

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ  
БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
«МЭИ»**

На правах рукописи



**Митрофаненков Юрий Николаевич**

**РАЗРАБОТКА БЕЗДАТЧИКОВОГО УПРАВЛЕНИЯ ВЕНТИЛЬНО-  
ИНДУКТОРНОЙ МАШИНОЙ**

**Специальность:**

05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

**Диссертация**

**на соискание ученой степени**

**кандидата технических наук**

Научный руководитель:

доктор технических наук

профессор Малиновский А.Е.

Москва 2015

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. ОБЗОР ПРЕДМЕТНОЙ ОБЛАСТИ. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ БЕЗДАТЧИКОВОГО УПРАВЛЕНИЯ ВЕНТИЛЬНО-ИНДУКТОРНОЙ МАШИНОЙ.....	11
1.1. Классификация методов измерения углового положения ротора ВИМ....	11
1.2. Обзор прямых методов измерения углового положения ротора ВИМ .....	12
1.3. Обзор косвенных методов измерения углового положения ротора ВИМ.....	13
1.4. Постановка задачи исследования, формулировка научной новизны.....	16
Выводы по главе 1 .....	20
ГЛАВА 2. ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДА БЕЗДАТЧИКОВОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ УГЛОВОГО ПОЛОЖЕНИЯ РОТОРА.....	22
2.1. Теоретическое и математическое обоснование метода идентификации углового положения ротора ВИМ.....	22
2.2. Анализ вариантов коммутации обмоток ВИМ.....	35
Выводы по главе 2.....	44
ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ БЕЗДАТЧИКОВОГО УПРАВЛЕНИЯ ВЕНТИЛЬНО-ИНДУКТОРНОЙ МАШИНОЙ.....	46
3.1. Обоснование способов и алгоритмов бездатчикового управления ВИМ.....	46
3.2. Разработка имитационной компьютерной модели ВИМ, коммутатора и системы управления.....	57
3.3. Разработка принципиальной схемы системы бездатчикового управления ВИМ.....	72
3.3.1. Разработка источника тока.....	73
3.3.2. Разработка полосового фильтра и компаратора напряжения.....	77
3.3.3. Разработка коммутатора.....	79
3.3.4. Разработка блока драйверов.....	82

3.4. Описание макетного образца бездатчикового ВИП.....	85
Выводы по главе 4.....	87
ГЛАВА 4. ИССЛЕДОВАНИЕ БЕЗДАТЧИКОВОГО УПРАВЛЕНИЯ ВЕНТИЛЬНО-ИНДУКТОРНОЙ МАШИНОЙ.....	88
4.1. Исследование метода идентификации углового положения ротора ВИМ...88	
4.2. Исследование бездатчикового ВИП.....	93
Выводы по главе 4.....	102
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	103
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	104
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	117
ПРИЛОЖЕНИЕ1. Принципиальная схема системы бездатчикового управления ВИМ.....	118
ПРИЛОЖЕНИЕ 2. Коммутационные диаграммы.....	120
ПРИЛОЖЕНИЕ 3. Блок схемы программных модулей.....	123
ПРИЛОЖЕНИЕ 4. Программное обеспечение макетного образца бездатчикового ВИП.....	126
ПРИЛОЖЕНИЕ 5. Программное обеспеченье генератора квадратурных сигналов.....	152

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в практике современного электропривода снижается доля электроприводов постоянного тока. Это можно связать с ненадежностью механического коллекторного узла и более высокой стоимостью двигателей постоянного тока по сравнению с двигателями переменного тока.

Основной альтернативой коллекторным приводам постоянного тока являются асинхронные электроприводы. В то же время, развивается теория и практика электроприводов с вентильными, т.е. электронно-коммутируемыми двигателями, например, на основе вентильно-индукторной машины (ВИМ). В зарубежной научно-технической литературе ВИМ встречается под аббревиатурой SRM (Switched Reluctance Motor). Машины этого типа просты в изготовлении, технологичны и дешевы.

Конструкция ВИМ подобна конструкции шагового двигателя. Питание его обмоток однополярными импульсами напряжения по сигналам от датчика положения ротора. Питание обмоток двигателя от вентильного коммутатора с обратными связями по положению ротора, по току, по напряжению и др. связям, обеспечивает высокие технико-экономические показатели и позволяет применять ВИМ в качестве управляемого двигателя в широком диапазоне мощностей.

Вентильно-индукторный электропривод (ВИП) – относительно новый тип электропривода, которому в последние годы посвящено большое количество исследований и публикаций. В нашей стране в настоящее время ведется активная работа по исследованию и внедрению вентильно-индукторного электропривода отечественными учеными Ильинским Н. Ф., Кузнецовым В. А., Бычковым М. Г., Голландцевым Ю. А., Красовским А. Б., Глухеньким Т. Г., Алямкиным Д. И. и другими.

ВИМ присущи следующие достоинства: конструктивная простота и надежность, низкая стоимость и эксплуатационные затраты, возможность широкого регулирования частоты вращения, высокий КПД и простота управления при применении современной базы электроники.



Электроприводы на основе ВИМ находят все более широкое применение распространение. Перспективными применениями ВИМ являются высокоскоростные и низкоскоростные установки с высокими моментами, а также приводы механизмов, в которых по условиям работы требуется осуществление регулирования частоты вращения в широком диапазоне.

Одна из положительных черт вентильно-индукторного электропривода (ВИП) – возможность построение безредукторного электропривода, в котором реализуется электромеханическая редукция скорости. Исключение механического редуктора из электропривода позволяет существенно снизить энергозатраты, повысить надежность работы привода, улучшить качество технологического процесса.

К основным недостаткам ВИП относят следующее: неработоспособность привода при отказе электронного коммутатора (асинхронный и синхронный приводы могут продолжать работать от сети при полном отказе преобразователя частоты), высокий уровень вибраций и акустического шума, некоторое усложнение конструкции в силу необходимости использования датчиков положения ротора;

Стремление упростить конструкцию, снизить стоимость привода и повысить надежность привело к отказу от датчика углового положения ротора и переходу к системам бездатчикового управления для оценки углового положения.

Это стало возможно благодаря высокой производительности контроллера управления, когда задачи идентификации углового положения ротора и управления ВИМ могут быть распараллелены и решены в реальном времени.

Ряд фирм (Microchip, Texas Instruments и др.) выпускают специализированные контроллеры для управления электрическими машинами (DSP-микроконтроллеры), в том числе и для управления ВИМ. Они обеспечивают высокую производительность и содержат ряд встроенных периферийных аппаратных средств, предназначенных для сопряжения контроллера с инверторами и датчиками обратных связей.

