

На правах рукописи

КОКОРИН НИКОЛАЙ ВАЛЕРЬЕВИЧ

**ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ
ЧАСТОТЫ МАТРИЧНОГО ТИПА
ДЛЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА**

Специальность 05.09.12 – Силовая электроника

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Чебоксары – 2010

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. В настоящее время наиболее актуальным становится сокращение количества этапов преобразования электрической энергии на пути от источника до потребителя. Одним из направлений достижения указанной выше тенденции является использование перспективных схем преобразователей частоты (ПЧ) и применение эффективных алгоритмов для их управления.

Одной из наиболее широких областей применения силовой преобразовательной техники является частотно-регулируемый электропривод переменного тока, поскольку он обладает большими потенциальными возможностями оптимизации производственных процессов, роста производительности, экономии трудовых и энергетических ресурсов. В большинстве случаев в них используются двухзвенные полупроводниковые ПЧ, выполненные по схемам «неуправляемый выпрямитель – инвертор» и «управляемый выпрямитель – инвертор». Преобразователи такого типа являются нелинейными приемниками электрической энергии от сети переменного тока, потребляющими в большинстве случаев значительную реактивную мощность, что существенно снижает их энергетическую эффективность. Кроме того, они вносят значительные искажения в питающую сеть вследствие низкого качества входного тока.

Требования к питающей сети постоянно ужесточаются, что исключает использование простых схем выпрямителей на входе ПЧ. Эти обстоятельства стимулируют использование в их составе входных фильтров, которые частично решают отмеченные выше проблемы, но при этом увеличивают стоимость и ухудшают массогабаритные и динамические показатели. Поэтому особого внимания заслуживают вопросы согласования ПЧ с питающей сетью. Помимо требований по качеству потребляемой электроэнергии, современные ПЧ также должны обеспечивать возможность рекуперации энергии в питающую сеть.

Одним из перспективных направлений уменьшения потребления реактивной мощности из питающей сети при одновременной возможности рекуперации энергии и снижения уровня высших гармоник сетевого тока является применение схем активных ПЧ, использующих в своей схеме полностью управляемые ключи, управление которыми осуществляется релейными или импульсно-модуляционными методами. С точки зрения схемотехнических решений активные ПЧ можно разделить на две группы:

1. Упомянутые выше двухзвенные преобразователи частоты (ДПЧ), состоящие из двух автономных инверторов напряжения (АИН) или тока (АИТ) один из которых работает в режиме выпрямления. В промежуточном звене постоянного тока устанавливается сглаживающий конденсатор для АИН или реактор для АИТ. Наличие громоздкого фильтра в промежуточном звене является одним из наиболее существенных недостатков схем ДПЧ.

2. Непосредственные преобразователи частоты (НПЧ), в структуре которых отсутствует промежуточное звено. В настоящее время все больший интерес вызывает такая разновидность схем НПЧ, как матричный преобразователь частоты (МПЧ). МПЧ, обладая лучшими массогабаритными и динамическими показателями, так же

как и ДПЧ, представляет собой многомерный объект, который требует использования современных методов управления. Помимо сложности управления, остро стоит вопрос повышения надежности коммутации ключей МПЧ, которая осуществляется более сложно, чем в схемах ДПЧ.

Можно добавить, что развитие современной элементной базы и новые технические возможности дали толчок к развитию новых принципов управления, нереализуемых ранее ввиду своей сложности. Все это позволяет вести разработку экономических, высокопроизводительных и компактных систем.

Цель диссертационной работы заключается в исследовании и реализации перспективных способов управления МПЧ, позволяющих помимо задач регулирования обеспечить электромагнитную совместимость с питающей сетью и улучшить энергетическую эффективность.

Актуальность выбранной цели подтверждается большим числом публикаций в отечественной и зарубежной литературе, посвященных этой проблематике. Для достижения поставленной цели была проведена следующая работа:

1. Разработка математической и имитационной моделей МПЧ, исследование режимов работы и алгоритмов управления.
2. Повышение надёжности коммутации ключей в МПЧ и улучшение качества преобразования электрической энергии.
3. Исследование влияния несимметричности напряжения питающей сети на качество входного тока.
4. Анализ устойчивости системы с МПЧ и входным фильтром.
5. Практическая реализация экспериментального образца МПЧ для регулируемого асинхронного электропривода в составе лабораторного стенда.

Методы исследования базируются на общих положениях теории цепей, методах математического и численного моделирования, линейной алгебре, теории нелинейных и дискретных систем управления и теории цифровой обработки сигналов. Основным методом исследования, примененным в данной работе, является метод математического моделирования. Результаты экспериментальных исследований фиксировались с помощью современных средств измерения. При обработке результатов теоретических и экспериментальных исследований широко применялось современное программное обеспечение.

Достоверность научных положений и выводов обеспечивается корректным использованием математического аппарата и подтверждается как на этапе моделирования разработанных систем, так и многочисленными экспериментальными результатами.

На защиту выносятся следующие научные положения:

1. Комбинированный алгоритм безопасной коммутации ключей МПЧ.
2. Способ коррекции ширины управляющих импульсов ШИМ.
3. Анализ устойчивости системы с МПЧ и входным фильтром и методика расчёта параметров входного фильтра.
4. Результаты исследований составленных имитационных моделей МПЧ и экспериментального образца.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Разработанный комбинированный алгоритм безопасной коммутации ключей МПЧ отличается от известных сочетанием преимуществ 4-х ходовых способов коммутации по току и напряжению.

2. Разработанный способ коррекции ширины управляющих импульсов ШИМ позволяет компенсировать задержку переключения присущую 4-х ходовым способам коммутации.

3. Проведённый анализ устойчивости системы и предложенная методика расчёта параметров входного фильтра используют методы усреднения и линеаризации системы, что облегчает выполнение расчетов.

Практическая ценность работы определяется следующими положениями:

1. Разработанный алгоритм безопасной коммутации ключей МПЧ обеспечивает существенное сокращение количества неверных коммутаций и повышает надёжность системы в целом.

2. Разработанный способ коррекции ширины управляющих импульсов ШИМ обеспечивает уменьшение искажений в кривых входных и выходных токов и напряжений.

3. Установленные зависимости максимальной выходной мощности МПЧ и максимального коэффициента передачи напряжения от параметров входного фильтра позволяют оценить устойчивость системы и рассчитать необходимые параметры входного фильтра.

4. Разработанные имитационные модели системы позволяют проводить исследования работы МПЧ при изменении параметров силовой схемы в режимах потребления и рекуперации, а также алгоритмов модуляции.

5. Реализованный в лабораторных условиях экспериментальный образец МПЧ может быть использован для дальнейших исследований.

Основные практические результаты диссертации состоят из исследований экспериментального образца преобразователя частоты матричного типа и реализованного на его основе регулируемого асинхронного электропривода мощностью 4 кВт.

Апробация работы. Основные результаты работы обсуждались на заседании кафедры «Системы автоматического управления электроприводами» Чувашского государственного университета им. И.Н. Ульянова; научной конференции студентов и аспирантов «Электротехника, электромеханика и электротехнологии в XXI веке» (к 80-летию профессора А.Д. Поздеева), г. Чебоксары, 2009 г.

Публикации. По результатам исследований опубликовано четыре научных работы, из них три в изданиях, рекомендованных ВАК РФ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка цитируемой литературы (76 наименований), приложений и изложена на 144 страницах машинописного текста, содержит 22 таблицы и 102 рисунка. Приложение к диссертации представлено на одной странице. Основные результаты работы получены автором лично.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации и показаны преимущества использования схем преобразователей частоты и требования предъявляемые к ним. Исходя из этого, определяется цель диссертационной работы, приводится краткое содержание выполненных исследований и отражены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе изложено состояние вопроса, дано обоснование решаемой научной задачи. В общих чертах сравниваются различные типы ПЧ, применяемые в электроприводах переменного тока, приводятся их достоинства и недостатки. Рассматривается теория МПЧ, алгоритмы скалярной модуляции, записываются ключевые выражения, характеризующие работу МПЧ [3]. Подробно освещён вопрос применения перспективной на сегодняшний день пространственно-векторной модуляции применительно к МПЧ.

Наиболее перспективная схема МПЧ изображена на рис. 1. Силовая часть МПЧ состоит из девяти ключей $S_{Aa} \dots S_{Cc}$ обладающих двунаправленной проводимостью, соединённых так, чтобы любая из трех фаз входа A, B, C могла быть связана с любой из трех фаз выхода a, b, c .

