главной причиной завышенного в них электропотребления. Превышение потребляемой мощности в вентиляторных электроприводах можно устранить только в случае перехода к регулированию частоты вращения. При этом может достигаться заметная экономия электроэнергии, величина которой во многих случаях, как показывает опыт внедрения средств регулирования частоты вращения, составляет 30-40%. Таким образом, электроприводы данного типа обладают значительным резервом энергосбережения, реализация которого в полной мере возможна только при переходе к регулированию частоты вращения в соответствие с требуемой производительностью (расходом).

Применение для целей энергосбережения современных двухзвенных преобразователей частоты не всегда оправдано. Эти преобразователи имеют высокую стоимость за счет заложенного в них широкого спектра регулировочных возможностей, в большинстве из которых сегодня значительная часть вентиляторных электроприводов не нуждается. Анализ потребления воды, воздуха, пара и других энергоносителей показывает, что их производительность во многих случаях достаточно изменять ступенчато. Действительно, существует много примеров из практики промышленной эксплуатации вентиляторных механизмов, когда необходимо такое регулирование, например, при остановке отдельных технологических агрегатов, смене времени суток («день-ночь»), времени года («зима-лето») и других случаях. Применение для этих целей дорогостоящих преобразователей частоты на полностью управляемых ключах экономически не целесообразно, так как основной эффект энергосбережения может быть достигнут в рассматриваемых случаях за счет более простого способа регулирования, а именно путем перевода электропривода вентиляторного механизма на фиксированные пониженные частоты вращения. Такие режимы работы могут быть реализованы на базе простых объектно-ориентированных устройств.



Таким образом, становится актуальной задача разработки и исследования систем электроприводов переменного тока с преобразователями, выполненными на основе отечественных тиристоров, обеспечивающих длительную работу вентиляторных электроприводов на фиксированных пониженных ступенях частот вращения.

Актуальность этой работы определяется необходимостью практической реализации Федерального закона «Об энергосбережении в Российской Федерации» от 03.04.96 г., и основными положениями энергетической стратегии России до 2020 года, постановлением Правительства РФ №80 «О федеральной целевой программе «Энергосбережение России на 1998-2005 г.г.» от 24.01.98. С этой целью на предприятиях разработаны и приняты к практической реализации программы модернизации электроприводов переменного тока. В частности, на уровне РАО ЕЭС «Россия», АО ВНИИЭ подготовлена программа технического перевооружения и реконструкции электрических станций на основе перехода к регулируемому электроприводу механизмов собственных нужд (насосов, дымососов и дутьевых вентиляторов). При этом отмечается существование необходимости в частых пусках и создании режимов глубокой разгрузки. Для этих целей целесообразно применить ступенчатое регулирование частоты вращения указанных механизмов.

**Целью работы** является создание основ теории и разработки энергосберегающего электропривода по системе непосредственный преобразователь частоты – асинхронный двигатель (НПЧ-АД) со ступенчатым формированием частоты при естественной коммутации вентилей для механизмов с вентиляторной нагрузкой.

Достижение поставленной цели потребовало:

- теоретического обоснования и развития научного направления, связанного с оптимизацией по энергетическим критериям ступенчато регулируемых асинхронных электроприводов вентиляторных механизмов;
- обоснования для широкого круга вентиляторных механизмов применения электроприводов по схеме НПЧ-АД с программным формированием напряжения;
- разработки моделей указанной группы электроприводов для решения задач оптимизации стационарных режимов, синтеза алгоритмов работы управляющих устройств и анализа динамики системы электропривода;
- исследования режимов работы, определения электромеханических соотношений и энергетических показателей;
- разработки рациональных структур систем НПЧ-АД и способов управления;
- разработки на основе проведенных исследований асинхронных электроприводов для механизмов с вентиляторной нагрузкой, обладающих новыми возможностями и повышенными технико-экономическими показателями;
- создания экспериментальных макетов и опытных образцов, исследования рабочих режимов, проверки и использования результатов исследования в ходе внедрения.

**Идея работы** заключается в том, что при программном формировании выходного напряжения на базе различных силовых структур НПЧ можно получить широкий ряд ступеней частоты симметричного трехфазного напряжения и появляется возможность расширения диапазона регулирования частоты вращения АД.

**Основные положения и результаты, выносимые на защиту:**

1. Принципы программного формирования напряжения в системе НПЧ-АД при которых производят 2-х фазное питание, а также осуществляют режимы при чередовании интервалов 2-х и 3-х фазного питания двигателя с постоянным углом управления на каждом интервале пульсации, что позволяет упростить алгоритмы и систему управления вентилями за счет исключения контроля проводящего состояния их при смене полярности полуволн тока.
2. Силовые схемы непосредственных преобразователей частоты для низковольтного и высоковольтного асинхронного электропривода, способ формирования высоковольтного напряжения на двигателе в энергосберегающих режимах вентиляторных механизмов.
3. Математические модели различных систем НПЧ-АД с программным формированием напряжения, учитывающие алгоритмы управления вентилями при создании различных ступеней выходной частоты в 6-, 12- и 18-пульсном преобразователе, позволяющие исследовать процессы электромеханического преобразования энергии в АД при пуске и в стационарном режиме.
4. Математическое описание способов формирования напряжения НПЧ на основе переключающих функций, позволяющее обобщить алгоритмы управления и упростить их аппаратно-программную реализацию.
5. Обобщение методик расчета параметров электромеханического преобразования энергии в АД на основе круговых диаграмм путем введения параметра косвенного угла нагрузки, позволяющее при упрощении расчетов добиться определения условий минимизации тока статора на различных ступенях частоты вращения.
6. Методики расчета действующих значений первых гармоник напряжения на двигателе в функции угла управления при реализации различных алгоритмов формирования напряжения.
7. Результаты теоретических и экспериментальных исследований на опытно-промышленной установке и компьютерной модели, подтверждающие возможность программной реализации энергосберегающих режимов на различных ступенях частоты вращения вентиляторных электроприводов по системе НПЧ-АД и позволяющие для каждой рабочей частоты осуществить оптимизацию режима работы по минимуму тока статора в разомкнутой системе электропривода.

**Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждаются** практической реализацией предложенных способов формирования ступеней частоты вращения в разомкнутой системе НПЧ-АД на опытной установке и экспериментальными исследованиями, результаты которых сопоставлены с расчетными данными, полученными при

моделировании процессов в системе НПЧ-АД с программным формированием напряжения. Математические модели систем НПЧ-АД получены на основе общепринятых допущений, предложенные принципы, способы и алгоритмы управления вентилями в составе моделей представлены математическими выражениями на основе переключающих логических функций, при этом правильность их реализации на моделях проверялась на основе отдельных исследований. Возможность применения круговой диаграммы АД для определения условий минимизации тока статора подтверждена результатами моделирования процессов в системе НПЧ-АД.

#### **Научная новизна.**

1. С позиции системного подхода теоретически обоснован и получил развитие принцип программного формирования напряжения с различными степенями фиксированной частоты, основанный на исключении контроля проводящего состояния вентиля в схеме НПЧ-АД.
2. Предложены способы и алгоритмы программного формирования напряжения, которые учитывают особенности характеристик вентиляторных электроприводов и реализуют коммутационные функции, обеспечивающие двухфазное питание АД, а также режимы с чередованием интервалов двух- и трехфазного питания, что позволяет при постоянстве угла управления получить трехступенчатую форму фазного напряжения на различных фиксированных частотах.
3. Разработаны новые силовые структуры 12- и 18-пульсного НПЧ для низковольтных и высоковольтных вентиляторных электроприводов, позволяющие реализовать энергосберегающие режимы длительной работы АД на фиксированных частотах симметричного трехфазного напряжения.
4. Предложены математические модели систем НПЧ-АД с программным формированием напряжения, позволяющие решать задачи оптимизации энергосберегающих режимов на фиксированных ступенях частоты вращения и снижения пусковых токов.
5. Получено математическое описание способов формирования напряжения НПЧ на основе переключающих функций, позволяющее обобщить алгоритмы управления и упростить их аппаратно-программную реализацию.
6. Предложены обобщенные модели асинхронного электропривода, основанные на применении круговых диаграмм и введении понятия угла нагрузки, позволяющие в стационарных режимах решать задачи минимизации тока статора и снижения потерь.
7. В результате теоретических и экспериментальных исследований подтверждена реализуемость предложенных способов и алгоритмов управления вентилями в разомкнутой системе НПЧ-АД с программным формированием напряжения и установлены условия, при которых достигается устойчивая работа с минимизацией тока статора.

#### **Практическая ценность.**

1. Разработана система НПЧ-АД с программным формированием ступеней пониженных частот вращения, которая позволяет осуществлять энергосберегающие режимы в электроприводах с вентиляторного типа.

2. Разработанные силовые структуры 12- и 18-пульсного преобразователей позволяют улучшить форму тока и напряжения на двигателе и расширить диапазон частотного регулирования.
3. В 18-пульсной схеме применением суммирования линейных напряжений различных групп вторичных обмоток трансформатора достигается существенное (в два раза) снижение обратного напряжения на тиристорах, что актуально при создании высоковольтных НПЧ.
4. Разработанные математические модели систем НПЧ-АД с программным формированием напряжения и предложенные методики расчета позволяют ускорить процесс ввода преобразователя в работу, обеспечивают создание энергетически наиболее выгодных режимов работы электропривода и снизить пусковые токи.
5. Основные результаты работы внедрены в опытно-промышленную установку, выполненную по системе НПЧ-АД с программным формированием напряжения на вентиляторе стана «2500» горячей прокатки ЛПЦ-4 ОАО «ММК» и переданы для создания опытной серии.
6. Результаты диссертационной работы в виде разделов рабочих программ и лабораторного стенда нашли применение в учебном процессе в Магнитогорском государственном техническом университете для студентов электротехнических специальностей при изучении дисциплин «Энергетическая электроника», «Преобразовательная техника», Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов»

#### **Реализация результатов работы.**

Разработан и испытан в производственных условиях в ОАО «ММК» опытный образец НПЧ с программным формированием напряжения. Алгоритмы управления вентилями преобразователя реализованы в виде управляющих программ в микроконтроллере системы управления, что позволило осуществить предложенные принципы и способы формирования напряжения в системе НПЧ-АД. Разработанные методики расчета параметров настройки системы управления применены при вводе опытной системы НПЧ-АД с программным формированием напряжения в режим работы на фиксированной пониженной частоте вращения. Основные положения работы положены в основу концепции энергосбережения на ОАО «ММК» и приняты на техническом совете комбината к реализации в Программе создания промышленного образца НПЧ с программным формированием напряжения на Березовском опытном заводе «Энергоцветмет» с целью подготовки производства опытной серии.

**Апробация работы.** В полном объеме диссертационная работа докладывалась и обсуждалась на научном семинаре кафедры автоматизированного электропривода Московского энергетического института, на объединенном научном семинаре энергетического факультета и факультета автоматики и вычислительной техники Магнитогорского государственного технического университета, на семинаре энергетического факультета Южно-Уральского государственного университета и на техническом совете

управления главного энергетика ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» в 20001-2002 г.г.

Отдельные разделы работы докладывались на I-й и VI-й Международной конференциях по электромеханике и электротехнологии (г. Суздаль, сентябрь 1994 г., Клязьма, сентябрь 2000 г.), I-й, II-й и III-й Международных (XII, XIII и XIV-й Всероссийских) конференциях по автоматизированному электроприводу Санкт-Петербург, 1995 г., Ульяновск, 1998 г., Нижний Новгород, 2001 г.), XI-й и XII-й научно-технических конференциях с международным участием «Электроприводы переменного тока» (г. Екатеринбург, февраль 1998 г. и март 2001 г.), научно-техническом семинаре «75 лет отечественной школы электропривода» (Санкт-Петербург, 1996 г.), Всероссийском электротехническом конгрессе с международным участием «На рубеже веков: итоги и перспективы (Москва: МЭИ, 1999 г.), I-й и II-й Международной научно-технической конференции «Энергосбережение на промышленных предприятиях» (г. Магнитогорск, сентябрь 1997 г. и октябрь 2000 г.), Международной конференции «Проблемы развития металлургии Урала на рубеже XXI-века (Магнитогорск, май 1996 г.), Международной научно-технической конференции «Научные идеи В.А. Шубенко на рубеже веков» (г. Екатеринбург: УПИ-УГТУ, декабрь 1999 г.), Международной научно-технической конференции «Перспективные технологии автоматизации» (г. Вологда: ВоГУ, 1999 г.) и Международной научно-технической конференции «Контроль, измерение, автоматизация» (г. Барнаул: АГТУ, 2000 г.)