Бездатчиковый вентильно-индукторный электропривод имеет большие перспективы применения. Использование данного привода позволит не только значительно снизить его цену, так как в маломощных приводах цена датчика углового положения зачастую соизмерима с ценой самого двигателя, но и позволит повысить надежность электропривода. При этом современные системы управления электроприводами и современная элементная база позволят решить проблемы, которые в прошлом затрудняли применение данных приводов.

В данной работе рассматривается один из возможных вариантов построения бездатчикового вентильно-индукторного электропривода, разрабатывается алгоритм определения углового положения, решаются схемотехнические сложности, которые возникают при построении бездатчиковой системы управления. Особый акцент сделан на разработку системы управления вентильно-индукторным электроприводом, так как в бездатчиковой системе управления, система должна не только производить качественное управление электроприводом, но и анализировать информацию обратных связей и на основе данной информации вычислять координаты электропривода (угловое положение, скорость, момент).

### **Цель диссертационной работы.**

Разработка, исследование и апробация метода идентификации углового положения ротора ВИМ, основанного на изменении магнитных проводимостей под полюсами машины в зависимости от углового положения ротора ВИМ, отличающегося от существующих тем, что для идентификации угла ротора создаются дополнительные измерительные магнитные потоки, связанные квадратурными соотношениями, и измеряется фаза электродвижущей силы (ЭДС), наводимой в отключенных катушках, что позволяет обеспечить работу ВИМ в режиме «датчика угловых положений» и двигателя одновременно, тем самым получить сигнал рассогласования зубцов статора и ротора в явной форме, что позволяет повысить точность измерений и обеспечить контроль углового положения на нулевых скоростях и торможении на выбеге.

При решении поставленной цели решены следующие задачи:

- разработки метода бездатчиковой идентификации углового положения ротора ВИМ, позволяющего ВИМ работать в режимах двигателя и «датчика углового положения» одновременно;
- Анализа вариантов коммутации обмоток ВИМ, позволяющих реализовать совмещение режимов двигателя и «датчика углового положения»;
- разработки математической и компьютерной имитационной моделей бездатчикового ВИП и макетного образца бездатчикового ВИП;
- исследования метода идентификации углового положения и системы бездатчикового управления ВИМ.

**Методы исследования.** Для решения поставленных в работе задач использовались:

- 1) Теория электропривода и теория автоматического управления;
- 2) Методы имитационного моделирования в системе компьютерной математики *MATLAB* и ее расширении *Simulink*;
- 3) Элементы теории цифровой обработки сигналов;
- 4) Компьютерные методы отладки микропроцессорных систем управления с использованием интегрированной среды разработки *MPLAB IDE*;
- 5) Экспериментальные исследования вентильно-индукторного электропривода.

**Объектом исследования** является вентильно-индукторная машина в составе бездатчикового вентильно-индукторного электропривода и микропроцессорная система управления.

**Обоснованность** научных положений и выводов подтверждается корректным применением теории электропривода, теории автоматического управления, цифровой обработки сигналов и компьютерного моделирования.

**Достоверность** результатов подтверждается вычислительными экспериментами на персональном компьютере и натурными экспериментами.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Метод бездатчиковой идентификации углового положения ротора ВИМ, отличающийся от существующих тем, что для идентификации угла ротора создаются дополнительные измерительные магнитные потоки, связанные квадратурными соотношениями, и измеряется фаза ЭДС, наводимой в отключенных катушках, что позволяет обеспечить работу ВИМ в режиме датчика угловых положений.

2. Варианты коммутации обмоток ВИМ, отличающиеся от используемых ранее тем, что совмещены во времени, но разделены пространственно в катушках машины моменты формирования силовых токов, создающих электромагнитный момент, и измерительных, необходимых для идентификации углового положения, что позволяет совместить работу ВИМ в режимах двигателя и датчика угловых положений.

3. Функциональная схема системы бездатчикового управления ВИМ, отличающаяся от существующих тем, что позволяет в ВИМ совместить режимы двигателя и датчика углового положения, тем самым повысить точность измерений.

4. Компьютерная имитационная модель системы ВИП с предложенным вариантом идентификации углового положения ВИМ.

5. Макетный образец, с помощью которого проведены исследования работы ВИМ в режиме датчика угловых положений и двигательном режиме. Результаты могут быть распространены на ВИМ с числом фаз три и более.

**Научная новизна работы** заключается в следующем:

1. Предложен метод идентификации углового положения ротора ВИМ, основанный на изменении магнитных проводимостей под полюсами машины в зависимости от углового положения ротора ВИМ, отличающийся от существующих тем, что для идентификации угла ротора создаются дополнительные измерительные магнитные потоки, связанные квадратурными соотношениями, и измеряется фаза ЭДС, наводимой в отключенных катушках, что позволяет обеспечить работу ВИМ в режиме датчика угловых положений, тем

самым получить сигнал рассогласования зубцов статора и ротора в явной форме, что позволяет повысить точность измерений и обеспечить контроль углового положения на нулевых скоростях и торможении на выбеге

2. Предложены варианты коммутации обмоток ВИМ, отличающиеся от используемых ранее тем, что совмещены во времени, но разделены пространственно в катушках машины моменты формирования силовых токов, создающих электромагнитный момент, и измерительных, необходимых для идентификации углового положения, что позволяет совместить работу ВИМ в режимах двигателя и датчика угловых положений.

3. Разработана функциональная схема ВИП, реализующая предлагаемый метод идентификации углового положения ротора ВИМ и позволяющая совместить в пределах одной машины двигательный режим работы и режим датчика угловых положений.

**Теоретическая и практическая значимость.** Теоретическая значимость работы заключается в разработке и теоретическом обосновании метода идентификации углового положения ротора ВИМ, основанного на изменении магнитных проводимостей под полюсами машины в зависимости от углового положения ротора ВИМ, для чего в магнитной системе машины создаются дополнительные измерительные магнитные потоки, связанные квадратурными соотношениями, и измеряется фаза ЭДС наводимой в отключенных катушках, что позволяет обеспечить работу ВИМ в режиме датчика угловых положений и двигателя одновременно.

Практическую значимость представляет разработанная имитационная компьютерная модель системы с бездатчиковым управлением ВИМ и разработанный макетный образец, на котором возможно проводить экспериментальные исследования как метода бездатчикового управления ВИМ, так и самой машины.

В настоящий момент макетный образец используется в ООО ИТЦ «ПРОМИКС» в исследовательских целях.

**Реализация результатов работы.** Теоретические положения и результаты экспериментальных исследований использованы в учебном процессе филиала ФГБОУ ВПО «НИУ «МЭИ» в г. Смоленске, а именно:

- в лекционном курсе «Электроприводы с вентильными и шаговыми двигателями» программы подготовки специалистов 140604 – «Электропривод и автоматика промышленных установок и технологических комплексов».

- в лекционном курсе «Применение вычислительной техники в задачах электропривода» программы подготовки бакалавров 140600 – «Электротехника, электромеханика и электротехнологии».