Показано, что при высокой частоте коммутации и идеальной системе управления выходное напряжение и входной ток МПЧ синусоидальны. Гармонический состав входных токов содержит минимальное количество высших гармоник кратных частоте переключения. Входной коэффициент мощности МПЧ не зависит от характера нагрузки при условии, что выбран оптимальный способ модуляции. Так, связь между средними входными и выходными величинами МПЧ за период модуляции можно записать в общем виде

$$\begin{aligned} U_o(t) &= \mathbf{M}(t)U_i(t), \\ I_i(t) &= \mathbf{M}^T(t)I_o(t), \end{aligned} \tag{1}$$

где $U_i(t)$, $U_o(t)$, $I_i(t)$ и $I_o(t)$ - входные и выходные трехфазные системы синусоидальных напряжений и токов соответственно; $\mathbf{M}(t)$ - модуляционная матрица.

Модуляционная матрица $\mathbf{M}(t)$ представляет собой матрицу коэффициентов модуляции (относительных длительностей импульсов модулирования) ключей

$$\mathbf{M}(t) = \begin{bmatrix} m_{Aa}(t) & m_{Ba}(t) & m_{Ca}(t) \\ m_{Ab}(t) & m_{Bb}(t) & m_{Cb}(t) \\ m_{Ac}(t) & m_{Bc}(t) & m_{Cc}(t) \end{bmatrix}. \tag{2}$$

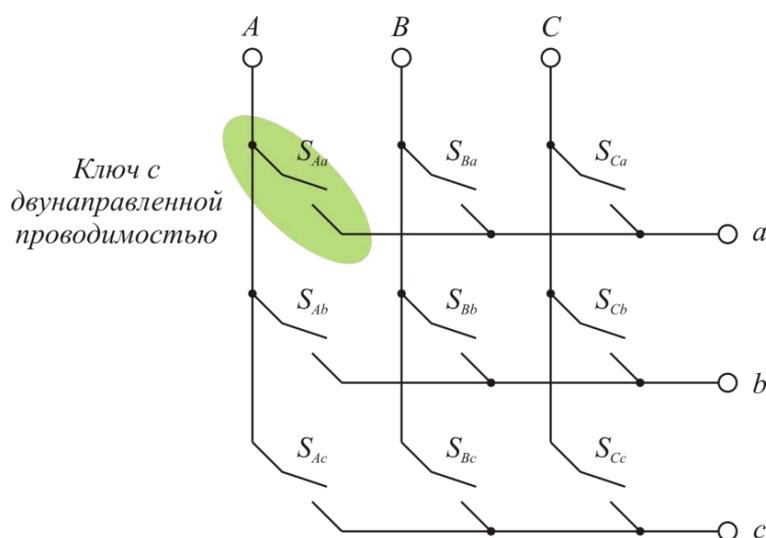


Рис. 1. Схема НПЧ матричного типа на полностью управляемых ключах с двунаправленной проводимостью

Рассматриваются основные алгоритмы скалярной модуляции удовлетворяющие (1). Это алгоритм итальянских ученых Алберто Алесиной и Марко Вентарини обеспечивающий максимальный коэффициент передачи напряжения q равный 0,5; его развитие, известное как оптимизированный алгоритм Вентарини, а также алгоритм канадского ученого Жиль Роя – обеспечивающие максимальный коэффициент передачи напряжения q равный 0,87.

Особое внимание уделено перспективным на сегодняшний день методам пространственно-векторной модуляции МПЧ, также обеспечивающие максимальный коэффициент передачи напряжения q равный 0,87.

В итоге, можно выделить основные преимущества схем МПЧ перед схемами ДПЧ, таковыми являются:

- Двухнаправленный обмен энергией между нагрузкой и питающей сетью, что позволяет говорить о МПЧ, как об энергосберегающей системе;
- Возможность регулирования входного коэффициента мощности;
- Лучшие массогабаритные показатели по сравнению с ДПЧ ввиду отсутствия звена постоянного тока.

К недостаткам можно отнести:

- Большое число используемых полупроводниковых элементов;
- Более сложное, чем в схемах ДПЧ управление;
- Относительно низкий максимальный коэффициент передачи напряжения.

Глава 2 посвящена вопросу безопасной коммутации ключей МПЧ. Проводится анализ существующих топологий ключей обладающих двухнаправленной проводимостью и способов их коммутации – это простые 2-х ходовые способы с перекрытием или с бестоковой паузой и улучшенные 4-х ходовые способы с коммутацией по выходному току и входному напряжению.

Предлагается комбинированный алгоритм безопасной коммутации ключей МПЧ, позволяющий существенно сократить число неверных коммутаций. Также предлагается способ коррекции ширины управляющих импульсов ШИМ, компенсирующий задержку переключения присущую 4-х ходовым способам коммутации. Приводятся экспериментальные результаты.

Главная идея комбинированного алгоритма состоит в том, чтобы исключить работу МПЧ в критических областях. Этот алгоритм сочетает улучшенные 4-х ходовые способы коммутации с контролем направления выходного тока и контролем величины входного напряжения и объединяет преимущества обоих составных способов коммутации. К достоинствам комбинированного алгоритма можно отнести отсутствие дополнительных аппаратных затрат и программную реализацию [2].

Удобно рассмотреть работу комбинированного алгоритма безопасной коммутации ключей по рис. 2, на котором изображены графики входного фазного напряжения $u_i(t)$ и выходного тока $i_o(t)$ МПЧ. Поскольку обычные 4-х ходовые способы коммутации чувствительны к погрешностям измерения входного напряжения и выходного тока (ввиду несовершенства первичных датчиков), предлагается динамически менять стратегии коммутации для обеспечения безопасной работы МПЧ.

Как видно из рис. 2, способ коммутации по току KT (рис. 3) заменяется способом коммутации по напряжению KH (рис. 4) в то время, когда направление выходного тока фазы может быть определено неверно – при уменьшении до некоторого уровня Δi_o вблизи нулевого пересечения. Обратная замена способа KH на KT произойдет либо при выходе из критической области KT , либо при входе в критическую область KH , определяемую величиной Δu_i .

Таким образом, критерий для динамической смены способа коммутации определяется величиной зон нечувствительности по току Δi_o и по напряжению Δu_i . Предложенный алгоритм позволяет существенно сократить количество неверных коммутаций во всем диапазоне частот выходного напряжения.

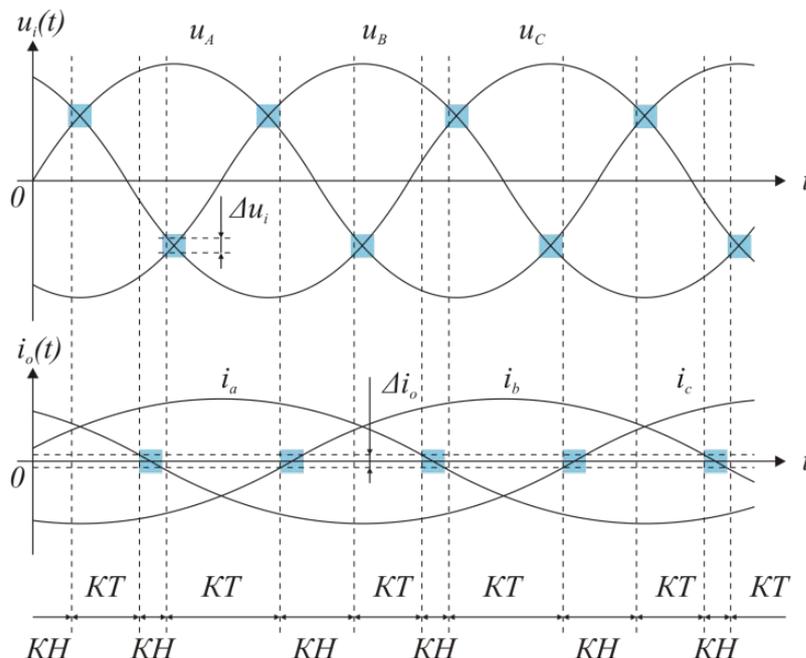


Рис. 2. Комбинированный алгоритм безопасной коммутации ключей: KH – коммутация по напряжению; KT – коммутация по току