**Публикации.** Основное содержание диссертационной работы опубликовано в 48 научных трудах, в том числе монографии и 41 статьях и материалах конференций и 6 авторских свидетельствах и патентах.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы из 150 наименований и приложения.. Работа изложена на 333 страницах, содержит 113 рисунков и 27 таблиц.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** рассмотрено состояние вопроса, обоснована актуальность решаемой проблемы, сформулированы цель работы и основные задачи.

**В первой главе** на основе анализа состояния электроприводов переменного тока в промышленности на примере ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» установлено, что практически все они являются нерегулируемыми и имеют по этой причине завышенное электропотребление. Наиболее массовыми в металлургическом производстве являются вентиляторные механизмы различных видов: вентиляторы ( для проветривания, дутьевые, дымососы, воздуходувки, эксгаустеры и др.), насосы (сетевые, питательные, шламовые и др.), турбокомпрессоры (воздушные, кислородные, азотные и др). На их долю приходится около 30% всей потребляемой электроэнергии на комбинате. Установленная мощность электроприводов данного типа составляет около 200 МВт, в том числе 40 МВт напряжением 380В



Превышение электропотребления на этих механизмах составляет 30-40%. Такая ситуация обусловлена многими причинами. Среди них главными являются следующие:

1. Отсутствие регулирования частоты вращения в соответствие с потребностями производства в воде, паре, воздухе и других компонентах производства.
2. Практически все вентиляторные механизмы продолжают оставаться в работе во время плановых и вынужденных простоев технологических агрегатов в связи с тяжелыми условиями прямого пуска и лимитированным их количеством.
3. Реструктуризация и перепрофилирование производства, снижение уровня производства многих видов продукции, изначально установленная завышенная мощность механизмов с запасом на случай роста производства и др.

Анализа требований к данному типу механизмов со стороны технологии показывает, что во многих случаях нет необходимости в осуществлении постоянного плавного регулирования их производительности, а является достаточным ступенчатое регулирование. В связи с этим необходимо уточнить современную концепцию энергосбережения в вентиляторных электроприводах, дополнив её положением о возможности получения основного эффекта энергосбережения путем перевода ряда вентиляторных электроприводов на относительно длительное время в режим работы с пониженной частотой вращения. В этой главе приведены примеры, подтверждающие достаточность такого регулирования. В частности, все вентиляторы маззалов листопрокатных и других крупных цехов нуждаются в зимнее время в понижении частоты вращения на 25-30%. В переходе на пониженные ступени частоты вращения нуждаются также насосы высокого давления в системе гидросбыва окалины, воздухоудки в конверторном производстве и многие другие механизмы. Опыт внедрения современных ПЧ на дутьевых вентиляторах котлов показал, что рабочий диапазон регулирования частоты находится в весьма узких пределах 33-37 Гц.

При подготовке концепции энергосбережения в ОАО «ММК» были рассмотрены два направления модернизации вентиляторных электроприводов: с применением только современных ПЧ и направление, основанное на реализации трех уровней модернизации с учетом требований технологии:

- на основе современных преобразователей частоты с ШИМ-модуляцией на полностью управляемых силовых ключах для плавного регулирования;
- с применением более простых объектно-ориентированных средств на базе отечественных тиристоров для ступенчатого регулирования частоты;
- на базе устройств «мягкого пуска» для «старт-стопного» регулирования.

Оценка экономической эффективности вариантов модернизации электроприводов по указанным направлениям показала, что направление, основанное на дифференцированном подходе с позиции требований к электроприводам является более эффективным. Срок окупаемости затрат при проведении трехуровневой модернизации в два раза меньше. Это подтверждают расчеты фактической экономической эффективности, проведенные на объектах, где внедрялись средства регулирования.

В соответствие с известной классификацией вентиляторных механизмов, которые часто для краткости называют турбомеханизмами, отдельно рассмотрены требования, предъявляемые к их разновидностям и особенности эксплуатационных характеристик. Приведены известные аналитические выражения, описывающие расходно-напорные характеристики вентиляторных механизмов. Показано, что при переходе в них к относительным единицам выражения для производительности (расхода), механической мощности и момента становятся более компактными и наглядными. На их основе получено выражение для расчета энергосберегающего эффекта в виде доли снижения потребляемой мощности из сети:

$$\Delta p_c = 1 - \left[ \Delta p_0 n^3 + n^2(1-q) \sqrt{\frac{h_0 n^2 - h_{cm}}{h_0 - h_{cm}}} \right], \quad (1)$$

где  $n$ ,  $\Delta p_0$ ,  $q$ ,  $h_0$  и  $h_{cm}$  - соответственно частота вращения, мощность, потребляемая из сети при работе на закрытую задвижку, производительность (расход), напор при закрытой задвижке и статический напор в относительных единицах.

Обобщая требования к механизмам этого типа, следует подчеркнуть, что при переходе на пониженные частоты вращения момент нагрузки снижается в квадратичной, а мощность на валу двигателя в кубической зависимости, режим работы - длительный, время пуска обычно не лимитировано, отсутствуют перегрузки, реверс и торможение, характер нагрузки спокойный и её величина определяется в соответствие с механической характеристикой механизма. Таким образом, электроприводы вентиляторного типа являются в своем большинстве наиболее простыми с позиции формирования рабочих режимов. По этой причине при принятии решений, связанных с модернизацией вентиляторных электроприводов необходимо принимать во внимание экономическую целесообразность применения тех или иных средств регулирования с учетом требований к ним со стороны технологии и срока окупаемости мероприятия.

В этой главе проведен также анализ современных способов и средств улучшения регулировочных возможностей асинхронных электроприводов. Рассматривая возможности систем с тиристорными преобразователями напряжения (ТПН) в создании энергосберегающих режимов вентиляторных электроприводов, принято во внимание, что они могут работать экономично только на частотах вращения близких к номинальным, и предназначены для применения в массовых электроприводах с управляемыми пуско-тормозными режимами и режимами кратковременного снижения частоты вращения. Они являются устройствами «мягкого» пуска и в этом качестве могут играть значительную роль в программах энергосбережения.

При рассмотрении вопросов применения в энергосберегающем вентиляторном электроприводе современных ПЧ необходимо учитывать, что многие из них целесообразно применять при реконструкции электроприводов постоянного тока с заменой двигателя на двигатель переменного тока. В

вентиляторных электроприводах их применение оправдано в тех случаях, когда по требованиям производства необходимо плавное регулирование в функции технологических датчиков с определенной точностью. С технической точки зрения существуют некоторые опасения по поводу массового их применения в промышленности во всех случаях, когда необходимо какое-либо регулирование. Дело в том, что работа преобразователи с частотами широтно-импульсной модуляции близкими к 10 кГц и выше требует особого качества изоляции двигателей. С учетом современного состояния парка электродвигателей многих вентиляторных электроприводов, возникает вероятность ускоренного износа их изоляции. Опыт длительной эксплуатации таких преобразователей на двигателях отечественного производства с большим сроком службы до модернизации пока отсутствует.

Анализ различных силовых структур двухзвенных ПЧ на полностью управляемых ключах, их стоимостные показатели, а также сопоставление современных силовых ключей с тиристорами показывает, что для массового электропривода при отсутствии жестких требований по качеству регулирования остается целесообразным применение устройств регулирования на однооперационных тиристорах. По этой причине НПЧ могут получить новое развитие, так как они обладают целым рядом достоинств, среди которых следует отметить простоту реализации. Главным препятствием для их массового применения в электроприводах вентиляторного типа является ограниченный в пределах до 20-25 Гц диапазон частот выходного напряжения. В связи с появлением на отечественном рынке достаточно дешевых современных программируемых средств управления создаются предпосылки для преодоления этого недостатка.

По отношению к вентиляторным электроприводам на основе АД с фазным ротором в данной главе рассмотрены перспективы применения АВК и режимов двойного питания. Проведен анализ известных способов повышения эффективности эксплуатации электроприводов на их основе.

Особое внимание уделено обоснованию возможности применения систем электроприводов на базе НПЧ для ступенчатого регулирования частоты вращения вентиляторных электроприводов. При этом учтено, что выходная частота НПЧ может регулироваться тремя способами: плавно, принимая любые произвольные значения в указанном выше диапазоне; дискретно, когда выходная частота имеет лишь определенные значения, соответствующие рациональному отношению входной и выходной частот; комбинированно, сочетая указанные выше два способа. В связи с этим, приведены значения частот, при которых достигается в известных системах НПЧ идентичность управляющих и выходных напряжений. Общеизвестно, что если не вводить паузу при смене полярности, то для НПЧ можно получать фиксированные выходные частоты. Однако, и при этих условиях проявляется влияние неполной управляемости тиристоров, что приводит к несимметрии выходных напряжений. При плавном регулировании эта несимметрия становится более заметной. По этой причине в практике эксплуатации разомкнутая система НПЧ проявила себя неработоспособной.

В настоящее время, в связи с расширением возможностей по применению программного управления на базе современных микроконтроллеров, появились условия для «жесткого» формирования выходного напряжения в НПЧ. При этом главным условием обеспечения режимов длительной работы на той или иной частоте вращения является обеспечение питания двигателя симметричным трехфазным напряжением. Для этого необходимо, чтобы в периоде выходного напряжения преобразователя количество пульсаций было кратным шести. Выражая период выходного напряжения через количество пульсаций  $N$  по формуле  $T_2 = T_1 N / m$ , где  $m$  – пульсность преобразователя, а  $T_1$  – период сетевого напряжения, выходную частоту и её относительное значение также можно представить в функции  $N$ :

$$f_2 = m / (T_1 N) \text{ и } f_2^* = f_2 / f_1 = m / N. \quad (2)$$

Для значений  $N$  кратных шести проведен расчет значений частот выходного напряжения НПЧ, при которых обеспечивается формирование симметричных трехфазных напряжений (табл.1).

Таблица 1

Значения выходной частоты НПЧ при симметричном напряжении

N		6	12	18	24	30	36	42	48
$f_2^*$	m=6	1,0	0,5	0,33	0,25	0,20	0,16	0,14	0,125
	m=12	2,0	1,0	0,66	0,5	0,4	0,33	0,28	0,25
	m=18	3,0	1,5	1,0	0,75	0,60	0,5	0,43	0,375
	m=24	4,0	2,0	1,33	1,0	0,80	0,66	0,57	0,5

Отсюда видно, что при повышении пульсности преобразователя можно получить дополнительные ступени симметричного трехфазного напряжения в рабочем диапазоне вентиляторных механизмов.

В завершении первой главы сформулированы основные задачи, решаемые в диссертационной работе.

**Во второй главе** проведен анализ известных силовых схем НПЧ с позиции реализации на их основе программного формирования ступеней фиксированных частот для энергосберегающего вентиляторного электропривода. Показано, что наиболее целесообразной для этих целей является трехфазная нулевая схема НПЧ (рис.1), позволяющая формировать как 3-пульсное, так и 6-пульсное напряжение. В этой связи данная схема выбрана в качестве базовой для создания объектно-ориентированных систем НПЧ-АД.

При разработке принципов программного формирования напряжения принято во внимание, что вентиляторные электроприводы в основной массе являются наиболее простыми с точки зрения формирования рабочих режимов.