- в лекционном курсе «Микропроцессорные системы управления» программы подготовки бакалавров 140600 – «Электротехника, электромеханика и электротехнологии».

В исследовательских целях макетный образец «Вентильно-индукторный электропривод», используется в ООО ИТЦ «ПРОМИКС» в исследовательских целях

**Апробация работы.** Основные результаты диссертационных исследований докладывались и обсуждались на 7-й, 8-й, 9-й, 10-й, 11-й научно технической конференции студентов и аспирантов (г. Смоленск 2010, 2011, 2012, 2013, 2014 гг. соответственно), 19-й научно-технической конференции студентов и аспирантов (г. Москва 2013 г.), 8-й научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых (г. Иваново 2013г), научная работа заняла 2-е место в областном конкурсе студенческих научных работ (г. Смоленск 2011 г.), отмечена дипломом «за оригинальный и творческий подход» на областном конкурсе молодых ученых (г. Смоленск 2013 г.), разработанный способ бездатчиковой идентификации углового положения ротора принят к использованию компанией ООО «ИТЦ ПРОМИКС» в исследовательских целях

**Публикации.** По теме диссертационных исследований опубликовано 16 научных работ, 3 из них опубликовано в журналах, входящих в перечень ВАК.

## ГЛАВА 1. ОБЗОР ПРЕДМЕТНОЙ ОБЛАСТИ. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ БЕЗДАТЧИКОВОГО УПРАВЛЕНИЯ ВЕНТИЛЬНО-ИНДУКТОРНОЙ МАШИНОЙ.

В главе 1 произведена классификация методов определения углового положения. Приведен краткий обзор методов бездатчикового управления ВИМ. Проанализированы основные преимущества и недостатки рассматриваемых методов. Произведена постановка задачи бездатчикового управления ВИМ.

### 1.1. Классификация методов измерения и идентификации углового положения ротора ВИМ.

Таблица 1.1. Классификация методов измерения углового положения ротора ВИМ.

Методы определения углового положения	Прямые	Использование энкодеров
		Использование оптических датчиков
		Использование вращающихся трансформаторов
	Косвенные	Анализ ЭДС машины
		Анализ потокосцепления
		Анализ токов

Классификация методов измерения углового положения приведена в таблице 1.1. Согласно приведенной классификации методы измерения углового положения можно разделить на две группы: прямые и косвенные. Для измерения углового положения ротора машины при помощи прямых методов измерения используют либо датчики углового положения ротора (энкодеры, оптические датчики, вращающиеся трансформаторы). В случаях измерения углового положения ротора прямыми методами, на выходе измерительной части имеем сигнал, который однозначно через функциональную зависимость связан либо с

текущем угловым положением ротора, либо с изменением углового положения. Особенности прямых методов измерения углового положения ротора является то, что сигнал на выходе измерительной части не зависит, как от режимов работы самой машины, так и от режимов работы силовых цепей питания машины.

В косвенных методах измерения углового положения, также как и в прямых методах, на выходе измерительной части имеем сигнал пропорциональный либо текущему угловому положению ротора, либо изменению углового положения. Сигнал на выходе измерительной части получен не в результате измерения углового положения, а в результате анализа силовых токов и напряжений на катушках машины. Как правило, такие методы измерения имеют ограниченный диапазон режимов работы машины и цепей питания. Для расширения рабочего диапазона очень часто используют комбинацию методов измерения. Что зачастую приводит к значительному усложнению программно аппаратной части системы управления.

## **1.2. Обзор прямых методов измерения углового положения ротора ВИМ.**

В [37,38,39,50] показаны способы управления вентильными и вентильно-индукторными машинами с использованием датчиков положения ротора.

Основными преимуществами использования данных методов является простота реализации системы управления вентильными и вентильно-индукторными машинами, способность обеспечить работу машин в любых режимах работы электропривода, высокая точность определения углового положения.

Недостатком данного метода является сложность конструкции привода, вследствие необходимости установки датчика положения ротора. Использование датчика положения ротора приводит к значительному удорожанию электропривода, особенно в области низких мощностей.



В [38] сделан акцент на использование оптических датчиков положения, где оптический датчик, совместно с коммутатором выполняет роль «электронного коллектора» в ВИП.

Данный подход позволяет обеспечить работу ВИМ во всех режимах работы электропривода, но низкая дискретность датчика положения не позволяют использовать электропривод в следящих системах.

### **1.3. Обзор косвенных методов измерения углового положения ротора ВИМ.**

В [40,41,54,55] рассмотрены методы бездатчикового управления ВИМ, в основе которых лежит анализ величины потокосцепления:

$$\Psi(t) = \int_0^t (U - Ri) dt, \quad (1.1)$$

Расчет кривой намагничивания, и выполнение коммутации при выходе на требуемую кривую намагничивания.

Преимуществами данного метода являются:

1. нечувствительность к насыщению;
2. высокая точность;
3. возможность работы во всех 4-х квадрантах работы электропривода;
4. простота реализации;

Недостатками метода идентификации углового положения являются:

1. ошибка измерения потокосцепления, в результате изменения активного сопротивления обмоток по причине изменения температуры;
2. накопление ошибки измерения потокосцепления вследствие не точного измерения величин подынтегрального выражения, что особенно критично оказывается при работе ВИМ на низких оборотах;
3. отсутствие возможности идентифицировать угловое положение ротора ВИМ в режиме торможения на выбеге и режиме идеального холостого хода.

4. Отсутствие возможности выделения сигнала, связанного с угловым положением ротора фиксированной функциональной зависимостью и дальнейшего его использование системами управления разного уровня.

Проблема бездатчикового управления на низких оборотах решена в [1,2], где при работе ВИМ на низких оборотах для анализа углового положения в отключенной обмотке формируется импульс тока, величина которого такова, что электромагнитный момент, вызванный данным током, не оказывает влияния на работу ВИМ. Момент коммутации определяется по величине потокосцепления, от измерительного импульса.

Однако, данный метод не исключает недостаток 4, указанный выше.

В [3,14] описано бездатчиковое управление ВИМ с использованием «метода регенеративного тока». Этот метод основан на явлении возрастания тока в обмотках ВИМ при переходе в генераторный режим.

Преимуществами данного метода являются: простота реализации, отсутствие влияния температуры обмоток на измерения, отсутствие необходимости измерения и программирования в системе управления кривых намагничивания, работоспособность метода на больших скоростях вращения ВИМ.

Недостатками данного метода являются: большие пульсации момента и акустические шумы, недоиспользование машины, что обусловлено переходом ВИМ в генераторный режим и формирования тормозных моментов, низкие энергетические показатели ВИП, отключение обмоток в зоне максимального значения индуктивности, невозможность использования метода при низких скоростях работы ВИМ, когда значение ЭДС машины значительно ниже напряжения питания.