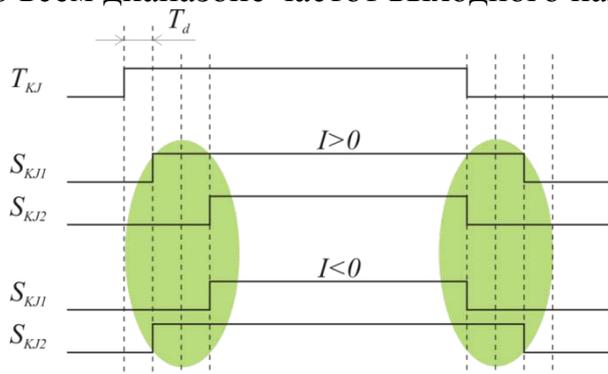


Рис. 3. Последовательность переключения при 4-х ходовом способе коммутации с контролем направления выходного тока

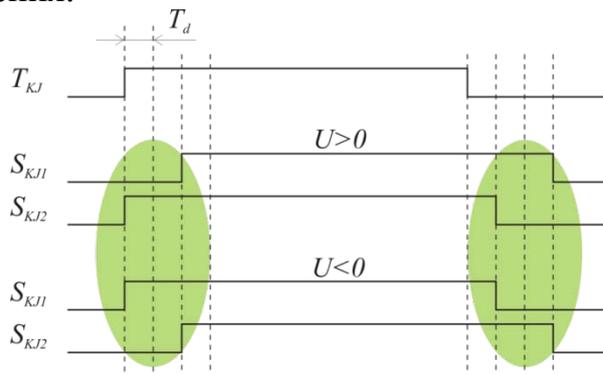


Рис. 4. Последовательность переключения при 4-х ходовом способе коммутации с контролем величины входного напряжения

Комбинированный алгоритм коммутации реализован на программируемой логической интегральной схеме (ПЛИС) MAX3000 фирмы Altera. Структурная схема работы ПЛИС изображена на рис. 5. Управление ключами выполнено по группам выходных фаз МПЧ a, b, c . Для каждой группы поступают сигналы с выхода ШИМ, выбора способа коммутации и направления коммутации. В каждой группе реализовано управление тремя ключами с входных фаз A, B, C . Блок-схема управления ключом с двунаправленной проводимостью изображена на рис. 6 и содержит обозначения:

- TON – таймер с задержкой T_d или $2T_d$ на включение;
- TOF – таймер с задержкой T_d или $2T_d$ на выключение;

- SW1 – переключатель стратегий коммутации;
- SW2 – переключатель направления коммутации.

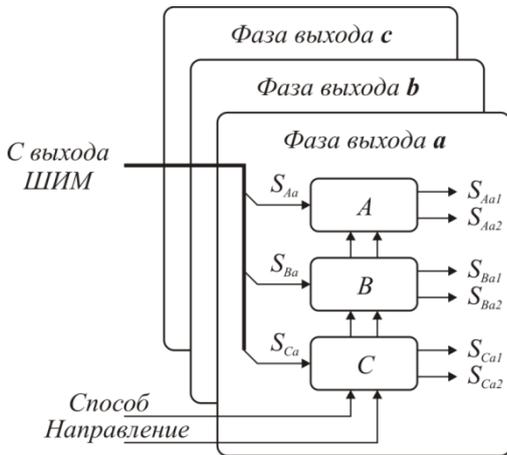


Рис. 5. Структурная схема работы ПЛИС

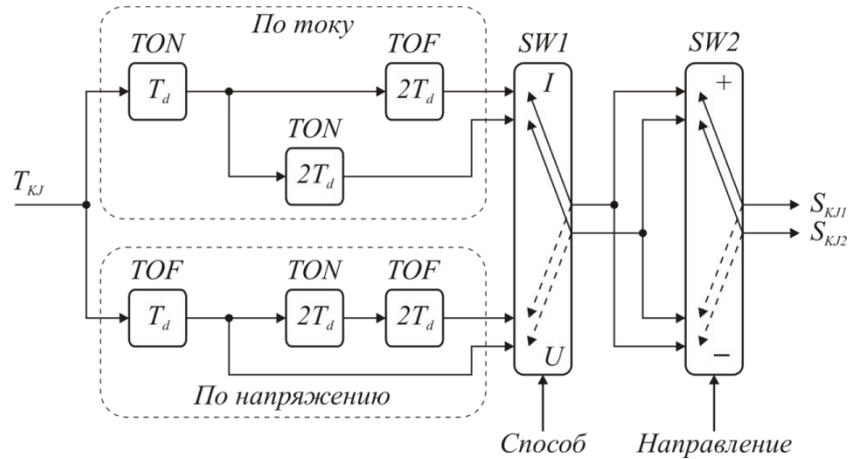


Рис. 6. Блок-схема управления ключом с двунаправленной проводимостью

Для демонстрации комбинированного алгоритма безопасной коммутации ключей были проведены многочисленные экспериментальные тесты, им сопоставлялись отдельно взятые способы коммутации. Результаты представлены на рис. 7-9.

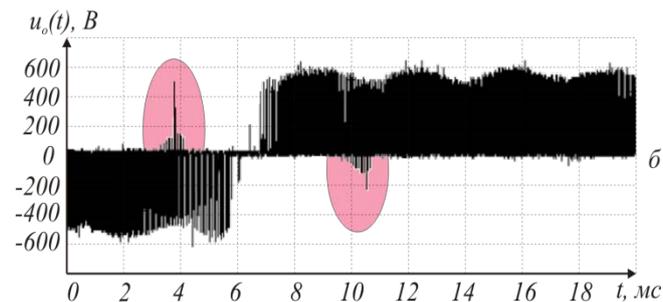
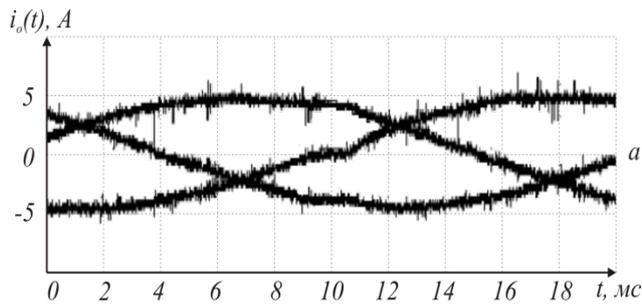


Рис. 7. Временные диаграммы: ток выходных фаз МПЧ (а), выходное линейное напряжение при коммутации по току (б)

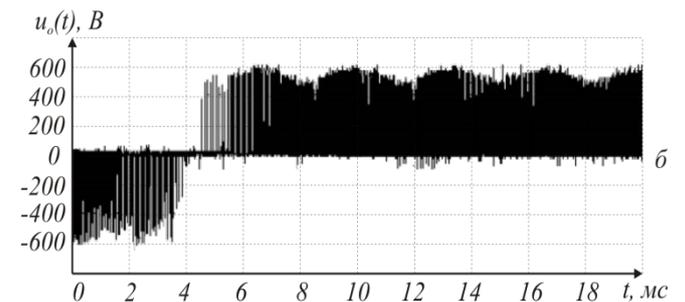
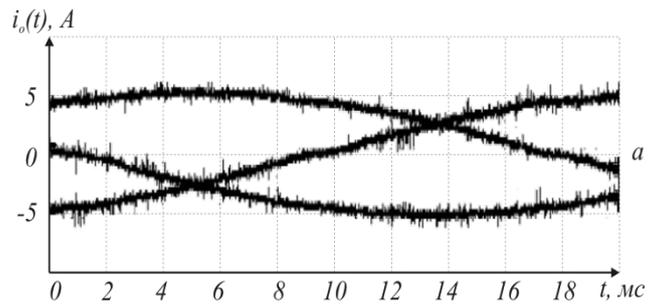


Рис. 8. Временные диаграммы: ток выходных фаз МПЧ (а), выходное линейное напряжение при комбинированном алгоритме безопасной коммутации ключей (б)

Также предлагается способ коррекции ширины управляющих импульсов, компенсирующий задержку переключения присущую 4-х ходовым стратегиям коммутации. Схема коррекции длительности импульсов задающей ШИМ реализована на цифровом сигнальном процессоре и представлена на рис. 10.

Экспериментально полученные зависимости коэффициента нелинейных искажений (THD) входного и выходного токов от выходной мощности преобразователя представлены на рис. 11. Для сравнения там же представлены экспериментально полученные данные без коррекции ШИМ.