По этой причине в системе НПЧ-АД с программным формированием напряжения предложено реализовать следующие принципы:

1. Исключается необходимость контроля проводящего состояния вентиляей

2. С учетом заметного снижения нагрузок при переходе на пониженные частоты вращения АД для формирования напряжения на каждой ступени фиксированной частоты достаточно применить наиболее простой закон управления - с постоянным углом подачи управляющих импульсов
3. Величины углов управления могут задаваться программно при настройке преобразователя для каждой ступени частоты.
4. Режим инвертирования при смене полярности напряжения не предусмотрен, снижение тока до нуля происходит на участках перехода синусоид в область отрицательных значений.

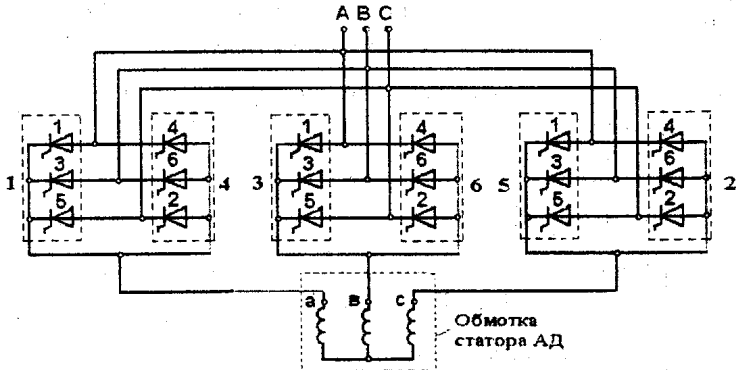


Рис.1. Силовая схема 6-ти пульсового 18-вентильного ПЧ

Для осуществления предложенных принципов управления исследована возможность применения в ПЧ коммутационных функций, реализованных в свое время в двухзвенных тиристорных преобразователях частоты с искусственной коммутацией вентилей с АИН (рис.2,а) и АИТ (рис.2,б).

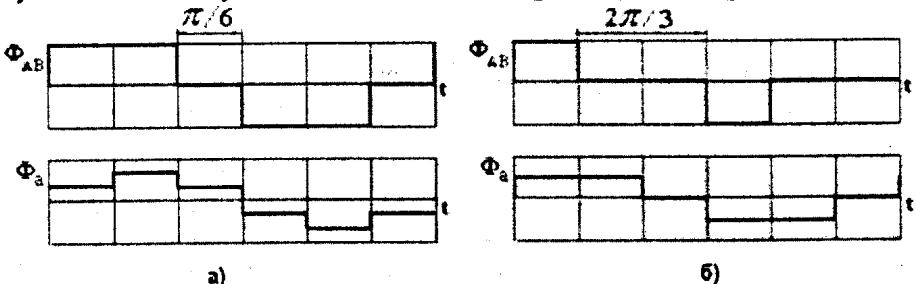


Рис.2. Характерные коммутационные функции: а) – для АИН; б) – для АИТ.

Линейные напряжения на нагрузке, подключенной к ПЧ с АИН, согласно рис.2,а, имеют паузу длительностью  $\pi/6$ , а в фазном напряжении она отсутствует. В ПЧ с АИТ создают паузу в линейном токе длительностью  $2\pi/3$  и в фазном токе длительность этой паузы составляет  $\pi/6$ . Это соответствует режиму, когда две фазы нагрузки получают питание, а третья отключена. Расчеты показали, что гармонический состав приведенных коммутационных функций фазных величин в обоих случаях примерно одинаков и величины

коэффициентов искажения соответственно равны 0,955 и 0,953. По этой причине коммутационная функция, соответствующая двухфазному питанию может быть принята в качестве одной из возможных при программном формировании напряжения в системе с НПЧ. При этом пауза при смене полярности тока, как показали исследования, является достаточной, для того чтобы отказаться от контроля состояния вентиляей.

В соответствие с коммутационной функцией двухфазного питания разработаны алгоритмы формирования 3-х и 6-пульсного напряжения со ступенями фиксированных частот 12,5 25 Гц симметричного трехфазного напряжения и 37,5 Гц – несимметричного напряжения. Пример формирования 6-пульсного напряжения на фазах активной нагрузки с частотой 25 Гц показан на рис.3.

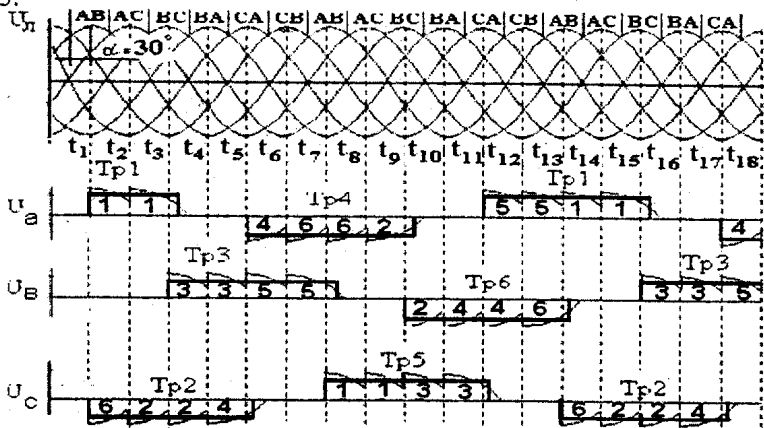


Рис.3 Пример формирования частоты 25 Гц.

Для описания процессов программного формирования напряжения в системе НПЧ-АД введены понятия результирующего вектора и переключающих функций, формирующих возможные положения результирующих векторов.

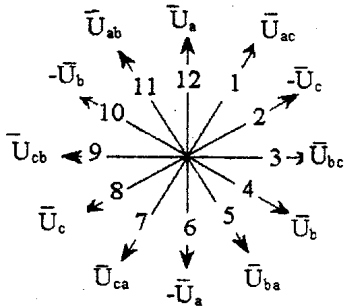


Рис.4. Возможные ориентации результирующего вектора

При частотном управлении с искусственной коммутацией вентиляей в соответствие с известными коммутационными функциями (рис.2) результирующий вектор вращается, занимая 6 устойчивых положений, причем режиму трехфазного питания обмоток статора АД (рис.2,а) соответствуют положения 2, 4, 6, 8, 10 и 12 (рис.4), а при реализации коммутационной функции двухфазного питания АД (рис.2,б) результирующий вектор вращается, занимая последовательно положения 1, 3, 5, 7, 9 и 11.

Выражение для результирующего вектора напряжения представлено в общем виде через переключающие функции  $F_i(i)$

$$\begin{aligned} \bar{U} = & F_1(t)\bar{U}_{ac} + F_2(t)(-\bar{U}_c) + F_3(t)\bar{U}_{bc} + F_4(t)\bar{U}_b + F_5(t)\bar{U}_{ba} + F_6(t)(-\bar{U}_a) + \\ & + F_7(t)\bar{U}_{ca} + F_8(t)\bar{U}_c + F_9(t)\bar{U}_{cb} + F_{10}(t)(-\bar{U}_b) + F_{11}(t)\bar{U}_{ab} + F_{12}(t)\bar{U}_a. \end{aligned} \quad (3)$$

Состояние каждой переключающей функции  $F_i(t)$  определяется состоянием определенной комбинации вентиляльных триад, для которых в свою очередь вводятся понятия «переключающая функция вентиляльной триады»  $Tp1, Tp2...Tp6$ . Тогда положение результирующего вектора в конечном итоге определяется состоянием вентиляльных триад

$$\begin{aligned} \bar{U} = & (Tp1 * Tp2)\bar{U}_{ac} + (Tp2 * Tp3)\bar{U}_{bc} + (Tp3 * Tp4)\bar{U}_{ba} + (Tp4 * Tp5)\bar{U}_{ca} + \\ & + (Tp5 * Tp6)\bar{U}_{cb} + (Tp6 * Tp1)\bar{U}_{ab}. \end{aligned} \quad (4)$$

Анализ алгоритмов формирования фиксированных частот с 3-пульсным напряжением при 2-х фазном питании АД показал, что при их реализации полностью исключена возможность короткого замыкания между группами вентилялей при смене полярности напряжения. Отдельно были рассмотрены условия, при которых исключается необходимость контроля состояния вентилялей при формировании 6-пульсного напряжения. Установлено, что при  $\alpha > 60^\circ$  также появляется возможность формирования напряжения без системы контроля состояния вентилялей.

Вопросы улучшения гармонического состава напряжения и тока в АД, на этапе разработки законов управления, связаны в первую очередь с улучшением их формы по гладкой составляющей. В связи с этим рассмотрена возможность снижения амплитуд 5-ой и 7-ой гармоник. Исследования гармонического состава напряжения элементарной функции разложения (рис.5) показывают, что при  $\varepsilon = \pi/3$  и  $\varepsilon = \pi/6$  5-я и 7-я гармоники имеют противоположные знаки, т.е. находятся в противофазе.

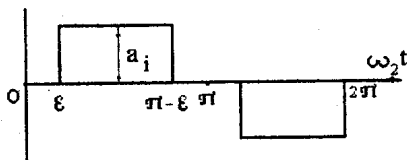


Рис. 5. Элементарная функция разложения в ряд Фурье

Это означает, что определенные виды коммутационных функций ступенчатой формы состоят из элементарных функций разложения, которые содержат указанные гармоники противоположного знака. При этом их результирующие значения удается значительно понизить.

Если, в соответствие с рис.2 паузу между полуволнами коммутационных функций линейных величин представить как фазовый угол управления линейного напряжения  $\alpha_n$ , то для различных значений этого угла в пределах от  $\alpha_n = \pi/6$  до  $\alpha_n = 2\pi/3$  можно провести гармонический анализ коммутационных функций, характеризующих промежуточное положение. В работе такой анализ проведен и установлено, что наилучшие показатели по гармоническому составу достигаются при  $\alpha_n = \pi/2$ . Это соответствует случаю, когда реализуют способ

формирования напряжения, при котором осуществляют чередование одинаковых по длительности интервалов двух и трехфазного питания обмоток двигателя в системе НПЧ-АД. В этом случае коэффициент искажения коммутационной функции принимает максимальное значение равное 0,982. Такой способ питания является предпочтительным в связи с тем, что при его осуществлении результирующий вектор напряжения занимает 12 фиксированных положений (рис.4), т.е. происходит более плавное вращение этого вектора. На рис. 6 показан пример формирования напряжения с частотой 25 Гц при чередовании интервалов 2-х и 3-х фазного питания активной нагрузки.

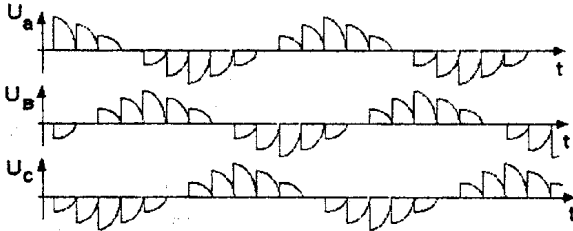


Рис 6. Формирования напряжения с частотой 25 Гц при чередовании интервалов 2-х и 3-фазного питания

При таком способе питания двигателя в системе НПЧ-АД с неизменным углом управления вентилями удастся получить на фазах двигателя трехступенчатое напряжение, что способствует улучшению гармонического состава его гладкой составляющей.

В зависимости от количества пульсаций в периоде выходного напряжения возможна реализация и других коммутационных функций, а именно с различными по длительности интервалами 2-х и 3-х фазного питания. При этом коэффициент искажения гладкой составляющей фазных величин находится на уровне выше 0,955.

Данный способ формирования напряжения позволяет наряду с симметричными трехфазными напряжениями получать и несимметричные с частотами 30 Гц и 37,5 Гц. Их формирование при вентиляторном характере нагрузки позволяет заметно расширить диапазон частотного регулирования в системе НПЧ-АД с программным формированием напряжения

**В третьей главе** рассмотрены вопросы разработки математического описания алгоритмов программного формирования напряжения и в целом математической модели системы НПЧ-АД для компьютерного моделирования процессов в вентиляторном электроприводе в режимах пуска и длительной работы при формировании различных значений фиксированной частоты вращения.