В [42] рассмотрен метод идентификации углового положения элементами искусственного интеллекта.

Данный метод заключается в выделение частотных образов токов при помощи дискретного преобразования Фурье, затем при помощи искусственных

нейронных сетей определение по частотным образам текущего углового положения ротора ВИМ.

Преимуществами данного метода являются: возможность применять метод к ВИМ любых конструкций, работоспособность в большом диапазоне скоростей.

Недостатком данного метода является то, что для управления каждым типом ВИМ необходимо просвети объемную процедуру обучения искусственной нейронной сети, при этом обучающая выборка должна быть достаточно объемной и представительной. Процедура обучения требует большого объема вычислений и, как следствие, дополнительной вычислительной мощности системы управления, которая после завершения процедуры обучения будет незадействованной.

В [104,105,106] описан метод бездатчикового управления безколлекторными (вентильными, ветильно-индукторными) электрическими машинами, где используется анализ противо ЭДС машины. Задачи обработки сигналов и фильтрации помех решены программными способами.

Представленный метод имеет ряд преимуществ, таких как: простота и аппаратной части, дешевизна, гибкость в настройке, нечувствительность к изменению параметров машины, не требует при наладке определения параметров обмоток.

Недостатками данного метода являются: Неспособность обеспечить бездатчиковое управления при работе машины на низких оборотах, когда величина ЭДС мала; резкие изменения в нагрузки могут привести к рассинхронизации системы управления с машиной.

Стоит отметить, что общим недостатком всех выше перечисленных методов является то, данные методы не позволяют непрерывно контролировать абсолютное значение углов рассогласования зубцов статора и ротора. Также накладываю ряд ограничений и условий на формирование силового тока в обмотках машины и напряжений. Представленные методы не позволяют выделить сигнал, связанный с угловым положением ротора фиксированной функциональной зависимостью, т.е. использовать ВИМ в качестве датчика

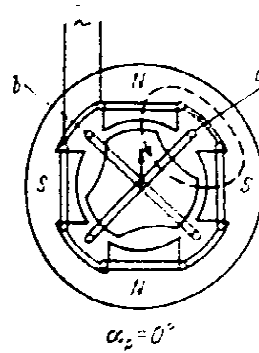
углового положения. Данные методы оказываются не работоспособны в динамических режимах работы ВИМ и цепей питания. Стоит отметить, что все перечисленные выше методы с косвенным определением углового положения ротора ВИМ требуют тестовые включения цепей питания обмоток ВИМ перед началом запуска и (или) осуществление пуска ВИМ в «шаговом» режиме работы.

#### **1.4. Постановка задачи исследования, формулировка научной новизны.**

Как видно, задача бездатчикового управления ВИМ без введения дополнительных ограничений на работу силовой цепи машины, остается открытой. Также не решена задача определения абсолютной величины углов рассогласования зубцов статора и ротора ВИМ. Отсутствуют методы идентификации углового положения ротора, позволяющие получить сигнал значения углового положения в явной форме, либо сигнал связанный жесткой функциональной зависимостью.

Стоит отметить, что работ, где использовались бы конструктивные особенности ВИМ, позволяющие внутри машины совместить прямые и косвенные методы измерения углового положения, также нет.

Не трудно заметить конструктивные сходства ВИМ с синусно-косинусными индукционными редуктосинами. В ВИМ, также как и в редуктосинах, магнитная проводимость под полюсами машины зависит от углового положения ротора. Тем более, что в многофазной ВИМ в каждый момент времени задействованы не все обмотки, а только часть. Недействующие обмотки можно использовать для формирования внутри ВИМ измерительных потоков, аналогичных потокам, формируемых в редуктосинах. И по аналогии с редуктосинами производить определение углового положения ротора.



**Рис. 1.1.** Схема двухфазного редуктосина.

Целью данной работы является разработка, исследование и апробация метода идентификации углового положения ротора ВИМ, основанного на изменении магнитных проводимостей под полюсами машины в зависимости от углового положения ротора ВИМ, отличающийся от существующих тем, что для идентификации угла ротора создаются дополнительные измерительные магнитные потоки, связанные квадратурными соотношениями, и измеряется фаза ЭДС наводимой в отключенных катушках, что позволяет обеспечить работу ВИМ в режиме «датчика угловых положений» и двигателя одновременно, тем самым получить сигнал рассогласования зубцов статора и ротора в явной форме, что позволяет повысить точность измерений и обеспечить контроль углового положения на нулевых скоростях и торможении на выбеге.

Этапы диссертационных исследований:

1. Исходя из конструктивного сходства ВИМ с датчиками угловых положений, разработать метод идентификации углового положения ротора ВИМ.
2. Исследовать работу ВИМ в режиме датчика углового положения
3. Реализовать и исследовать одновременную работу ВИМ в режиме датчика углового положения и двигателя.
4. Рассмотреть и исследовать различные варианты коммутации обмоток ВИМ, позволяющие использовать ВИМ в качестве двигателя и датчика углового положения одновременно.

Рассмотрим реализацию в ВИМ режима датчика угловых положений.

Для этого, покажем принцип работы такого датчика положения ротора, как синус-косинусный индукторный редуктосин. В редуктосинах питание обмотки возбуждения осуществляется от источника синусоидального напряжения. Измерения снимаются с двух вторичных обмоток (синусной и косинусной). Соотношение амплитуд напряжения на выходе датчика зависит от углового положения датчика. Если же вторичные обмотки редуктосина подключить к источникам напряжения, фазы которых сдвинуты на 90 градусов, а на первичной обмотке измерять фазу напряжения, то фаза напряжения на обмотке будет зависеть от углового положения датчика.

Аналогичную технологию можно использовать и для измерения углового положения ротора ВИМ. Для этого в полюсах, имеющих разные магнитные проводимости, магнитной системы ВИМ необходимо сформировать квадратурно связанные измерительные МДС. Так как магнитная проводимость под полюсами ВИМ различна и зависит от углового положения ротора ВИМ, то связанные квадратурно магнитные потоки будут суммироваться в магнитной системе ВИМ с разными амплитудами и приводить к возникновению суммарного магнитного потока, фаза которого зависит от углового положения ротора ВИМ. Для измерения текущего углового положения ротора ВИМ достаточно измерить фазу измерительного потока или фазу ЭДС наводимую измерительными потоками.

Метод идентификации углового положения ротора ВИМ и работа ВИМ в режиме датчика угловых положений и в режиме двигателя одновременно подробно рассмотрены в главе 2.