Наибольший эффект от коррекции длительности импульсов ШИМ достигается на высоких мощностях преобразования (800 Вт) и снижается по мере уменьшения мощности. Так, для входного тока наименьшее значение THD равно 6% достигается применением коммутации по току (рис. 11, а) и для выходного тока, наименьшее значение THD равно 4,5% достигается при коммутации по напряжению (рис. 11, б). На рис. 11 обозначено символом «●» - обычная коммутация по току, символом «■» - обычная коммутация по напряжению и символом «▲» - комбинированный алгоритм с коррекцией длительностей импульсов ШИМ.

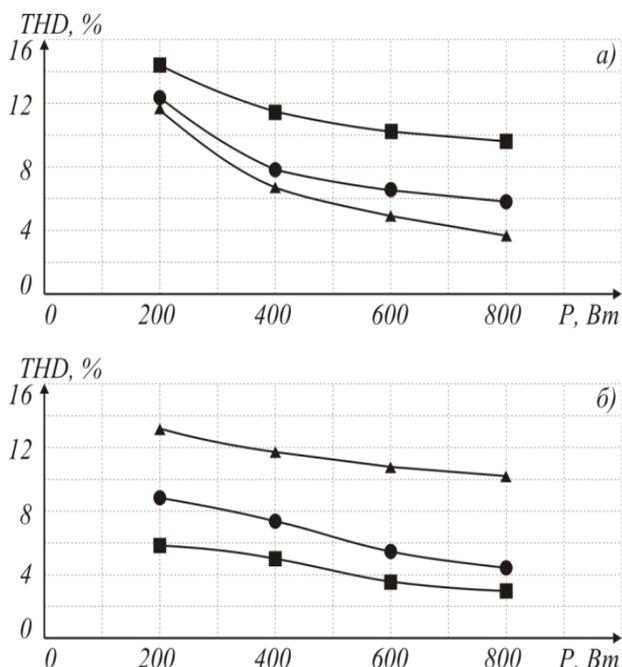


Рис. 11. Экспериментально полученная зависимость коэффициента нелинейных искажений от выходной мощности МПЧ: входного тока (а), выходного тока (б)

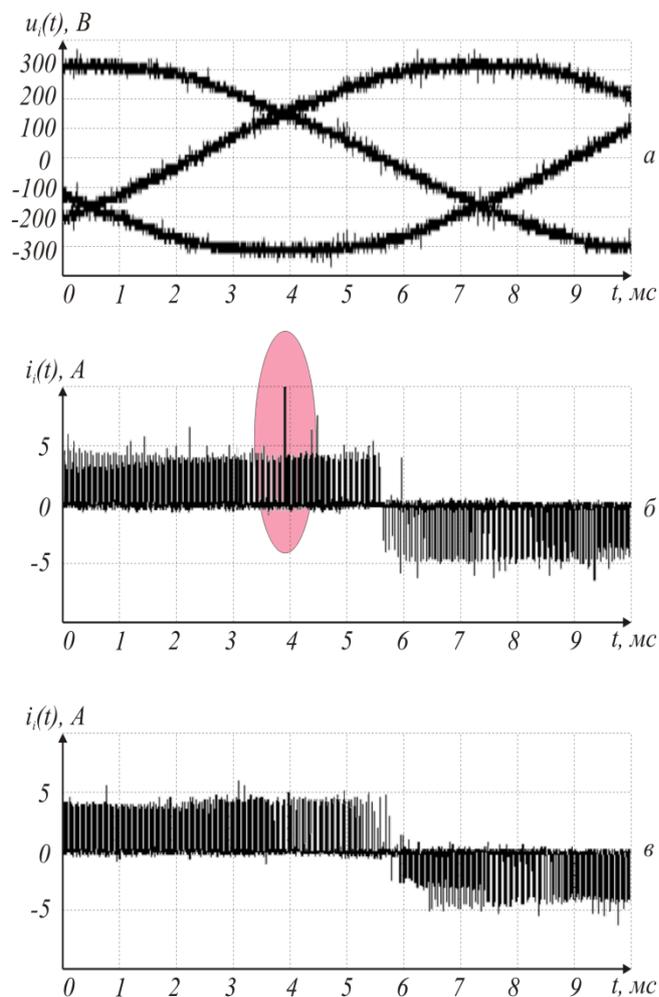


Рис. 9. Временные диаграммы: входные фазные напряжения МПЧ (а), ток одной входной фазы при коммутации по напряжению (б), ток одной входной фазы при комбинированном алгоритме безопасной коммутации ключей (в)

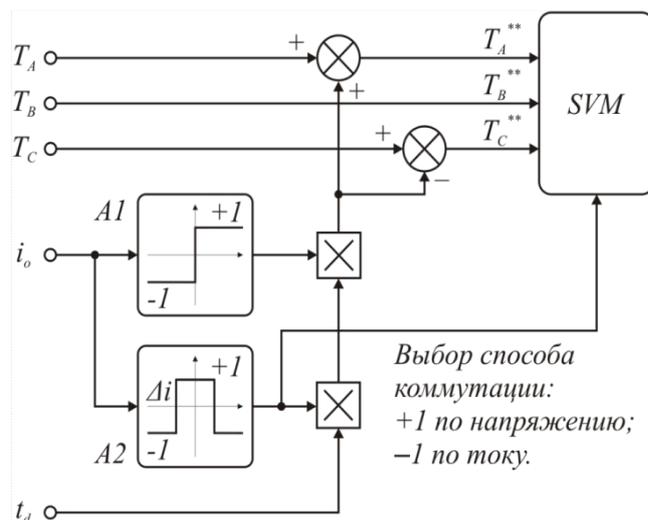


Рис. 10. Схема коррекции длительности импульсов ШИМ

В Главе 3 рассматриваются основные принципы модуляции входного тока и вопросы устойчивости системы МПЧ с входным LC или RLC-фильтром (рис. 12). Показано, что на устойчивость системы влияют характеристики входного фильтра и потребляемая нагрузкой мощность. Для каждого типа входного фильтра проводится анализ устойчивости системы, и определяются зависимости максимальной выходной мощности МПЧ и максимального коэффициента передачи напряжения от параметров фильтра. Проводится анализ влияния цифровой коррекции системы управления на устойчивость системы. Приводятся результаты моделирования. Разработанные программы для ЭВМ позволяют оценить устойчивость системы.

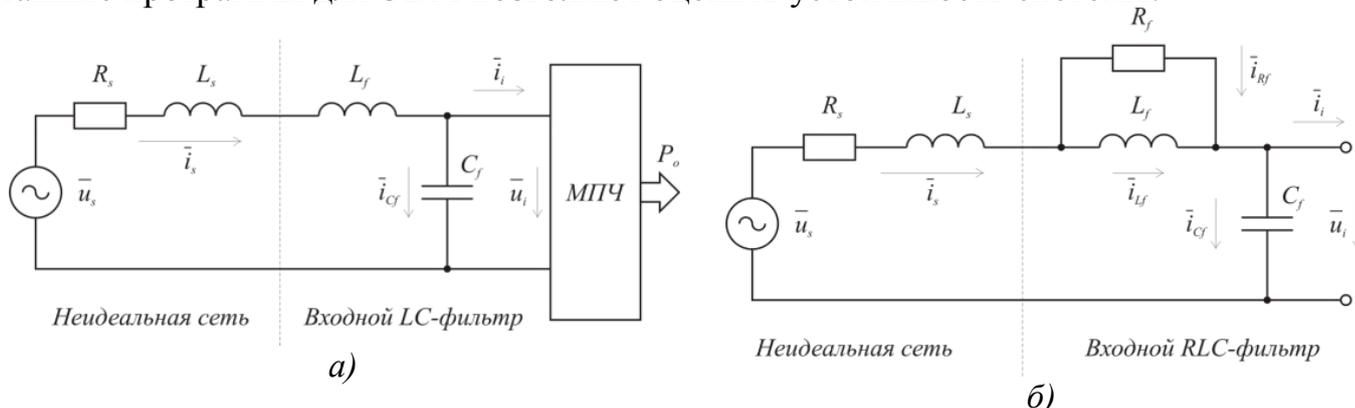


Рис. 12. Исследуемая система МПЧ с входным LC-фильтром (а) и с RLC-фильтром (б)

Для системы МПЧ с входным LC-фильтром (рис. 12, а) без учета параметров нагрузки строгий аналитический анализ на устойчивость по Ляпунову собственных чисел приводит к следующему критерию устойчивости

$$-P_o^{max} < P_o < P_o^{max}, \quad (3)$$

где P_o^{max} - максимальная выходная мощность МПЧ, при которой сохраняется устойчивость.