Анализ методов исследования процессов в НПЧ показывает, что наиболее приемлемыми с позиции простоты и наглядности являются методы гладкой составляющей и переключающих функций, а с учетом того, что в настоящее время значительно расширились возможности компьютерного моделирования, все более широкое применение находит метод универсальных математических моделей. В основе его лежит расчет мгновенных значений токов и напряжений на любых элементах исследуемого устройства. Такие модели, как правило,



позволяют на интервалах между переключениями вентилей формировать системы уравнений вентильной цепи.

Для математического описания процессов в системе НПЧ-АД предложено взять за основу интегро-дифференциальное уравнение, выражающее потенциал любой точки схемы замещения

$$\sum e - \sum_k i r_k - \sum_m \frac{di}{dt} L_m - \sum_l \frac{1}{C_l} \int i dt = \varphi \quad (5)$$

Учитывая, что при программном формировании напряжения создаются конкретные коммутационные интервалы двух- или трех фазного питания АД, в процессе разработки модели появляется возможность воспользоваться однотипными системами уравнений для режимов 2-х фазного и 3-х фазного питания нагрузки. Работоспособность модели, наряду с корректным математическим описанием состояния системы НПЧ-нагрузка в межкоммутационных интервалах, определяется контролем на каждом шаге вычислений условий, при которых происходит переключение вентилей. Для этого в специальном блоке моделирующей программы вычисляются потенциалы контрольных точек схемы. В работе сформулированы условия, по которым определяется состояние вентилей и описаны процедуры их определения.

Исследования работы НПЧ на пассивную нагрузку активного и активно-индуктивного характера позволили установить работоспособность модели. При этом на модели точно в соответствие с программой формирования напряжения осуществлялась последовательность «раздачи управляющих импульсов» на тиристоры НПЧ, а также было установлено выполнение принятых условий открытия и поддержания проводящего состояния вентилей и их запираания.

Для удобства представления алгоритмов программного формирования напряжения в процессе моделирования и для наглядности их описания в работе введены понятия простейших переключающих функций вентилей, характеризующих состояние тиристоров трехфазного моста, а именно  $V_1, V_3, V_5$  для тиристоров анодных групп и  $V_2, V_4, V_6$  для тиристоров катодных групп вентилей. На их основе получена логическая функция СИФУ, устанавливающая связь между состояниями комбинаций вентилей и подачей в нагрузку определенных участков синусоид линейного напряжения, а также последовательность проверки состояния тиристоров.

Описание последовательности изменения состояния переключающих функций тиристоров и вентильных триад, к которым они относятся, позволяет наглядно представить алгоритмы управления вентилями. С целью обобщения математического описания алгоритмов формирования ступеней частот, представленных в табл.1, в качестве главного параметра, характеризующего период и частоту выходного напряжения НПЧ было принято количество пульсаций питающего напряжения  $N$  в периоде выходного, тогда количество пульсаций сетевого напряжения в каждом фиксированном положении результирующего вектора напряжения составит  $N/6$  при реализации 2-х фазного

питания и  $N/12$ - при чередовании интервалов двух- и трехфазного питания. За единицу времени принимается длительность одной пульсации питающего напряжения. В течение этого интервала в стационарном режиме остается неизменным проводящее состояние заданной комбинации вентилей. Для конкретизации математического описания алгоритмов предложено осуществить «жесткую» привязку начала функционирования любого алгоритма к конкретному линейному напряжению. Тогда для переключающих функций  $F_i$  (3), определяющих положение результирующего вектора, можно записать соответственно для нечетных и четных порядковых номеров (рис.4)

$$F_i = T_{pj} * T_{pj+1} \sum_{n=(i-1)N/12+1}^{iN/12} (V_{k-1} * V_k)_n; \quad F_i = T_{pq} * T_{pq+1} * T_{pq+2} \sum_{n=(i-1)N/12+1}^{iN/12} (V_{k-1} * V_k)_n, \quad (6)$$

где  $n$ - номер пульсации напряжения внутри периода,  $j = (i+1)/2$ - порядковый номер нечетной переключающей функции вентильной триады, при  $j=6$ , величине  $j+1$  присваивается значение, равное «единице» и  $q = i/2$ - порядковый номер четной переключающей функции вентильной триады, при  $q=6$ , величинам  $q+1$  и  $q+2$  присваиваются соответственно значения «один» и «два».

В комплексной форме результирующий вектор напряжения представляется

$$\begin{aligned} \text{в виде } \dot{U} = & \left[ T_{pj} * T_{pj+1} \sum_{n=(i-1)N/12+1}^{iN/12} (V_{k-1} * V_k)_n \right] U_i \exp(j \frac{\pi}{6} i) + \\ & + \left[ T_{pq} * T_{pq+1} * T_{pq+2} \sum_{n=(i-1)N/12+1}^{iN/12} (V_{k-1} * V_k)_n \right] U_i \exp(j \frac{\pi}{6} i). \end{aligned} \quad (7)$$

На основе полученных выражений появляется возможность для любого номера пульсации  $n$  при заданном значении  $N$  достаточно просто определить положение результирующего вектора.

При разработке модели АД в координатах «а в с» приняты за основу эквивалентная катушечная модель АД и уравнения электрического равновесия в общепринятой дифференциальной форме записи для статорной и роторной цепей с учетом электромагнитной связи между ними. Конкретизация записи уравнений позволила получить подробную структурную схему АД и на её основе компьютерную модель двигателя. Работоспособность модели оценивалась по результатам моделирования типовых процессов пуска и наброса нагрузки, а также путем установления основных показателей номинального режима. В дальнейшем сопряжение модели двигателя и преобразователя позволило получить работоспособную модель всей системы НПЧ-АД с программным формированием напряжения. Адекватность модели и реальной системы НПЧ-АД аргументирована в работе без привлечения дополнительного математического аппарата. Сопоставление экспериментальных осциллограмм и расчетных, полученных на модели при задании условий реального эксперимента, показали их практическое сходство (рис.7). Кроме того, практическое равенство основных характеристик электромеханического преобразования энергии (токов, напряжений, и гармонического состава)

установленное при сравнении результатов обработки осциллограмм и расчетов на модели позволяет принять результаты моделирования достоверными.

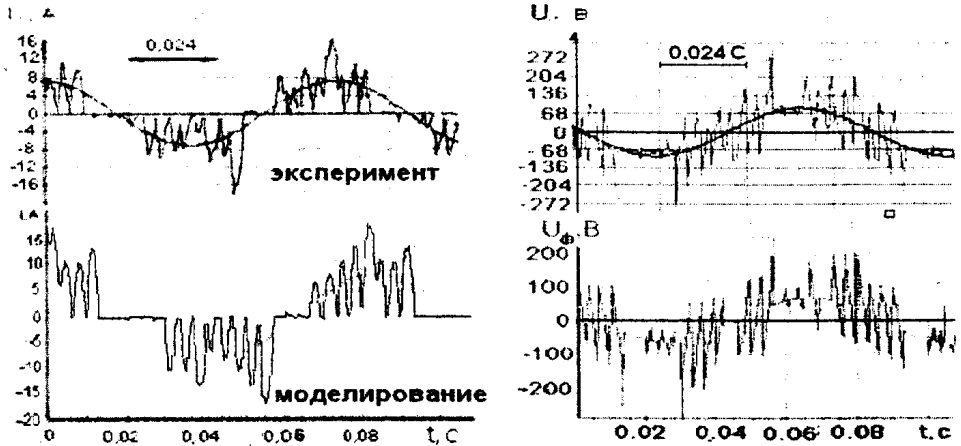


Рис. 7. Экспериментальные и расчетные осциллограммы токов и напряжений при программном формировании частоты 12,5 Гц

По результатам исследования режимов пуска на модели была установлена возможность реализации многоступенчатого частотного пуска АД с вентиляторной нагрузкой. При этом эквивалентный среднеквадратичный ток в 1,5 раза меньше по сравнению с током при пуске в режиме фазового управления на частоте 50 Гц. Максимальный пик тока, как показали исследования, не превышает 2-х амплитудных значений номинального тока. Исследования пуска АД в системе с НПЧ в режиме фазового управления при формировании фиксированных ступеней частот 12,5; 25 и 30 Гц показали, что пуск на отдельные ступени частот вращения может осуществляться с токами, пик которых не превышает 1,5 значения амплитуды номинального тока.

Особое внимание в работе уделено исследованиям разомкнутой системы НПЧ-АД при программном формировании режимов длительной работы вентиляторных электроприводов на фиксированных частотах. В результате установлено существование ярко выраженного экстремума в фазном токе двигателя, что нашло подтверждение и при экспериментальных исследованиях. Исследования показали, что заметное влияние на характер коммутационных процессов в системе электропривода оказывает фазовый угол сдвига между первыми гармониками тока и напряжения статора (коэффициент мощности АД по первым гармоникам, определяемый как  $\cos\varphi_{AD(1)}$ , который зависит на каждой фиксированной частоте от соотношения «момент нагрузки-напряжение»). Установлено, что при низком значении  $\cos\varphi_{AD(1)}$  характер процессов в двигателе становится колебательным. Форма тока при этом значительно ухудшается за счет появления заметных бросков тока на отдельных интервалах пульсаций питающего напряжения (рис.8, а и б). При повышении величины  $\cos\varphi_{AD(1)}$  до

значений выше 0,8 полуволны тока становятся симметричными и колебательность исчезает.

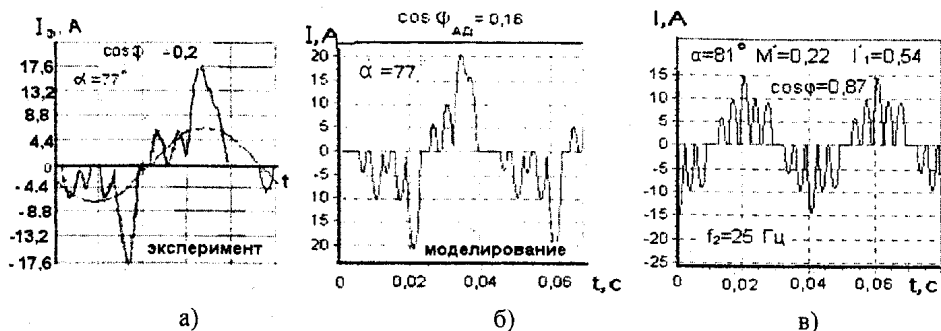


Рис. 8. Влияние  $\cos\varphi_{AD(1)}$  на форму тока статора АД.

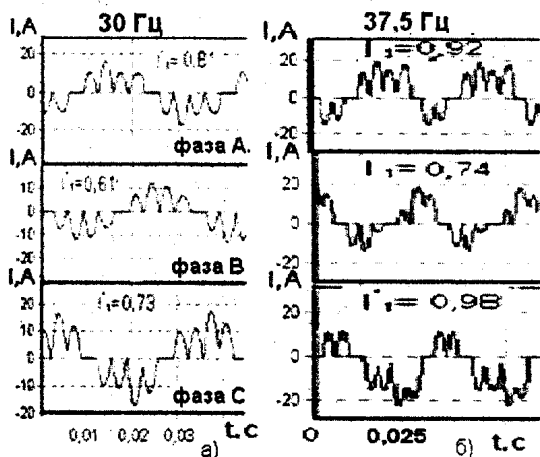


Рис. 9. Токи статора АД при формировании напряжений с частотой 30 и 37,5 Гц

Моделирование процесса формирования в системе НПЧ-АД ступеней несимметричных трехфазных напряжений с частотами 30 и 37,5 Гц показало существование возможности заметного расширения диапазона рабочих скоростей вращения вентиляторного электропривода. При этом установлено, что греющие потери в двигателе составляют соответственно 52 и 78% от потерь в двигателе при номинальном токе статора.

В четвертой главе рассмотрены вопросы разработки и исследования многопульсных систем НПЧ-АД и способов формирования напряжения с целью расширения диапазона регулирования вентиляторных электроприводов, включая высоковольтные.

Для расширения диапазона частотного регулирования и улучшения формы тока в работе проведены исследования нового способа формирования напряжения на двигателе. Сущность его заключается в поочередной подаче на двигатель напряжения от 2-х потенциально несвязанных 6-пульсных НПЧ, получающих питание от трехфазных систем сдвинутых по фазе на 30 эл. градусов, что позволяет формировать на двигателе 12-пульсное напряжение. При разработке модели предложенной системы НПЧ-АД были приняты те же допущения, что и для исходного варианта модели 6-пульсного НПЧ. В

компьютерной реализации она состоит из двух параллельно работающих моделей 6-пульсного НПЧ.