Достоинствами предлагаемого метода идентификации углового положения ротора ВИМ являются:

1. Работоспособность во всех режимах работы ВИМ (в двигательном, генераторном, торможения на выбеге);
2. Работоспособность на любых скоростях работы ВИМ;

3. На выходе измерительной части имеем сигнал, параметры которого фиксировано связаны через функциональную зависимость с угловым положением ротора, при этом форма сигнала не зависит от режима работы ВИМ.

Недостатки метода идентификации углового положения:

1. Наличие дополнительных цепей, необходимых для создания измерительных потоков;
2. Относительная сложность системы управления и коммутатора;
3. Возможность применять метод только к многофазным ВИМ (количество фазных обмоток должно быть не менее 3-х), имеющим четное количество зубцов на роторе и статоре.

При работе над диссертацией решены следующие задачи:

- разработки метода бездатчиковой идентификации углового положения ротора ВИМ, позволяющего ВИМ работать в режимах двигателя и «датчика углового положения» одновременно;
- анализа вариантов коммутации обмоток ВИМ, позволяющих реализовать совмещение режимов двигателя и «датчика углового положения»;
- разработки математической и компьютерной имитационной моделей бездатчикового ВИП и макетного образца бездатчикового ВИП;
- исследования метода идентификации углового положения и системы бездатчикового управления ВИМ.

Научная новизна работы заключается в том, что

1. Предложен метод идентификации углового положения ротора ВИМ, основанный на изменении магнитных проводимостей под полюсами машины в зависимости от углового положения ротора ВИМ, отличающийся от существующих тем, что для идентификации угла ротора создаются дополнительные измерительные магнитные потоки, связанные квадратурными соотношениями, и измеряется фаза ЭДС, наводимой в отключенных катушках, что позволяет обеспечить работу ВИМ в режиме «датчика угловых положений».

2. Предложены варианты коммутации обмоток ВИМ, отличающиеся от используемых ранее тем, что совмещены во времени, но разделены пространственно в катушках машины моменты формирования силовых токов, создающих электромагнитный момент, и измерительных, необходимых для идентификации углового положения, что позволяет совместить работу ВИМ в режимах двигателя и «датчика угловых положений».

3. Создана компьютерная имитационная модель ВИП с бездатчиковым управлением ВИМ, на которой проведен компьютерный эксперимент в двигательном режиме работы ВИМ и «режиме датчика углового положения», а также совмещение этих режимов во времени. Результаты моделирования подтверждают адекватность предложенного метода идентификации углового положения ротора ВИМ.

4. Разработана функциональная схема ВИП, реализующая предлагаемый метод идентификации углового положения ротора ВИМ и позволяющая совместить в пределах одной машины двигательный режим работы и режим «датчика угловых положений».

5. Реализован макетный образец, с помощью которого проведены исследования работы ВИМ в режиме «датчика угловых положений» и двигательном режиме. Результаты могут быть распространены на ВИМ с числом фаз три и более.

### **Выводы по главе 1:**

Первая глава диссертации посвящена теоретическому обзору. В главе решены следующие задачи:

1. Приведена классификация методов определения угловых положений ротора ВИМ.
2. Произведен обзор наиболее распространенных методов определения углового положения ротора ВИМ, представлены их основные преимущества и недостатки.



3. Обозначена цель работы и ее актуальность. Представлены задачи, решаемые при работе над диссертацией. Представлены преимущества и недостатки рассматриваемого в диссертации метода определения углового положения.

## ГЛАВА 2. ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДА БЕЗДАТЧИКОВОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ УГЛОВОГО ПОЛОЖЕНИЯ РОТОРА.

Как было показано выше, несмотря на наличие большого количества методов бездатчиковой идентификации углового положения ротора, в данной тематике остаются открытыми.

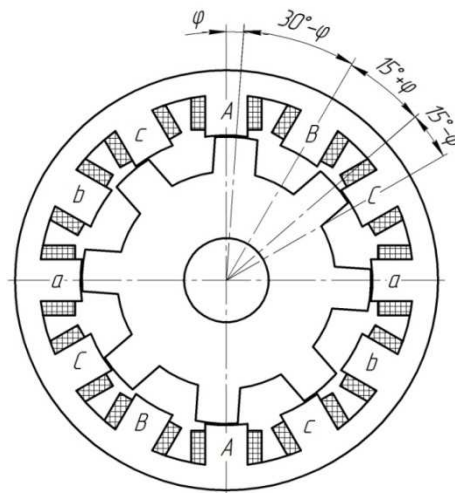
В главе 2 произведено математическое и теоретическое обоснование способа идентификации углового положения ротора ВИМ, в основе которого лежит формирование в магнитной системе машины дополнительных измерительных потоков и измерение фазы ЭДС, наводимой данными потоками. Представлены зависимости фазы измерительной ЭДС от углового положения ротора ВИМ для 3-х и 6-ти фазных исполнений машины. Представлены и проанализированы результаты апробации метода бездатчиковой идентификации углового положения. Проанализированы варианты бездатчиковой коммутации углового положения ротора ВИМ.

### **2.1. Теоретическое и математическое обоснование метода бездатчикового определения углового положения ротора ВИМ.**

Было отмечено, что ВИМ имеют конструктивное сходство с такими датчиками углового положения, как синус-косинусный индукторный редуктосин. Рассмотрим, как использовать данные конструктивные сходства для использования ВИМ в режиме датчика угловых положений. Для этого в полюсах, имеющих разные магнитные проводимости, магнитной системы ВИМ необходимо сформировать измерительные МДС, связанные между собой квадратурными соотношениями, частотой порядка 10 кГц. Так как магнитная проводимость под полюсами ВИМ различна и зависит от углового положения ротора ВИМ, то связанные между собой квадратурно магнитные потоки будут суммироваться в магнитной системе ВИМ с разными амплитудами и приводить к возникновению суммарного магнитного потока, фаза которого зависит от углового положения ротора ВИМ.

Один из вариантов реализации данного метода – это формирование измерительных МДС при помощи дополнительных измерительных катушек, которые следует установить на полюсах ВИМ. Недостатком данного варианта является необходимость вмешательства в конструкцию ВИМ, что в промышленных условиях означает выпуск специальных исполнений машин.

Альтернативным вариантом реализации данного метода является использование для формирования измерительных МДС при помощи тех же катушек, что и для формирования силовых токов, отвечающих за формирование электромагнитного момента ВИМ. В этом случае измерительные токи в катушках формируются на интервалах коммутации, когда катушки в фазной обмотке отключены от питающей сети, и не участвуют в формировании электромагнитного момента. В этом случае для использования ВИМ в качестве датчика углового положения создадим в двух катушках, расположенных в разных фазных обмотках ВИМ, измерительные токи частотой 10 кГц, связанные квадратурными соотношениями. Измерительные токи приводят к возникновению в магнитной системе ВИМ измерительных МДС, которые, как и токи, связаны квадратурными соотношениями. Так как магнитные проводимости под полюсами фаз двигателя различны и соотношения магнитных проводимостей зависит от углового положения ротора двигателя, то потоки, вызванные измерительными МДС, суммируются в магнитной системе с разными амплитудами. В результате имеем суммарный магнитный измерительный поток, фаза которого зависит от углового положения ротора двигателя, следовательно, имея информацию о фазе потока можно вычислить текущее угловое положение ротора. Анализировать фазу потока можно по фазе ЭДС наводимой в отключенных обмотках машины.