P_o^{max} определяется из выражения

$$P_o^{max} = \frac{3}{2} U_i^2 \cos(\varphi_i) C_f \sqrt{\frac{R_s^2}{(L_s + L_f)^2} + 4\omega_i^2}, \quad (4)$$

где U_i и ω_i - входное напряжение и частота; R_s и L_s - параметры питающей сети; L_f и C_f - параметры входного фильтра.

Полученные при аналитическом анализе результаты, соответствуют результатам проведенного имитационного моделирования, что позволяет использовать полученные модели для дальнейших исследований.

Так, для системы с входным LC-фильтром, методом числового моделирования были получены значения определяющего собственного числа матрицы коэффициентов в зависимости от выходной мощности и емкости фильтра (рис. 13).

Далее, для той же системы, но учитывая параметры нагрузки МПЧ, была установлена зависимость максимального коэффициента передачи напряжения q от выходной частоты f_o (рис. 14). Анализируя полученные результаты можно сделать важные выводы:

- Принятые параметры входного LC-фильтра обеспечивают максимальную выходную мощность МПЧ равную 300; 600 и 900 Вт для значений ёмкости фильтра C_f равных 3,3; 6,8 и 10 мкФ соответственно;

- Принятые параметры нагрузки МПЧ ограничивают максимальный коэффициент напряжения q значениями 0,18; 0,26 и 0,32 соответственно.

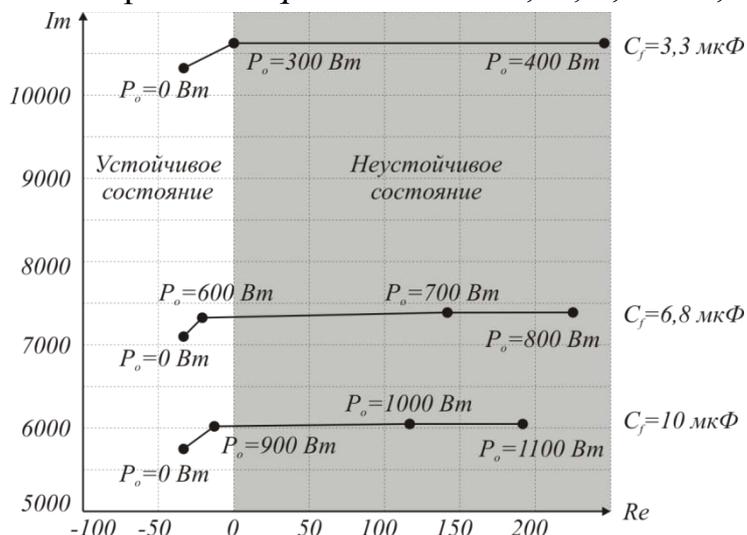


Рис. 13. Положение определяющего собственного числа матрицы коэффициентов при разных выходных мощностях в зависимости от величины ёмкости фильтра C_f для системы МПЧ с LC-фильтром без учета параметров нагрузки

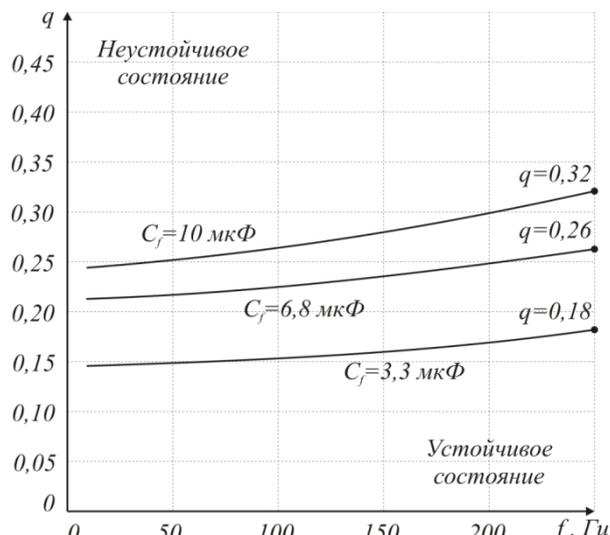


Рис. 14. Зависимость максимального коэффициента передачи напряжения q от выходной частоты f_o для системы МПЧ с LC-фильтром с учетом параметров нагрузки

Далее, показано теоретически и доказано результатами моделирования, что включение добавочного гасящего сопротивления параллельно индуктивности входного фильтра (рис. 12, б) положительно влияет на устойчивость системы и значительно расширяет диапазон мощностей преобразования.

Анализ на устойчивость проведен тем же методом, что и для системы с LC-фильтром. Как и в предыдущем случае, расчеты выполнены как без учета параметров нагрузки, так и с её учетом. Анализируя полученные результаты можно сделать важные выводы:

- Принятые параметры входного RLC-фильтра обеспечивают максимальную выходную мощность МПЧ равную 9 и 11 кВт для значений гасящего сопротивления R_f равных 10 и 5 Ом соответственно (рис. 15);

- Максимальный коэффициент напряжения ограничен своим максимальным значением $q = 0,87$ (рис. 16).

Можно заключить, что предложенный подход анализа на устойчивость и разработанные программы для ЭВМ могут быть полезными при проектировании входных фильтров, обеспечивая доступный метод проверки возникновения неустойчивости.

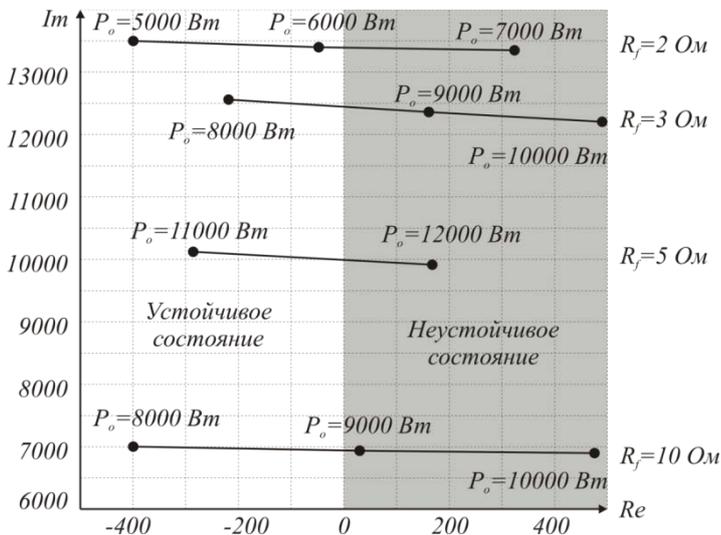


Рис. 15. Положение определяющего собственного числа матрицы коэффициентов при разных мощностях в зависимости от величины гасящего сопротивления R_f для системы МПЧ с RLC-фильтром без учета параметров нагрузки

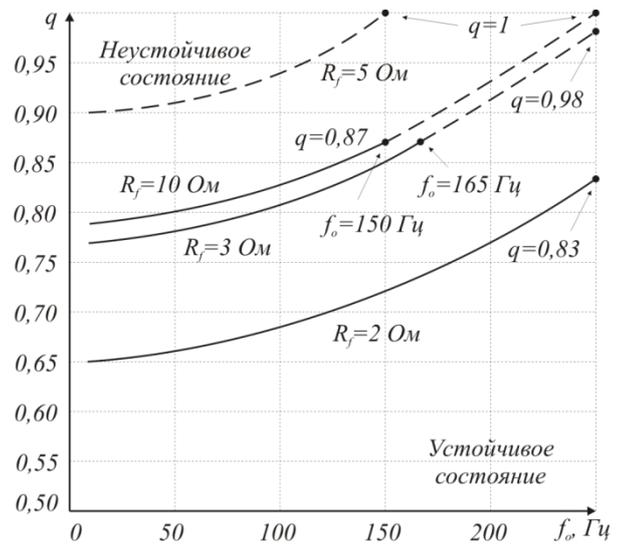


Рис. 16. Зависимость максимального коэффициента передачи напряжения q от выходной частоты f_o для системы МПЧ с RLC-фильтром с учетом параметров нагрузки

Показано, что применение цифровой коррекции системы управления для выделения основной гармоники вектора входного напряжения $\bar{u}_{i(l)}$ позволяет существенно расширить диапазон выходных мощностей МПЧ

$$\frac{d\bar{u}_{i(l)}}{dt} = \frac{1}{\tau} \bar{u}_i - \frac{1}{\tau} \bar{u}_{i(l)}, \quad (5)$$

где τ - постоянная времени цифрового фильтра.