Для оценки работоспособности модели были проведены исследования работы преобразователя на активную нагрузку (рис.10 а,б и в) в режиме программного формирования фиксированных частот 12,5; 25 и 33 Гц симметричного трехфазного напряжения. Из расчетных кривых видно, что на модели 12-пульсного НПЧ «подача управляющих импульсов» на тиристоры осуществляется в строгом соответствии с алгоритмом управления.

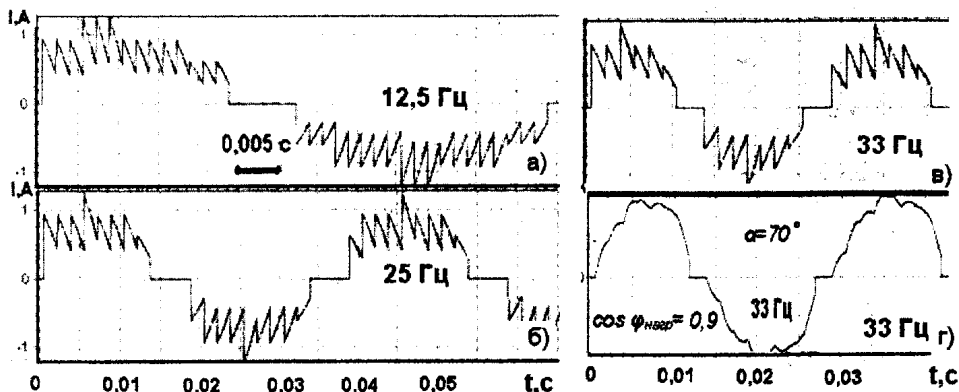


Рис.10. Расчетные осциллограммы тока при программном формировании напряжения в системе 12-пульсный НПЧ-АД.

Моделирование работы преобразователя на активно-индуктивную нагрузку (рис.10, г) показало возможность формирования симметричного трехфазного напряжения с частотой 33 Гц с формой фазного тока близкой к синусоидальной.

Так как частота 33 Гц является одной из основных в диапазоне рабочих частот вентиляторного электропривода, то значительное внимание в работе уделено исследованиям системы НПЧ-АД в режиме формирования этой частоты. С этой целью модель 12-пульсного НПЧ сопряжена с моделью АД, которая использовалась в процессе моделирования системы с 6-пульсным НПЧ. В результате исследований установлен рабочий диапазон изменения угла управления. В нижнем его пределе система НПЧ-АД находится на грани установления колебательного процесса. При этом возникновение колебаний частоты вращения приводит к заметной модуляции амплитуды тока статора. Таким образом, исследуемая система электропривода в разомкнутом состоянии является критичной к выбору рабочего угла управления, что особенно важно, когда решается задача формировании режимов длительной работы на заданной частоте. На рис.11 построены зависимости  $I^*$ ,  $U^*$  и  $\cos \varphi_{\text{АД}}$  от угла управления  $\alpha$ . Кривая тока, как видно из графиков, имеет экстремальный характер с выраженным минимумом. По мере увеличения угла управления преобразователем ток статора АД сначала снижается, а затем наблюдается его рост. Напряжение в указанном диапазоне увеличения угла управления

монотонно снижается. По данным графикам определяются пределы изменения угла управления для установления длительного режима работы. Ток и напряжение статора в рабочем режиме достаточно близки по форме к синусоиде. На рис.12 приведены фрагменты осциллограмм и гистограммы гармонических составляющих тока и напряжения АД. В частности, как показали расчеты, коэффициент искажения синусоидальности тока составляет 0,98, а напряжения 0,965.

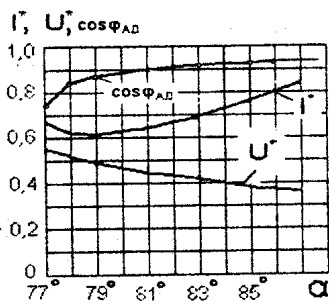


Рис.11. Основные характеристики для установления рабочего режима

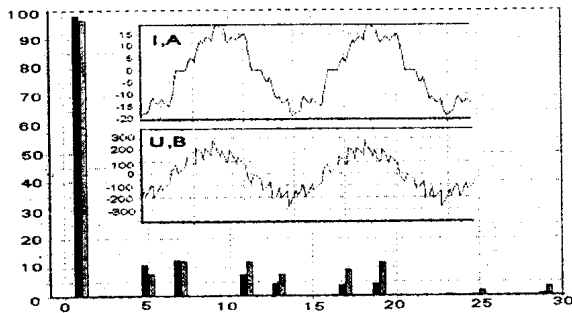


Рис.12. Результаты гармонического анализа и осциллограммы тока и напряжения.

Таким образом, предложенный способ формирования напряжения на двигателе позволяет наряду с расширением диапазона частотного регулирования заметно улучшить форму тока на частоте 33 Гц. Исследования показали также возможность длительной работы на данной частоте с номинальным моментом нагрузки на валу двигателя.

Вентиляторный электропривод мощностью свыше 500 кВт является высоковольтным и ориентирован на питание напряжением 3,15; 6,3 или 10,5 кВ. В настоящее время на этих механизмах начинают внедряться высоковольтные преобразователи частоты. В работе показаны основные варианты построения таких преобразователей. Среди них представляется интересным вариант, основанный на применении силовых модулей низковольтного исполнения, в котором реализована идея суммирования напряжений вторичных обмоток трехфазного трансформатора. Одновременно реализуется возможность увеличения пульсности напряжения в НПЧ и расширения диапазона программного формирования фиксированных ступеней частот. В данной главе показано, что для решения задач ступенчатого регулирования частоты вращения в высоковольтном вентиляторном электроприводе имеет преимущества 18-пульсный каскадный НПЧ с суммированием линейных напряжений двух групп вторичных обмоток трансформатора, силовая схема которого и способ формирования напряжения разработаны в рамках данной диссертационной работы. В этом преобразователе, в отличие от рассмотренных вариантов НПЧ, формируется ступень трехфазного симметричного напряжения с частотой 37,5 Гц, что способствует дальнейшему расширению диапазона регулирования в системе НПЧ-АД. Эта частота во многих случаях эксплуатации вентиляторных

приводов может оказаться основной для создания энергосберегающего режима длительной работы. Согласно известному соотношению «напряжение-частота» для случаев работы электропривода с вентиляторной нагрузкой на частоте 37,5 Гц достаточно питать двигатель напряжением не более 60% от номинального значения. Учитывая, что большинство вентиляторных электроприводов проектировались с запасом по мощности, то на указанной рабочей частоте может оказаться достаточным выходное напряжение преобразователя на уровне не более 50% от номинального. При существующих пределах по классу напряжения современных тиристоров (не менее 40-го класса) появляется реальная возможность создания различных вариантов построения систем НПЧ-АД для высоковольтного электропривода. На рис. 13 приведена силовая схема системы 18-пульсный НПЧ-АД.

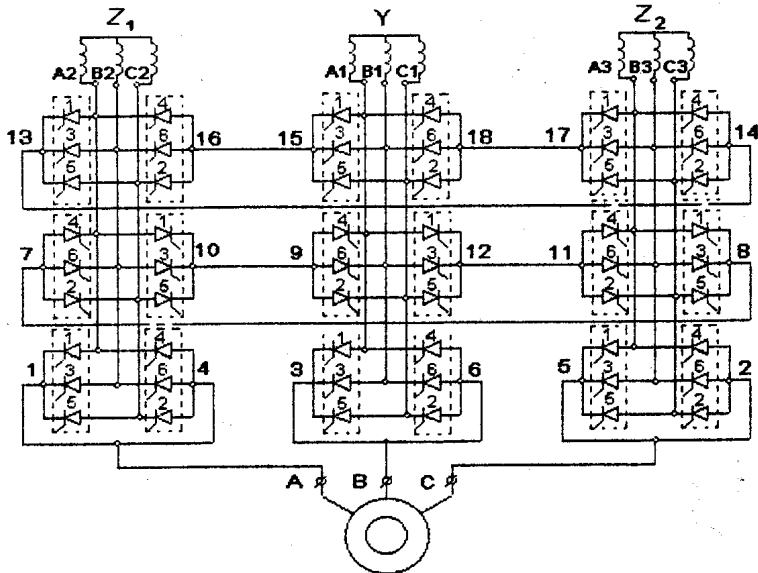


Рис. 13. Силовая схема системы 18-пульсный НПЧ-АД с программным формированием напряжения

Ниже на рис. 14 дано пояснение принципа формирования частоты 37,5 Гц. на примере линейного напряжения  $U_{AB}$ .

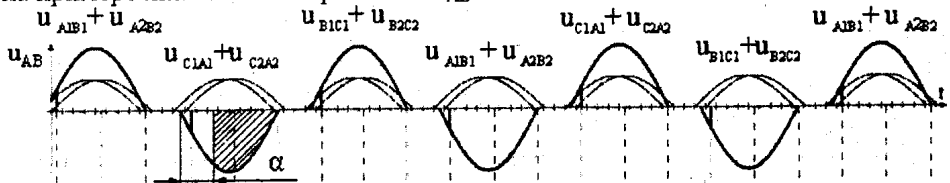


Рис. 14. Принцип формирования линейного напряжения с частотой 37,5 Гц.

Наличие паузы между полуволнами линейного напряжения длительностью в  $60^\circ$  сетевого напряжения и введение угла запаздывания подачи

управляющих импульсов  $\alpha_{\text{НПЧ}}=60^\circ$  позволяет реализовать коммутационную функцию с чередованием одинаковых интервалов 2-х и 3-фазного питания АД. Период повторяемости подачи импульсов на заданные комбинации вентилялей мостов состоит из 18 одинаковых временных интервалов, общая длительность которых составляет три периода сетевого напряжения. Алгоритм управления вентилями представлен на основе переключающих функций 18 вентиляльных триад и 6 переключающих функций тиристоров совокупностью 18 логических выражений.

Практическая реализуемость предложенных алгоритмов управления вентилями и работоспособность преобразователя были проверены в процессе моделирования его работы на активную и активно-индуктивную нагрузки. При разработке модели были приняты те же допущения, что и для 6-пульсного НПЧ. Коэффициент искажения тока при активно-индуктивной нагрузке с  $\cos\varphi=0,8$  на данной частоте достигает значения 0,99, а при формировании частоты 25 Гц – 0,985. В результате моделирования работы предложенной системы НПЧ-АД с вентиляторной нагрузкой получены результаты (рис. 15), подтверждающие возможность применения данной системы для целей энергосбережения в вентиляторных электроприводах.

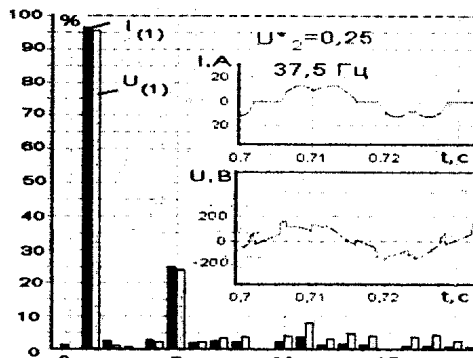


Рис. 15. Результаты моделирования системы 18-пульсный НПЧ-АД.

Коэффициент искажения формы тока, как показали расчеты, составляет 0,96. Реализация рабочего режима достигается при величинах напряжений на вторичных обмотках трансформатора на уровне 25-27 % от номинального напряжения двигателя. Это позволяет осуществить для двигателя 3,15 кВт формирование данной частоты напряжениями ниже 1000В, т.е. можно воспользоваться устройствами низковольтного исполнения.