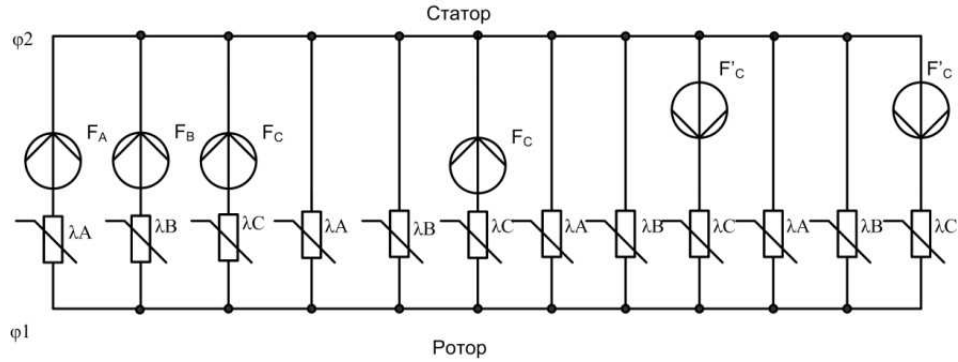


**Рис. 2.1.** Трехфазная ВИМ конфигурации 12/8.

Рассмотрим реализацию метода на примере трехфазной ВИМ конфигурации 12/8 (рисунок 2.1.). Для управления формированием электромагнитного момента ВИМ используем одиночную коммутацию фаз. Таким образом, в каждый момент времени только через одну фазную обмотку ВИМ протекают силовые токи, при этом катушки в данной фазе соединены последовательно и согласно. Для того что бы ВИМ работал одновременно в режиме двигателя и датчика углового положения, создается в двух катушках, незадействованных в данный момент времени для формирования электромагнитного момента и расположенных в разных фазных обмотках, измерительные токи, связанные квадратурными соотношениями. Таким образом, если в формировании электромагнитного момента задействована фазная обмотка С, то в одной катушке фазной обмотки А и одной катушке фазной обмотки В формируются измерительные переменные токи частотой 10 кГц, связанные квадратурой. Для исключения влияния измерительных токов на электромеханическую характеристику ВИМ, их величина будет как минимум на порядок меньше номинальной. Протекающие по катушкам силовые и измерительные токи создают в магнитной системе машины МДС.

При условии, что магнитная проводимость стали равна бесконечности, и отсутствует поток рассеяния статора, то магнитные потоки статора будут замыкаться через его зубцы, а магнитная проводимость магнитной цепи будет определяться магнитной проводимостью воздушного зазора между зубцами

статора и ротором, насыщение магнитной цепи обусловлено насыщением зубцовой зоны ВИМ. В этом случае справедлива, представленная на рисунке 2.2. схема замещения магнитной цепи ВИМ. МДС  $F_A$  и  $F_B$  возникают в результате протекания по катушкам ВИМ измерительных токов. МДС  $F_C$  и  $F'_C$  возникают вследствие протекания по катушкам ВИМ силовых токов.



**Рис 2.2.** Схема замещения магнитной системы трехфазной ВИМ конфигурации 12/8

Для упрощения математического описания можно принять, что магнитные проводимости в зависимости от углового положения ротора ВИМ изменяются по синусоидальному закону от 0 до  $\lambda_{\max}$ .

Магнитные проводимости под полюсами трехфазной ВИМ конфигурации 12/8 описываются уравнениями:

Магнитная проводимость в воздушном зазоре под полюсами фазы А:

$$\lambda_A = 0,5 \cdot \lambda_{\max} (1 + \cos(\Theta)) \quad (2.1)$$

Магнитная проводимость в воздушном зазоре под полюсами фазы В.

$$\lambda_B = 0,5 \cdot \lambda_{\max} (1 + \cos(120^\circ + \Theta)) \quad (2.2)$$

Магнитная проводимость в воздушном зазоре под полюсами фазы С

$$\lambda_C = 0,5 \cdot \lambda_{\max} (1 + \cos(120^\circ - \Theta)), \quad (2.3)$$

где  $\Theta$  - угол рассогласования зубцов ротора и статора под полюсом фазы А,  $\lambda_{\max}$  - максимальная магнитная проводимость под полюсами фаз.

МДС в магнитной системе ВИМ приводят к возникновению разности магнитных потенциалов между статором и ротором:

$$\varphi_2 - \varphi_1 = \frac{F_A \lambda_A + F_B \lambda_B + 2F_C \lambda_C - 2F'_C \lambda_C}{4(\lambda_A + \lambda_B + \lambda_C)} \quad (2.4)$$

При включении катушек в фазной обмотке ВИМ во время формирования силовых токов последовательно согласно справедливо выражение:  $F_C = F'_C$ .

Разность магнитных потенциалов между статором и ротором приобретает вид:

$$\varphi_2 - \varphi_1 = \frac{F_A \lambda_A + F_B \lambda_B}{4(\lambda_A + \lambda_B + \lambda_C)} \quad (2.5)$$

Так как по катушкам фаз А и В протекают токи связанные квадратурными соотношениями, то МДС рассчитываются по формулам:

$$F_A = W \cdot I \cdot \sin(\omega t) = F \cdot \sin(\omega t) \text{ – МДС фазы А.} \quad (2.6)$$

$$F_B = W \cdot I \cdot \cos(\omega t) = F \cdot \cos(\omega t) \text{ – МДС фазы В.} \quad (2.7)$$

В результате в катушках, в которых не производится модулирование квадратур токов, имеем измерительный магнитный поток:

$$\Phi = \Phi_{\max} [\sin(\omega t)(1 + \cos(\Theta)) + \cos(\omega t)(1 + \cos(120^\circ + \Theta))], \quad (2.8)$$

где  $\Phi_{\max} = \frac{\lambda_A}{4(\lambda_A + \lambda_B + \lambda_C)}$  – максимальный поток для фазы А,

$\Phi_{\max} = \frac{\lambda_B}{4(\lambda_A + \lambda_B + \lambda_C)}$  – максимальный поток для фазы В,

$\Phi_{\max} = \frac{\lambda_C}{4(\lambda_A + \lambda_B + \lambda_C)}$  – максимальный поток для фазы С.