С помощью численного моделирования установлено, что применение LC-фильтра совместно с цифровой коррекцией дает результат, аналогичный применению RLC-фильтра:

- Значение постоянной времени цифрового фильтра $\tau = 0,326$ мс позволяет достичь максимального теоретического значения коэффициента передачи напряжения $q = 0,87$ (рис. 17), находясь при этом в зоне устойчивой работы.

Проведенное математическое и имитационное моделирование в полной мере подтверждает выполненные расчеты, поэтому можно заключить, что предложенный подход анализа устойчивости является верным.

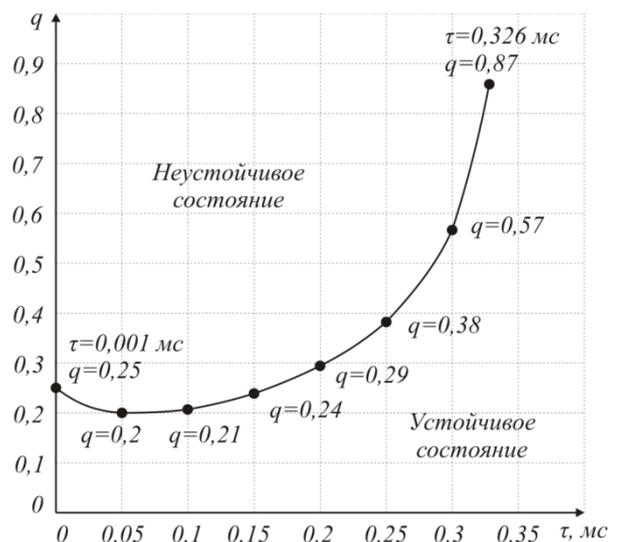


Рис. 17. Максимальный коэффициент передачи напряжения q , как функция постоянной времени цифрового фильтра τ

В **Главе 4** подробно изложено имитационное моделирование МПЧ, управляемого с помощью различных алгоритмов модуляции и работающего при разных параметрах питающей сети, входного фильтра и нагрузки. Для освещения вопроса моделирования, приводятся схемы ключевых блоков, реализующие заданные функции, и описание их работы.

Имитационная модель системы с МПЧ, изображена на рис. 18. На входе МПЧ установлен фильтр, на выходе – симметричная 3-х фазная резистивно-индуктивная нагрузка. Имитационная модель содержит блоки:

- Питающую 3-х фазную электрическую сеть «Three-Phase Source»;
- Входной фильтр «Filter»;
- Преобразователь матричного типа «Matrix Converter IGBTs»;
- Симметричную 3-х фазную RL-нагрузку «RL Load»;
- Блок прямой пространственно-векторной модуляции «SVM».

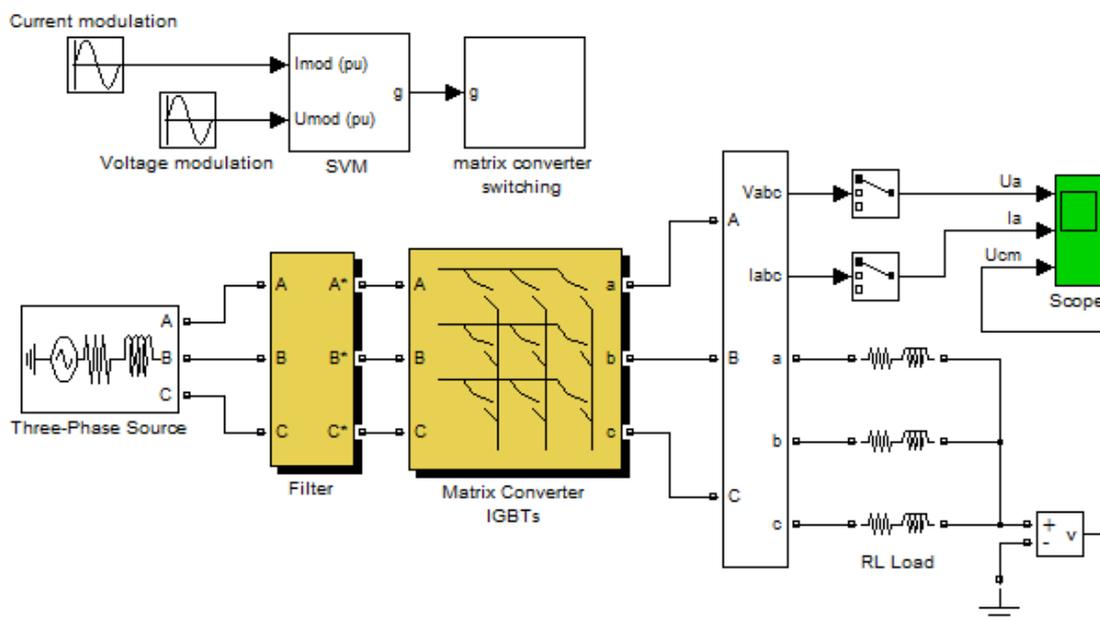


Рис. 18. Имитационная модель системы МПЧ с входным фильтром и RL-нагрузкой

Системой управления ключами МПЧ является блок прямой пространственно-векторной модуляции «SVM». На вход блока «SVM» поступают синусоидальные модулирующие сигналы, формирующие входной ток и выходное напряжение МПЧ. На выходе блока «SVM» формируется шина управляющих сигналов «G» для девяти ключей $S_{Aa} \dots S_{Cc}$ МПЧ. Эти сигналы через блок «matrix converter switching» поступают непосредственно в блок преобразователя «Matrix Converter IGBTs».

Имитационная модель блока «Matrix Converter IGBTs» представлена на рис. 19 и состоит из девяти ключей $S_{Aa} \dots S_{Cc}$. С входа и выхода блока снимаются сигналы фазного напряжения U_i и тока I_o соответственно. Имитационная модель ключа с двунаправленной проводимостью изображена на рис. 20.

Результаты имитационного моделирования полно отражают изложенные в предыдущих главах теоретические исследования и выводы.

Практическая реализация экспериментального образца МПЧ включает в себя разработку силовой схемы, схемы драйверов силовых транзисторов и схемы цифровой системы управления.

Для изготовления силовой части экспериментального образца МПЧ применены транзисторы IRG4PH50KD фирмы International Rectifier со встроенным ультрабыстрым обратным диодом. Монтаж IGBT транзисторов выполнен на трёх радиаторных пластинах, как показано на рис. 21.

Шесть плат драйверов IGBT содержат по три микросхемы драйверов затворов со встроенным оптроном HCPL-2631 фирмы Fairchild Semiconductor и схемы определения направления протекания выходного тока и определения входного напряжения, выполненные на операционном усилителе. Каждая плата драйверов питается от индивидуального источника питания напряжением 15 В постоянного тока.

Таким образом, три радиаторные пластины на каждой из которых располагаются по шесть IGBT транзисторов и две платы драйвера, соединяются внешним проводным монтажом через силовые клеммники. Фотография собранного экспериментального образца МПЧ с микропроцессорной системой управления показана на рис. 22.