По результатам исследований определены также пределы изменения углов управления для формирования режимов длительной работы вентиляторного электропривода. Установлено, что минимум тока лежит на границе устойчивого режима работы системы НПЧ-АД. На основе моделирования получены также и другие характеристики рабочего режима. Исследования показали возможность пуска двигателя при программном формировании напряжения с частотой 37,5 Гц в режиме фазового управления. При этом амплитуда пускового тока составляет  $1,65I_{\text{max}}$ . Полученные результаты исследований позволяют серьезно ставить задачи по созданию для ряда электроприводов вентиляторного типа преобразователей предложенной конструкции.

В пятой главе определены соотношения для расчета напряжения при частотном регулировании с целью минимизации тока в системе НПЧ-АД с



программным управлением, а также предложена методика расчета первой гармоники напряжения в функции угла управления.

Проанализирована возможность применения известных законов частотного управления АД при формировании режимов работы на фиксированных частотах напряжения. В связи с этим, обоснована актуальность разработки простых методов расчета величин напряжения питания двигателя и углов управления преобразователем для формирования рабочих режимов вентиляторного электропривода, при которых достигается режим устойчивой работы с минимальным током и максимальным коэффициентом мощности. Известные методы расчета являются достаточно сложными. В одних случаях требуется наличие кривой намагничивания и необходимость перехода к параметрам схемы замещения в относительных единицах, что не всегда удобно в инженерных расчетах, в других случаях расчеты опираются на определение суммарных потерь на каждой фиксированной частоте.

В данной главе рассматривается возможность применения для этих целей более наглядного метода, опирающегося на аналитические выражения, которые получены в работе на основе соотношений, вытекающих из круговых диаграмм. В результате получены условия, при которых в АД устанавливается минимальный фазовый сдвиг между током и напряжением статора (максимальный  $\cos\varphi_{AD}$ ). Проведены расчеты параметров Г-образной «точной» схемы замещения АД при питании различными фиксированными частотами напряжения с учетом изменения потерь в стали в функции частоты. На основе оценки характера изменения параметров схемы замещения и геометрических параметров круговой диаграммы в функции частоты показана возможность получения новых расчетных формул, позволяющих определить оптимальные соотношения «момент нагрузки на валу двигателя – напряжение статора» для фиксированной частоты с позиции минимизации тока статора. На рис.16. приведена круговая диаграмма АД, где введен новый геометрический параметр  $\theta$ - косвенный угол нагрузки.

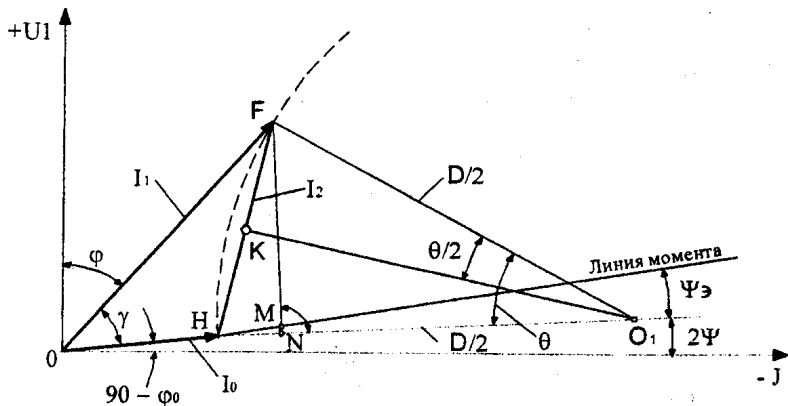


Рис.16. Представление косвенного угла нагрузки  $\theta$  на круговой диаграмме АД.

В функции этого параметра установлены основные аналитические соотношения для токов статора и ротора АД, момента на валу двигателя, напряжения статора и для расчета  $\cos\varphi_{ад}$ :

$$I_2 = \frac{U_1}{X_k} \sin \frac{\theta}{2} e^{-j(\frac{\theta}{2} - 2\Psi)}; \quad (8)$$

$$I_1 = I_0 - I_2 = U [Z_0^{-1} e^{-j\varphi_0} + X_0^{-1} \sin \frac{\theta}{2} e^{-j(\frac{\theta}{2} - 2\Psi)}]; \quad (9)$$

$$M = \frac{3U_1^2}{X_k \omega_1} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} (1 - \operatorname{tg} \frac{\theta}{2} \operatorname{tg} \Psi_3); \quad (10)$$

$$U_1 = \sqrt{\frac{M X_k \omega_1}{3 \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} (1 - \operatorname{tg} \frac{\theta}{2} \operatorname{tg} \Psi_3)}}; \quad (11)$$

$$\varphi_{ад} = \operatorname{arctg} \frac{Z_0^{-1} \sin \varphi_0 + X_k^{-1} \sin \frac{\theta}{2} \sin(\frac{\theta}{2} - 2\Psi)}{Z_0^{-1} \cos \varphi_0 + X_k^{-1} \sin \frac{\theta}{2} \cos(\frac{\theta}{2} - 2\Psi)} \quad (12)$$

На рис.17 приведены расчетные кривые зависимостей  $U, I, \varphi = f(\theta)$ , полученные для напряжения при значениях частоты 50, 37.5, 30, 25 и 12.5 Гц.

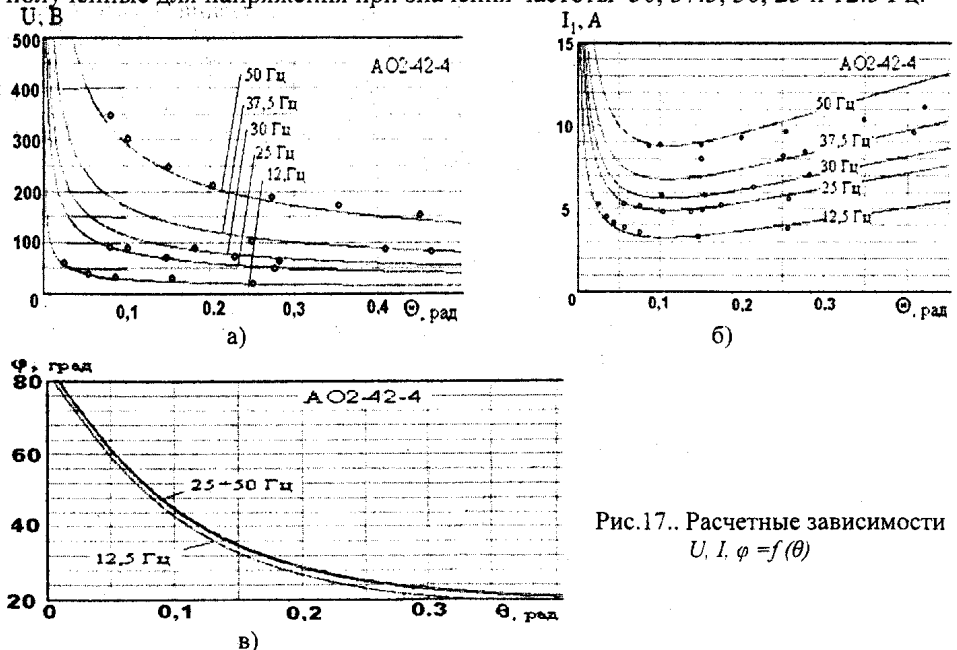


Рис.17.. Расчетные зависимости  $U, I, \varphi = f(\theta)$

При проведении расчетов для каждой ступени частоты момент в выражении (11) задавался неизменным по величине и равным значению в соответствие с механической характеристикой вентиляторного механизма. Анализ кривых напряжения показывает, что рост угла нагрузки  $\theta$  происходит при снижении напряжения, подаваемого на двигатель (рис. 17,а). Представляют практический интерес результаты расчетов, на основании которых получены экстремальные характеристики тока двигателя (рис.17,б). Согласно этим кривым, минимальное значение тока на различных ступенях частоты питающего напряжения и нагрузке вентиляторного характера достигается примерно при одном и том же значении косвенного угла нагрузки  $\theta=0,11-0,12$  рад, или в градусах  $\theta^\circ=6,3^\circ-6,8^\circ$ . Это соответствует фазовому сдвигу между основными гармониками тока и напряжения статора равному примерно  $38-40^\circ$ . На этих же графиках показаны действующие значения первых гармоник напряжения и тока, рассчитанных в процессе моделирования стационарных режимов работы системы 6-пульсный НПЧ-АД при формировании фиксированных частот питающего напряжения. Откуда видно, что в области устойчивой работы системы НПЧ-АД наблюдается практическое совпадение значений токов и напряжений, полученных на основе моделирования по дифференциальным уравнениям и по упрощенной методике с применением соотношений (8)-(12).

В результате исследований было установлено, что работоспособность разомкнутой системы НПЧ-АД во многом зависит от соотношения «напряжение-момент на валу двигателя». При формировании завышенного значения напряжения в системе электропривода возникают колебания и появляются заметные броски тока. В связи с этим, в стационарном процессе необходимо обеспечивать работу системы НПЧ-АД с высоким  $\cos\phi_{\text{ад}}$ . Для достижения такого режима необходимо получить зависимость действующего значения первой гармоники выходного напряжения преобразователя от угла управления вентилями  $U^{(1)} = f(\alpha)$ . При этом принимается допущение о том, что в нагрузке с преобладающей активной составляющей сопротивления при дискретном формировании частоты и неизменном угле управления положительные и отрицательные полуволны состоят из практически одинаковых по форме и количеству участков синусоид сетевого напряжения. Используя выражение для ступенчатой элементарной функции разложения в ряд Фурье и с учетом влияния угла управления  $\alpha$  на величину  $\epsilon$  (рис.18) получены расчетные формулы для действующих значений первых гармоник 3-х и 6-пульсного напряжений при формировании фиксированных частот симметричных трехфазных напряжений:

$$U^{(1)}(\alpha) = 1,057 U_{2\phi} \left[ 1 - \sin\left(\alpha - \frac{\pi}{6}\right) \right] \cdot \cos(\epsilon_0 + \Delta\alpha); \quad (13)$$

$$U^{(1)}(\alpha) = 0,525 U_{2\phi} \left[ 1 + \cos\left(\frac{\pi}{6} + \alpha\right) \right] \cos\left[ \epsilon_0 + \left(\alpha - \frac{\pi}{3}\right)/2p \right]; \quad (14)$$

$$U^{(1)} = U_{2\phi} \cdot \left[ 1 - \sin\left(\alpha - \frac{\pi}{6}\right) \right] \cdot [0,69 \cos(\varepsilon_1 + \Delta\alpha_1) + 0,35 \cdot \cos(\varepsilon_2 + \Delta\alpha_2) + 0,35 \cdot \cos(\varepsilon_3 + \Delta\alpha_3) ] \quad (15)$$

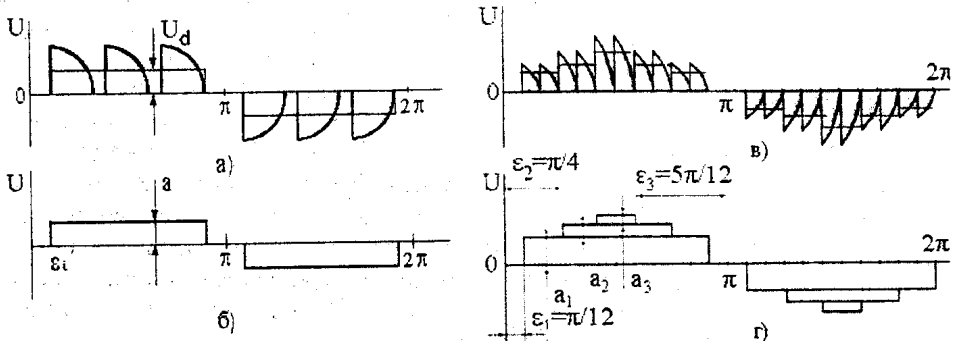


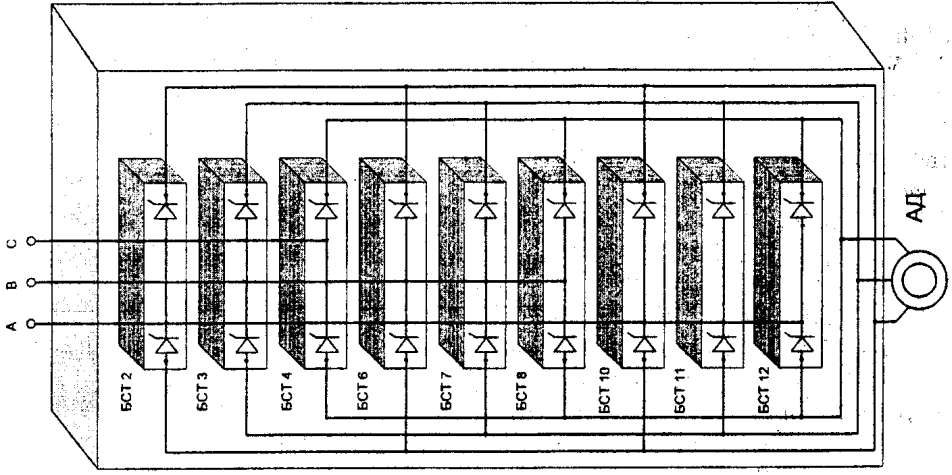
Рис. 18. Ступенчатое представление напряжения НПЧ.