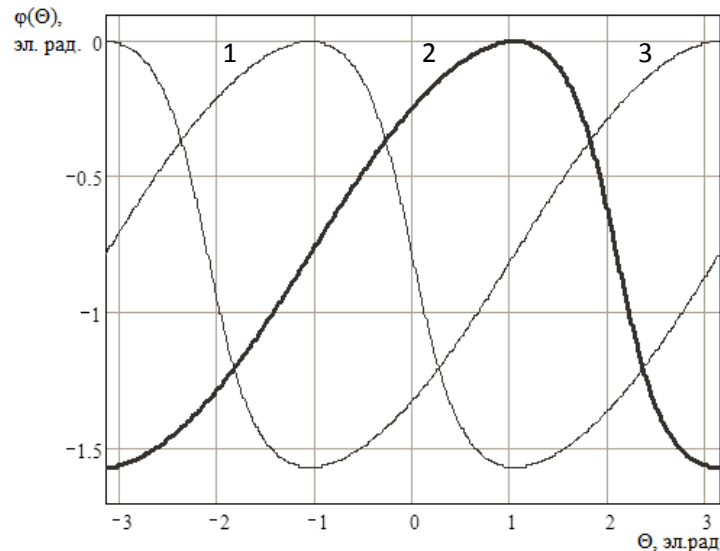
Измерительный поток приводит к возникновению измерительной ЭДС:

$$E = -\frac{d\Phi}{dt} = -E_{\max} \left[ \begin{array}{l} \cos(\omega t) + \frac{1}{2} \cos(\omega t - \Theta) + \frac{1}{2} \cos(\omega t + \Theta) - \sin(\omega t) - \\ -\frac{1}{2} \sin(\omega t - 120^\circ - \Theta) - \frac{1}{2} \sin(\omega t + 120^\circ + \Theta) \end{array} \right] = \quad (2.9)$$

$$= -E_{\max} [\cos(\omega t)(1 + \cos(\Theta)) + \sin(\omega t)(1 + \cos(120^\circ + \Theta))]$$

Как видно, фаза измерительной ЭДС зависит от углового положения ротора двигателя и не зависит от величины силового тока. В связи с чем, для измерения углового положения ротора ВИМ достаточно измерять фазу ЭДС, наводимой измерительными потоками в одной из незадействованных катушек. На рисунке 2.3 приведены семейства зависимостей фазы измерительной ЭДС от углового положения ротора ВИМ для трех случаев модулирования измерительных токов:

1. Модулирование измерительных токов осуществляется в катушках фазных обмоток А и В;
2. Модулирование измерительных токов осуществляется в катушках фазных обмоток В и С;
3. Модулирование измерительных токов осуществляется в катушках фазных обмоток А и С;



**Рис. 2.3.** Семейство зависимостей фазы измерительной ЭДС от углового положения ротора ВИМ.

- 1 – зависимость при модулировании измерительных токов в катушках фазных обмоток А и В
- 2 – зависимость при модулировании измерительных токов в катушках фазных обмоток В и С
- 3 – зависимость при модулировании измерительных токов в катушках фазных обмоток С и А

В случае использования предлагаемого метода определения углового положения ротора применительно к ВИМ, количество фазных обмоток которой более 3-х, имеем большее количество неиспользуемых катушек, установленных на полюсах, воздушные зазоры под которыми имеют различную магнитную проводимость. В связи с чем, появляется большее количество вариантов для выбора катушек для модулирования квадратур информационных токов. В результате имеем большее количество зависимостей фазы измерительной ЭДС от углового положения ротора ВИМ, что позволяет исключить возникновения условий, когда не возможно однозначно определить угловое положение ротора ВИМ, а это возможно в случае работы вблизи экстремума зависимостей.

Использование предлагаемого метода в ВИМ с большим количеством фазных обмоток позволяет сделать метод определения углового положения более гибким и применимым практически к любым режимам работы ВИМ и режимам коммутации силовых токов. В случае использования 6-ти фазной ВИМ, имеющей 12 зубцов на статоре и 10 на роторе, магнитные проводимости под полюсами в зависимости от углового положения ротора будут описываться уравнениями:

Магнитная проводимость в воздушном зазоре под полюсом фазы А:

$$\lambda_A = 0,5 \cdot \lambda(1 + \cos(\Theta)) \quad (2.10)$$

Магнитная проводимость в воздушном зазоре под полюсом фазы В:

$$\lambda_B = 0,5 \cdot \lambda(1 + \cos(60^\circ + \Theta)) \quad (2.11)$$

Магнитная проводимость в воздушном зазоре под полюсом фазы С:

$$\lambda_C = 0,5 \cdot \lambda(1 + \cos(120^\circ + \Theta)) \quad (2.12)$$

Магнитная проводимость в воздушном зазоре под полюсом фазы D:

$$\lambda_D = 0,5 \cdot \lambda(1 + \cos(180^\circ - \Theta)) \quad (2.13)$$

Магнитная проводимость в воздушном зазоре под полюсом фазы E:

$$\lambda_E = 0,5 \cdot \lambda(1 + \cos(120^\circ - \Theta)) \quad (2.14)$$

Магнитная проводимость в воздушном зазоре под полюсом фазы F:

$$\lambda_F = \lambda(1 + \cos(60^\circ - \Theta)) \quad (2.15)$$

Разность магнитных потенциалов между статором и ротором в зависимости от углового положения ротора для 12-ти фазной ВИМ при формировании измерительных МДС в катушках фазных обмоток А и В имеет вид:

$$\varphi_2 - \varphi_1 = \frac{F_A \lambda_A + F_B \lambda_B}{2(\lambda_A + \lambda_B + \lambda_C + \lambda_D + \lambda_E + \lambda_F)} = \frac{\lambda F \sin(\alpha t)(1 + \cos(\Theta)) + \lambda F \cos(\alpha t)(1 + \cos(60^\circ + \Theta))}{2(\lambda_A + \lambda_B + \lambda_C + \lambda_D + \lambda_E + \lambda_F)} \quad (2.16)$$

Разность магнитных потенциалов вызывает возникновение измерительного потока

$$\Phi = \Phi_{\max} (\sin(\alpha t)(1 + \cos(\Theta)) + \cos(\alpha t)(1 + \cos(60^\circ + \Theta))), \quad (2.17)$$

где



$$\Phi_{\max} = \frac{\lambda_A}{2(\lambda_A + \lambda_B + \lambda_C + \lambda_D + \lambda_E + \lambda_F)} \text{ — для фазы А;}$$

$$\Phi_{\max} = \frac{\lambda_B}{2(\lambda_A + \lambda_B + \lambda_C + \lambda_D + \lambda_E + \lambda_F)} \text{ — для фазы В;}$$

$$\Phi_{\max} = \frac{\lambda_C}{2(\lambda_A + \lambda_B + \lambda_C + \lambda_D + \lambda_E + \lambda_F)} \text{ — для фазы С;}$$

$$\Phi_{\max} = \frac{\lambda_D}{2(\lambda_A + \lambda_B + \lambda_C + \lambda_D + \lambda_E + \lambda_F)} \text{ — для фазы D;}$$

$$\Phi_{\max} = \frac{\lambda_E}{2(\lambda_A + \lambda_B + \lambda_C + \lambda_D + \lambda_E + \lambda_F)} \text{ — для фазы E;}$$