Для реализации задач управления был выбран цифровой сигнальный процессор (ЦСП) Texas Instruments серии F28335, который благодаря своей высокой производительности и поддержке операций с числами с плавающей запятой, позволил реализовать все программные алгоритмы регуляторов и контуров управления. Для разработки применен отладочный набор eZdsp TMS320F28335 выполненный на малогабаритной печатной плате и имеющий предустановленный ЦСП серии F28335 и наличие всей необходимой периферии. Экспериментальный образец микропроцессорной системы управления содержит:

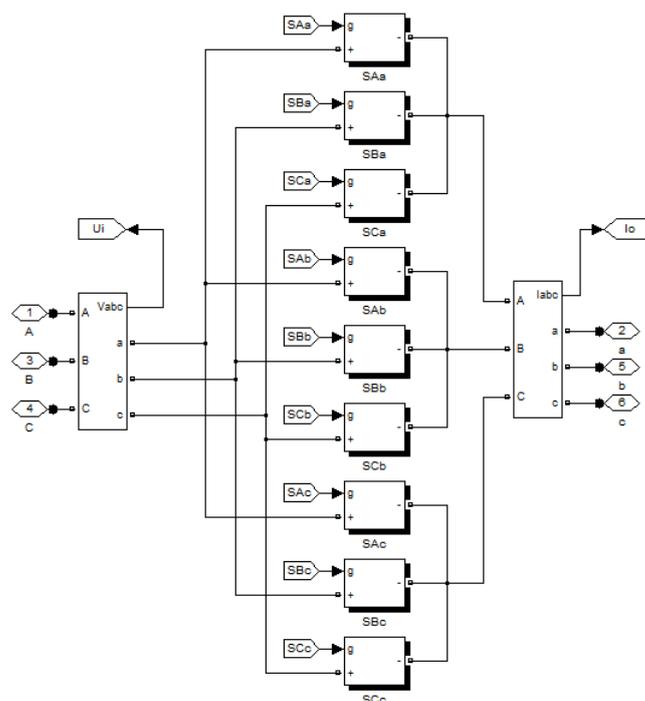


Рис. 19. Имитационная модель блока «Matrix Converter IGBTs»

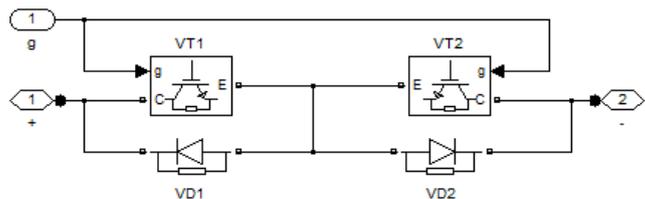


Рис. 20. Имитационная модель ключа с двунаправленной проводимостью

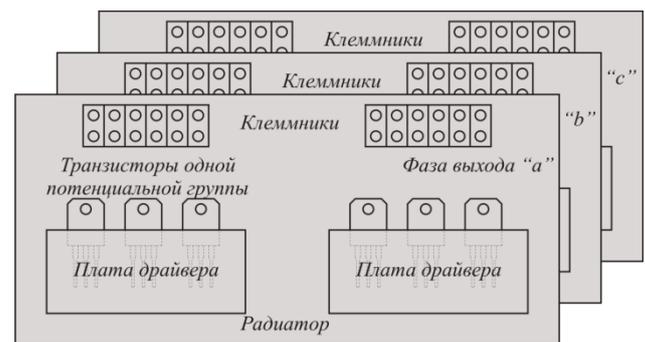
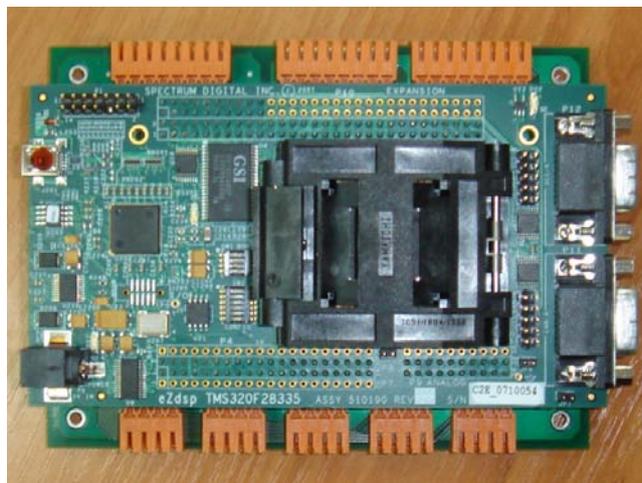
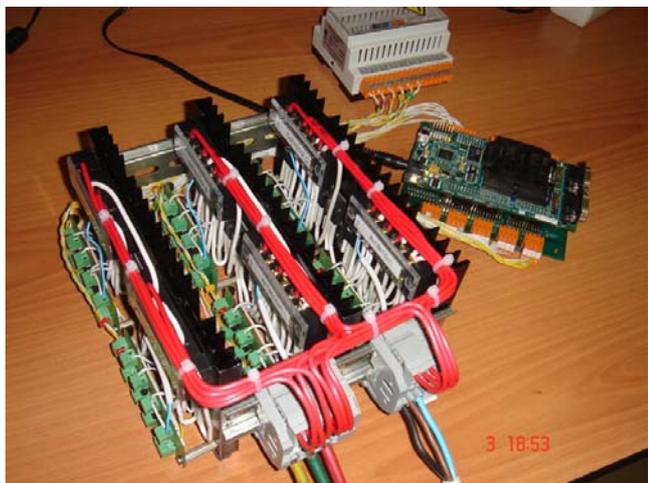


Рис. 21. Монтаж IGBT транзисторов и плат драйверов на радиаторах

- плату eZdsp TMS320F28335 с цифровым сигнальным процессором, реализующим все функции управления и регулирования, а также разъём питания и необходимые последовательные интерфейсы;

- плату сопряжения и измерения (устанавливается под eZdsp), содержащую схемы нормализации входных аналоговых сигналов (8 каналов), ПЛИС для формирования управляющих сигналов на драйверы IGBT и необходимые клеммники для подключения внешних цепей.



а)

б)

Рис. 22. Фотография экспериментального образца МПЧ (а) и микропроцессорной системы управления (б)

Экспериментальные результаты переходных и установившихся процессов для различных режимов работы МПЧ и электропривода на его основе представлены на рис. 23.

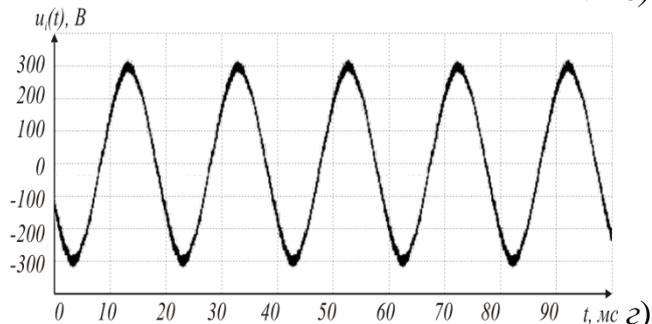
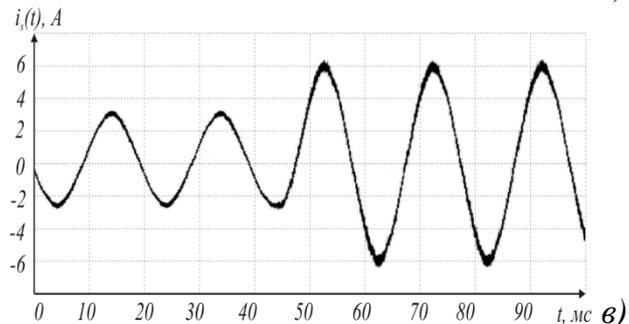
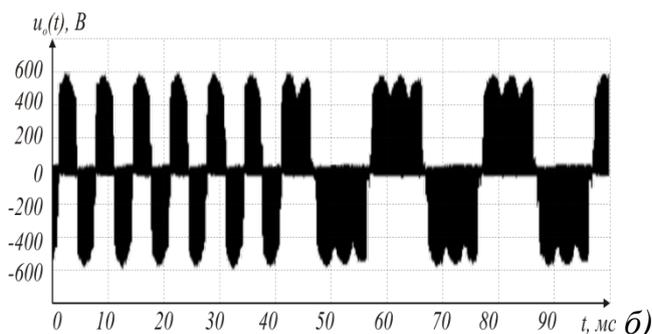
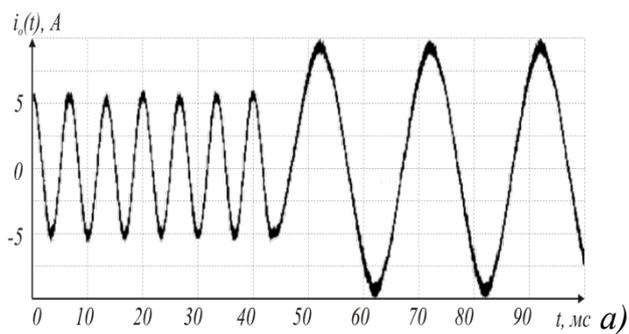


Рис. 23. Осциллограмма тока (а) и линейного напряжения (б) на выходе МПЧ; тока (в) и фазного напряжения (г) на входе МПЧ при работе на активно-резистивную нагрузку

Экспериментальный образец регулируемого электропривода с МПЧ и асинхронным электродвигателем типа *4BP100L4* (4 кВт, 1500 об/мин) был успешно опробован на лабораторном стенде. Реализованная система векторного управления построена по принципу прямого управления моментом (DTC) и обеспечивает точное регулирование момента при низких частотах, включая и нулевую скорость. Экспериментальные результаты представлены на рис. 24-26.