Расчеты по формулам (13)-(15) позволяют определить значения углов управления  $\alpha$  при реализации соответственно алгоритмов формирования 3-пульсного и 6-пульсного с двухфазным питанием АД, а также 6-пульсного с чередованием интервалов двух- и трехфазного питания обмоток статора АД для установления требуемых уровней напряжения.

В шестой главе рассмотрены особенности реализации традиционных способов совместного и отдельного управления НПЧ. Выделены особенности НПЧ с отдельным программным управлением. Показано, что на основе современных программируемых средств можно заметно упростить систему управления преобразователем за счет программного формирования напряжения. Приведено описание управляющего контроллера, разработанного для реализации программного управления на экспериментальной установке. На рис. 19 показана функциональная структура данной системы. Экспериментальный образец НПЧ получен в результате перепрофилирования реверсивного преобразователя постоянного тока типа АТР-1000. В основу разработки программируемого контроллера была заложена концепция прямого цифрового управления силовыми элементами преобразователя частоты.

В состав системы управления входят следующие узлы и компоненты: одноплата универсальная система управления, ядром которой является микроконтроллер фирмы ATMEL AT89S8252, пульт оперативного управления с двухстрочным жидкокристаллическим дисплеем POWER TIP PC-1602FA и клавиатурой с матрицей клавиш 5x4, интерфейсная плата гальванической развязки на 18 выходов, соответствующих количеству тиристоров в силовой схеме и плата ввода внешних сигналов.

Для компьютеризации исследований системы НПЧ-АД с программным формированием выходного напряжения был специально разработан и изготовлен многоканальный компьютерный регистратор. Применение такого



Преобразователь типа АТР-10000

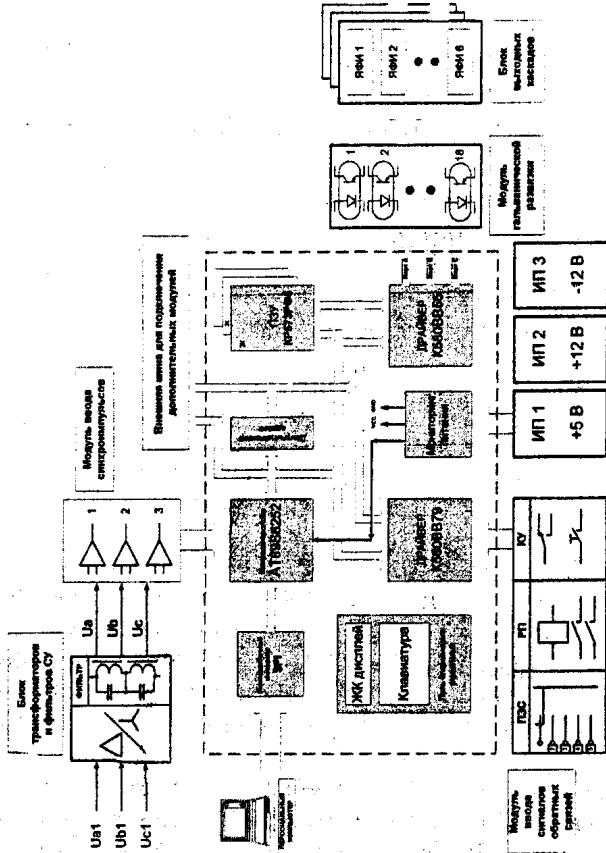


Рис. 19. Функциональная схема системы НПЧ-АД с программным формированием напряжения.

регистратора позволило создать массивы экспериментальных данных в виде совокупности мгновенных значений фазных токов и напряжений. В дальнейшем их обработки были привлечены современные математические программные пакеты и табличные процессоры. В результате удалось получить осциллограммы токов и напряжений двигателя и провести расчеты их действующих значений, а также энергетических параметров. Кроме того, появилась возможность при необходимости осуществить гармонический анализ токов и напряжений.

В экспериментальной части работы были поставлены и решены следующие задачи: осуществлена практическая реализация разработанных алгоритмов программного формирования ряда ступеней частот выходного напряжения в базовой схеме НПЧ, установлена работоспособность разомкнутой системы, а также определены электромеханические и энергетические характеристики систем электропривода и пути их улучшения.

На рис.20 приведены экспериментальные механические характеристики асинхронного двигателя при программном формировании питающего напряжения.

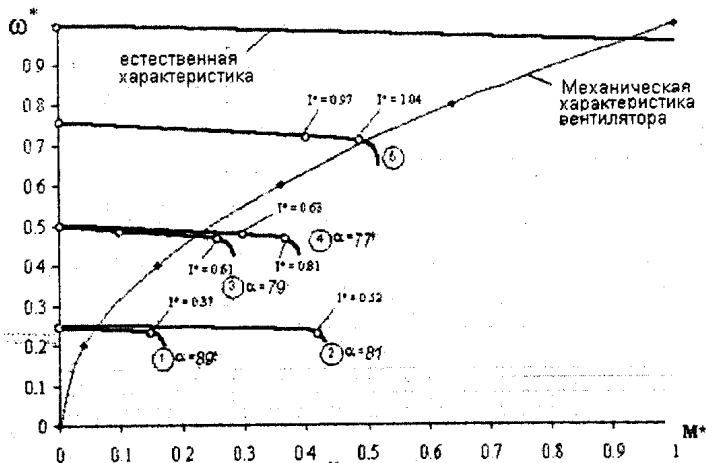


Рис.20. Экспериментальные механические характеристики при программном формировании напряжения НПЧ.

Характеристики 1 и 2 получены при формировании частоты  $f_2=0,25f_1$  и углах управления  $\alpha$  соответственно равных  $89^\circ$  и  $81^\circ$ . Установлено, что при данной частоте может быть обеспечена длительная работа вентиляторного механизма с действующим значением фазного тока статора равным  $0,3I_{1н}$ , а при формировании частоты  $f_2=0,5f_1$  действующее значение фазного тока не превышает  $0,6I_{1н}$ .

По результатам исследований было установлено влияние момента нагрузки на валу двигателя на характер изменения тока статора при неизменном угле управления  $\alpha$ . Для ряда значений угла  $\alpha$  на рис.21 построены зависимости,

характеризующие изменение первой гармоники тока статора от момента  $I_{(1)}=f(M)$  при частоте 25 Гц. Указанные зависимости имеют экстремальный характер. Отдельно следует обратить внимание на характер изменения напряжения на выходе преобразователя при изменении нагрузки на двигателе. На рис. 22 приведены зависимости  $U_{(1)}=f(\varphi_{\text{АД}})$ , построенные для различных значений угла управления  $\alpha$ . Приведенные зависимости показывают, что по мере уменьшения фазового угла  $\varphi_{\text{АД}}$  (увеличения момента нагрузки на валу двигателя), напряжение в системе НПЧ-АД падает. В этом проявляется влияние характера нагрузки на коммутационные процессы в преобразователе.

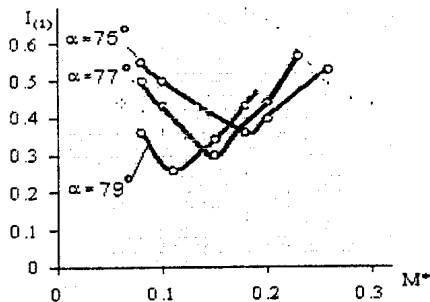


Рис.21. Зависимости  $I_{(1)}=f(M)$ .

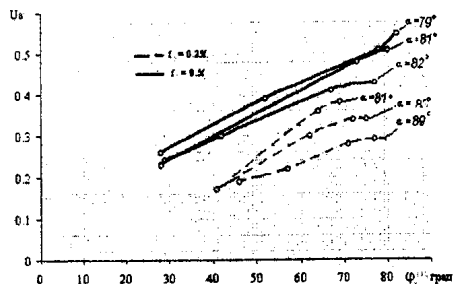


Рис.22. Зависимости  $U_{(1)}=f(\varphi_{\text{АД}})$ .

Анализ характера изменения тока на осциллограммах показывает, что на форму тока заметно влияет угол фазового сдвига между первыми гармониками тока и напряжения. По мере увеличения  $\cos \varphi_{\text{АД}}$  форма тока улучшается, и коэффициент искажения в отдельных случаях достигает значений 0,95.

При формировании несимметричной системы трехфазных напряжений, например, фиксированной частоты 37,5 Гц, гармонический состав токов в двигателе ухудшается за счет появления постоянной составляющей. В то же время установлено, что их результирующая намагничивающая сила практически равна нулю и они по этой причине не оказывают влияние на формирование электромагнитного момента двигателя. Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что программное формирование напряжения с фиксированными частотами в системе НПЧ-АД способствует расширению области их применения за счет возможности создания на их основе объектно-ориентированных электроприводов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе решена важная научно-техническая проблема, посвященная разработке научных основ создания энергосберегающего электропривода вентиляторных механизмов по системе НПЧ-АД с программным формированием напряжения, обеспечивающего ступенчатое регулирование частоты вращения с применением более простых и дешевых объектно-ориентированных средств управления на базе отечественных тиристоров.

Разработаны и научно обоснованы технические решения, направленные на создание перспективных систем энергосберегающего электропривода, внедрение которых вносит значительный вклад в создание новых средств регулирования на отечественной элементной базе.

Получены следующие основные результаты:

1. На основе анализа состояния электроприводов переменного тока в промышленности, и оценки требований, предъявляемых к электроприводам вентиляторного типа в условиях ОАО «ММК», обоснована с позиции энергосбережения целесообразность ступенчатого регулирования частоты вращения электроприводов вентиляторного типа.
2. Предложены принципы программного формирования напряжения в системе НПЧ-АД, на основе которых, с учетом особенностей характеристик вентиляторных электроприводов, решается задача существенного упрощения системы и алгоритмов управления вентилями за счет исключения узлов контроля проводящего состояния вентилей при смене полярности полуволн тока и узлов формирования многофазных сигналов управления.
3. Разработаны новые способы формирования напряжения с различными степенями фиксированных частот в системе НПЧ-АД, в основе которых лежит реализация коммутационных функций двухфазного питания АД и режимов, при котором, осуществляют чередование интервалов двух- и трехфазного питания двигателя с постоянным углом управления на каждом интервале пульсации.
4. Разработаны системы и алгоритмы программного управления вентилями НПЧ с различной пульсностью выходного напряжения, позволяющие формировать длительные режимы работы электропривода при питании симметричными и несимметричными трехфазными напряжениями с различными фиксированными частотами.
5. Предложены новые силовые схемы непосредственных преобразователей частоты низковольтного 12-пульсного и высоковольтного исполнения 18 пульсного НПЧ, а также научно обоснованы способы формирования напряжения на двигателе в энергосберегающих режимах вентиляторных электроприводов.
6. Разработаны математические модели различных систем НПЧ-АД с программным формированием напряжения, в которых реализованы новые алгоритмы управления вентилями при создании различных ступеней выходных частот 6-, 12- и 18-пульсного преобразователя, позволяющие исследовать процессы электромеханического преобразования энергии в АД при пуске и длительных режимах работы.
7. На основе переключающих функций разработано компактное математическое описание способов формирования напряжения НПЧ позволяющее обобщить алгоритмы управления и упростить систему аппаратно-программной их реализации.
8. На основе круговой диаграммы АД, путем введения параметра косвенного угла нагрузки, получены новые аналитические зависимости для расчета



токов, напряжений, электромагнитного момента и коэффициента мощности двигателя, позволяющие рассчитывать экстремальные характеристики тока АД при частотном управлении с целью определения параметров настройки системы управления, обеспечивающих минимизацию тока статора.