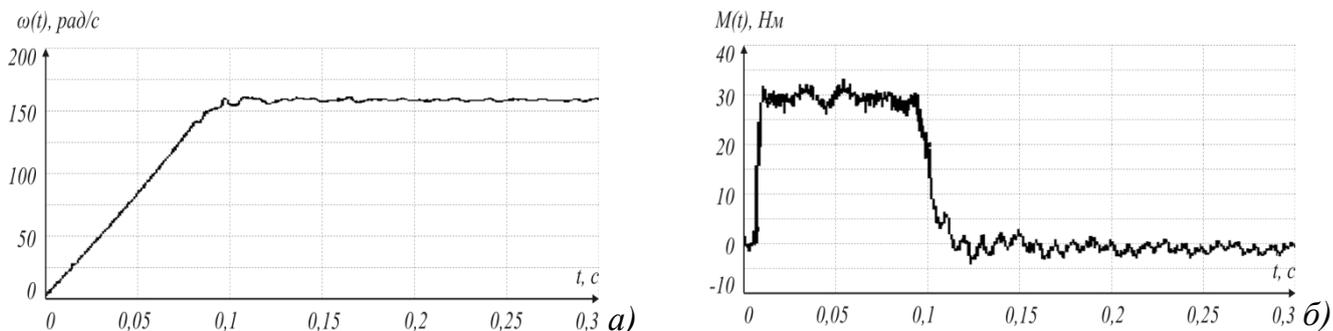


Рис. 24. Осциллограмма скорости (а) и электромагнитного момента (б) при пуске на номинальную скорость без нагрузки

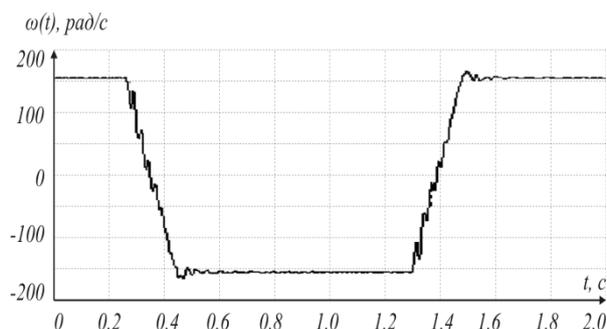


Рис. 25. Осциллограмма скорости при реверсе с номинальной скорости и обратно без нагрузки

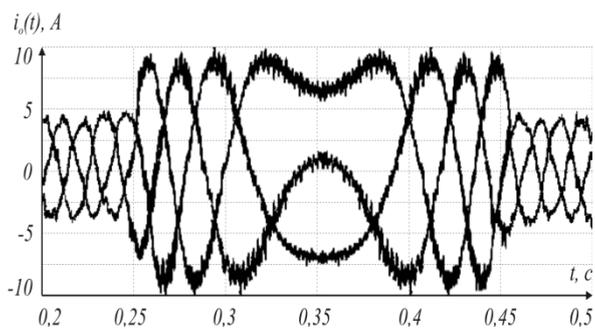


Рис. 26. Осциллограмма тока статора при реверсе с номинальной скорости без нагрузки (время $t=0,2 \dots 0,5$ с)

Экспериментальные результаты в статических режимах при работе образца регулируемого электропривода с МПЧ без нагрузки представлены на рис. 27.

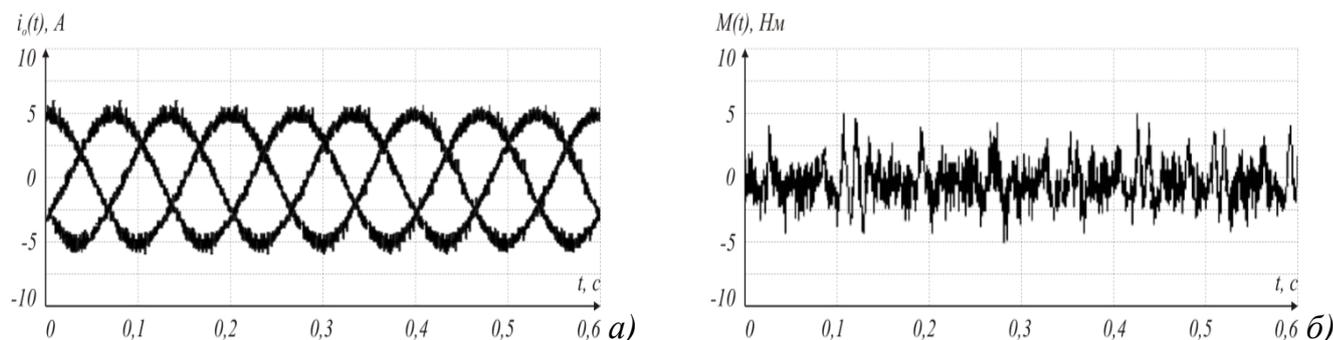


Рис. 27. Ток статора (а) и оценка значения электромагнитного момента (б) в установившемся режиме без нагрузки (задание частоты вращения 5 Гц)

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В результате проведённых теоретических и экспериментальных исследований преобразователя частоты матричного типа с его последующим применением в регулируемом электроприводе переменного тока можно сделать следующие выводы:

1. Разработанные имитационные модели системы позволяют:

- проводить исследования в статических и динамических режимах работы при различных алгоритмах управления;

- проводить исследования устойчивости системы в зависимости от параметров сетевого напряжения, входного и выходного фильтров и нагрузки;

- проводить исследования методов модуляции;

- проводить проектно-исследовательские расчеты.

2. Разработанный алгоритм безопасной коммутации ключей матричного преобразователя обеспечивает существенное сокращение количества неверных коммутаций.

3. Разработанный способ коррекции длительности управляющих импульсов ШИМ обеспечивает компенсацию задержки времени переключения, присущую 4-х ходовым способам коммутации, что позволило уменьшить искажения форм входного и выходного напряжений и токов.

4. Проведённый анализ устойчивости системы и предложенная методика расчёта входного фильтра позволяют оценить устойчивость системы и рассчитать необходимые параметры входного фильтра.

5. Реализован в лабораторных условиях экспериментальный образец матричного преобразователя частоты и на его базе опробован регулируемый электропривод с системой прямого управления моментом.

6. Разработан алгоритм управления и отлажена рабочая программа для микропроцессорной системы управления на базе микроконтроллера TMS320F28335 фирмы Texas Instruments и программируемой логической схемы MAX3000 фирмы Altera.

Результаты настоящей работы могут быть использованы при исследовании, расчётах и проектировании непосредственных преобразователей частоты матричного типа.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Кокорин, Н.В. Анализ устойчивости системы с матричным преобразователем частоты и входным фильтром / А.К. Аракелян, Н.В. Кокорин // Электричество. 2010. №1. С.43-47.

2. Кокорин, Н.В. Комбинированный алгоритм безопасной коммутации ключей матричного преобразователя / А.К. Аракелян, Н.В. Кокорин // Электричество. 2009. №11. С.52-56.

3. Кокорин, Н.В. Моделирование матричного преобразователя / А.К. Аракелян, Н.В. Кокорин // Труды академии электротехнических наук Чувашской Республики. 2009. №1. С.47-52.

4. Кокорин, Н.В. Электропривод с матричным преобразователем / А.К. Аракелян, Н.В. Кокорин // Электричество. 2008. №10. С.57-60.

Личный вклад автора в работах, опубликованных в соавторстве и использованных в диссертации: в [1] соискателю принадлежит разработка основных допущений и теоретических положений, а также проведение математического моделирования и анализ полученных результатов; в [2] – разработка основных положений комбинированного алгоритма безопасной коммутации и проведение экспериментальных результатов; в работах [3-4] – постановка задачи, разработка имитационных моделей и анализ полученных результатов исследований.

Автор выражает глубокую благодарность соавторам опубликованных работ за плодотворное сотрудничество.

Формат 60×84/16. Бумага писчая. Объём 1 п.л.
Тираж 100 экз. Заказ № 124

Отпечатано в типографии Чувашского госуниверситета.
428015, Чебоксары, Московский проспект, 15