9. Полученные результаты теоретических и экспериментальных исследований позволили решить крупную научно-техническую задачу – создать теорию отдельного класса энергосберегающих электроприводов по схеме НПЧ-АД с программным формированием напряжения, на базе которой обеспечивается повышение качества проектирования и технического уровня электроприводов вентиляторного типа.

**Содержание диссертации отражено в следующих основных публикациях:**

Монографии

1. Сарваров А.С. Энергосберегающий электропривод на основе НПЧ-АД с программным формированием напряжения: Монография.-Магнитогорск: МГТУ, 2001.- 206 с.

Статьи и доклады

2. Сарваров А.С. Синхронизация асинхронного двигателя в схеме АВК с целью повышения энергетических показателей // Тр. ин-та / Моск. энерг. ин-т, 1982, вып. 520.
3. Сарваров А.С. К вопросу разработки ступенчатых НПЧ с двухзонным регулированием частоты вращения двигателей переменного тока // Научные идеи В.А. Шубенко на рубеже веков: Докл. Междунар. науч.- техн. конф. 16-18 декабря 1999 г.- Екатеринбург: УГТУ, 1999.- С. 104-108.
4. Сарваров А.С. Расширение диапазона регулирования в системе 12-пульсный НПЧ-АД для вентиляторных электроприводов / Труды IV Междунар. конф. Электромеханика и электротехнология МКЭЭ, 2000.- Клязьма, 2000.- С. 210-211.
5. Сарваров А.С. Расширение диапазона частотного регулирования двигателей переменного тока на базе непосредственных преобразователей частоты // Приводная техника.- 2000, №3.- С. 22-27.
6. Сарваров А.С. Перспективы разработки нового типа непосредственных преобразователей частоты для мощных вентиляторных электроприводов // Электротехнические системы и комплексы: Межвуз. сб. науч. тр.- Магнитогорск: МГМА, 2000. Вып.5. – С. 10-18.
7. Сарваров А.С. Вопросы модернизации высоковольтных вентиляторных электроприводов на основе непосредственных преобразователей частоты с программным формированием напряжения // XII Науч.-техн. конф. «Электроприводы переменного тока» ЭППТ-01, 13-16 марта 2001г.: Сб. тр. – Екатеринбург: УГТУ, 2001. – С. 202-205.

8. Сарваров А.С. Обобщение алгоритмов программного формирования выходного напряжения НПЧ на основе переключающих функций. // Электротехнические системы и комплексы: Межвуз. сб. науч. тр. - Магнитогорск: МГТУ, 2001. - Вып. 6.- С. 4-111.
9. Сарваров А.С. Установление основных соотношений для настройки системы НПЧ-АД с программным формированием напряжения // Электротехнические системы и комплексы: Межвуз. сб. науч. тр. - Магнитогорск: МГМА, 2001. Вып.6. – С. 63-69.
10. Сарваров А.С., Шинянский А.В. Синхронизация асинхронного двигателя в схеме АВК // Тр. ин-та /Таллинск. политехнический ин-т.-1981.- Вып.520.- С.33-41.
11. Сарваров А.С., Шинянский А.В. Улучшение энергетических показателей электропривода подъемника по системе АВК // Тр. ин-та / Моск. энерг. ин-т.- 1988.- Вып. 165.- С. 88-94.
12. Сарваров А.С., Усатый Д.Ю. Оценка перспектив применения многоступенчатого частотного пуска асинхронного двигателя // Электротехнические системы и комплексы: Межвуз. сб. науч. тр. - Магнитогорск: МГМА, 1996. Вып.2. С. 40-43.
13. Устройство для измерения индукции переменного магнитного поля / И.А. Селиванов, Е.А. Завьялов, А.С. Сарваров, М.Ю. Петушков, А.Г. Серебренников // XI Науч.-техн. конф. «Электроприводы переменного тока» ЭПТТ-98, 24-26 февраля 1998г.: Сб. тр. – Екатеринбург, 1998. – С. 266-269.
14. Применение импульсно-частотного питания для пуска короткозамкнутых АД. / А.С. Сарваров, И.А. Селиванов, Д.Ю. Усатый, А.Г. Серебренников // XI Науч.-техн. конф. «Электроприводы переменного тока» ЭПТТ-98, 24-26 февраля 1998г.: Сб. тр. – Екатеринбург, 1998. – С. 193-195.
15. Сарваров А.С., Евдокимов С.А., Славгородский В.Б., Лукьянов В.П. Основные направления реконструкции электроприводов переменного тока с целью снижения электропотребления в условиях ОАО «ММК» // Электротехнические системы и комплексы: Межвуз. сб. науч. тр. - Магнитогорск: МГТУ, 1998. - Вып. 3.- С. 125-129.
16. Сарваров А.С., Евдокимов С.А. Многоканальное процессорное устройство осциллографирования сигналов на базе системного блока персонального компьютера типа IBM PC // Электротехнические системы и комплексы: Межвуз. сб. науч. тр. - Магнитогорск: МГТУ, 1998. - Вып. 3.- С. 125-129.
17. Сарваров А.С., Усатый Д.Ю. Устройство сбора данных для исследования электроприводов / Контроль, измерение, автоматизация: Междунар. науч.-техн. конф.: Сб.ст. - Барнаул: АГТУ, 2000. С. 84-87.
18. Сарваров А.С., Усатый Д.Ю., Евдокимов С.А. Опыт построения непосредственного преобразователя частоты на базе тиристорного агрегата постоянного тока типа АТР-1000. // Электротехнические системы и комплексы: Межвуз. сб. науч. тр. - Магнитогорск: МГТУ, 2000. - Вып. 5 С. 208-213.

19. Сарваров А.С., Евдокимов С.А., Славгородский В.Б., Лукьянов В.П. Анализ основных направлений реконструкции электроприводов переменного тока с целью снижения электропотребления в условиях ОАО «ММК» // На рубеже веков: итоги и перспективы: Всероссийский электротехнический конгресс с международным участием ВЭЛК- 99: Тез. докл.- М.: Академия. 1999.- С. 170-171.
20. Сарваров А.С., А.В. Харламов. Исследование возможности применения однополярных преобразователей частоты для ступенчатого пуска высоковольтных двигателей переменного тока // Научные идеи В.А. Шубенко на рубеже веков: Докл. Междунар. науч.- техн. конф. 16-18 декабря 1999 г.- Екатеринбург: УГТУ, 1999.- С. 109-112.
21. Схемные исполнения преобразователей при импульсно-частотном управлении короткозамкнутым АД для создания энергосберегающих режимов / А.С. Сарваров, Е.А. Завьялов, О.И. Петухова, Д.Ю. Усатый // Энергосбережение на промышленных предприятиях: Материалы I-й Международной науч.-техн. конф.- Магнитогорск.- 1997.- С. 141-145.
21. Сарваров А.С., Славгородский В.Б. Современные высоковольтные преобразователи частоты и перспективы разработки НПЧ для мощных вентиляторных электроприводов // Энергосбережение на промышленных предприятиях: Материалы II Международной науч.-техн. конф.- Магнитогорск.- 2000.- С. 241-247.
22. Разработка системы НПЧ-АД с программным формированием ступеней частоты вращения для вентиляторных электроприводов на базе тиристорных преобразователей постоянного тока. / А.С. Сарваров, Д.Ю. Усатый, В.Б. Славгородский, С.А. Евдокимов. // Энергосбережение на промышленных предприятиях: Материалы II Международной науч.-техн. конф.- Магнитогорск.- 2000.- С. 93-95.
23. Сарваров А.С., Криницын С.Е., Лекин А.Н. Формирование выходного напряжения 18-пульсного НПЧ для создания энергосберегающего режима высоковольтного электропривода вентиляторного типа // XII Науч.-техн. конф. «Электроприводы переменного тока» ЭППТ-01, 13-16 марта 2001г.: Сб. тр. – Екатеринбург: УГТУ, 2001. – С. 39-42.
24. Сарваров А.С., Усатый Д.Ю., Евдокимов С.А., Радионов А.А., Петушков М.Ю. Исследование системы НПЧ-АД с программным формированием напряжения // XII Науч.-техн. конф. «Электроприводы переменного тока» ЭППТ-01, 13-16 марта 2001г.: Сб. тр. – Екатеринбург: УГТУ, 2001. – С. 46-48.
25. Сарваров А.С., Маколов В.Н. Разработка модели непосредственного преобразователя частоты с программным формированием напряжения // XII Науч.-техн. конф. «Электроприводы переменного тока» ЭППТ-01, 13-16 марта 2001г.: Сб. тр. – Екатеринбург: УГТУ, 2001. – С. 76-79.
26. Сарваров А.С., Лекин А.Н., Мазитов Д.М. Определение коэффициента мощности АД при питании от НПЧ // XII Науч.-техн. конф. «Электроприводы переменного тока» ЭППТ-01, 13-16 марта 2001г.: Сб. тр. – Екатеринбург: УГТУ, 2001. – С. 199-201.

27. Основные пути реализации энергосберегающих режимов в высоковольтных вентиляторных электроприводах / Сарваров А.С., Лекин А.Н., Маколов В.Н., Славгородский В.Б. и др // Труды III Международной (XIV Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2001 (Нижний Новгород 12-14 сентября 2001) / Под ред. С.В. Хватова. Нижний Новгород: «Вектор-ТиС».- С.225-226.
28. Сарваров А.С., Маколов В.Н. Формирование энергосберегающих выходных частот НПЧ для высоковольтных вентиляторных электроприводов // Труды III Международной (XIV Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2001 (Нижний Новгород 12-14 сентября 2001) / Под ред. С.В. Хватова. Нижний Новгород: «Вектор-ТиС».- С.231-232.

Авторские свидетельства и патенты

29. А.с. СССР № 955485 МКИ Р 02 р 7/48. Способ синхронизации асинхронного двигателя / А.С. Сарваров, А.В. Шинянский . Заявл. 29.12.80, 3225650. Оpubл. в Б.И. № 32, 1982.
30. А.с. СССР № 955466 МКИ Н 02 р 3/24. Способ торможения асинхронного двигателя/ А.С. Сарваров, А.В. Шинянский . Заявл. 12.12.80, 3216428. Оpubл. в Б.И. №32, 1982.
31. Патент № 2095933 МКП<sup>6</sup> Н 02 р 7/42. Способ регулирования скорости асинхронного двигателя / Сарваров А.С., Селиванов И.А., Завьялов Е.А., (РФ).- № 96104007; Заявл. 28.02.96., Оpubл. 10.11.97. Бюл. №31, 1982.
32. Патент № 2108593 МПК<sup>6</sup> G01R 33/00. Устройство для измерения индукции переменного магнитного поля / Сарваров А.С., Селиванов И.А., Завьялов Е.А., Петушков М.Ю., Серебренников А.Г. (РФ).- № 95120928. Заявл. 13.12.95, Оpubл. 10.04.98. Бюл. №10.
33. Патент № 2150781 МПК<sup>6</sup> 21/00. Способ регулирования скорости трехфазного двигателя переменного тока. А.С. Сарваров (РФ).- № 99114881. Заявл. 12.07.99., Оpubл. 10.05.2000. Бюл. №16.
34. Патент №2161366 МПК<sup>6</sup> Н 02 Р 7/42. Способ регулирования скорости асинхронного двигателя. А.С. Сарваров., Усатый Д.Ю., Харламов А.В. (РФ).- № 99110875. Заявл. 25.05.99, Оpubл.10.12.2000. Бюл. №32.