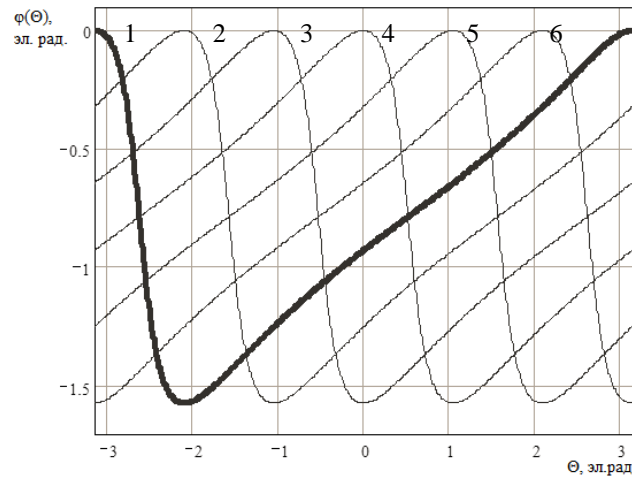
$$\Phi_{\max} = \frac{\lambda_F}{2(\lambda_A + \lambda_B + \lambda_C + \lambda_D + \lambda_E + \lambda_F)} \text{ — для фазы F.}$$

Измерительная ЭДС описывается уравнениями:

$$E \equiv -E_{\max} (\cos(\omega t) - \sin(\omega t) + 0,5 \cdot (\cos(\omega t - \varphi) + \cos(\omega t + \varphi) - \sin(\omega t - \varphi - 60) - \sin(\omega t + \varphi + 60))) \quad (2.18)$$

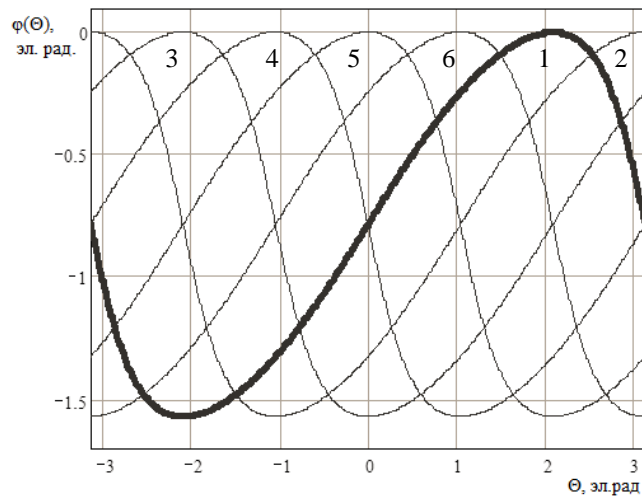
$$E = -E_{\max} (\cos(\omega t)(1 + \cos(\Theta)) - \sin(\omega t)(1 + \cos(60^\circ + \Theta))) \quad (2.19)$$

На рисунках 2.4, 2.5, 2.6 приведены семейства зависимостей фазы измерительной ЭДС от углового положения ротора ВИМ при различных комбинациях выбора катушек для модулирования квадратур измерительного тока применительно к 6-фазной ВИМ, имеющей 12 зубцов на статоре и 10 зубцов на роторе. На рисунке 2.4 представлены зависимости при модулировании измерительных токов в парах катушек принадлежащих фазным обмоткам А-В, В-С, С-D, D-E, E-F.



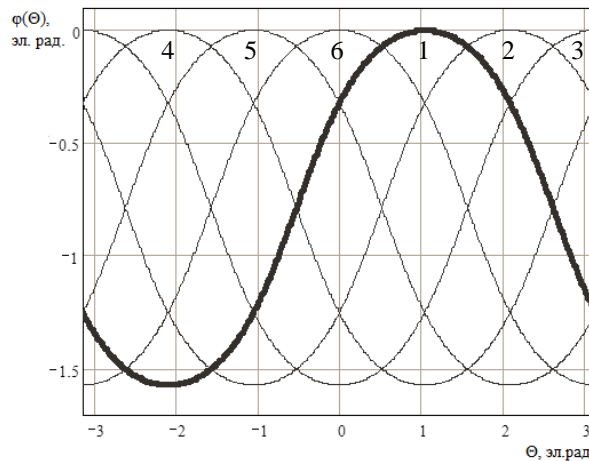
**Рис. 2.4.** Семейство зависимостей фазы измерительной ЭДС от углового положения ротора ВИМ.

- 1 – зависимость при модулировании измерительных токов в катушках фазных обмоток А и В
- 2 – зависимость при модулировании измерительных токов в катушках фазных обмоток В и С
- 3 – зависимость при модулировании измерительных токов в катушках фазных обмоток С и D
- 4 – зависимость при модулировании измерительных токов в катушках фазных обмоток D и E
- 5 – зависимость при модулировании измерительных токов в катушках фазных обмоток E и F
- 6 – зависимость при модулировании измерительных токов в катушках фазных обмоток F и А



**Рис. 2.5.** Семейство зависимостей фазы измерительной ЭДС от углового положения ротора ВИМ.

- 1 – зависимость при модулировании измерительных токов в катушках фазных обмоток А и С
- 2 – зависимость при модулировании измерительных токов в катушках фазных обмоток В и D
- 3 – зависимость при модулировании измерительных токов в катушках фазных обмоток С и E
- 4 – зависимость при модулировании измерительных токов в катушках фазных обмоток D и F
- 5 – зависимость при модулировании измерительных токов в катушках фазных обмоток E и А
- 6 – зависимость при модулировании измерительных токов в катушках фазных обмоток F и В



**Рис. 2.6.** Семейство зависимостей фазы измерительной ЭДС от углового положения ротора ВИМ.

- 1 – зависимость при модулировании измерительных токов в катушках фазных обмоток А и D
- 2 – зависимость при модулировании измерительных токов в катушках фазных обмоток В и Е
- 3 – зависимость при модулировании измерительных токов в катушках фазных обмоток С и F
- 4 – зависимость при модулировании измерительных токов в катушках фазных обмоток D и А
- 5 – зависимость при модулировании измерительных токов в катушках фазных обмоток Е и В
- 6 – зависимость при модулировании измерительных токов в катушках фазных обмоток F и С

На рисунке 2.5 приведены зависимости фазы измерительной ЭДС при модулировании измерительных токов в парах катушек принадлежащих фазным обмоткам А-С, В-D, С-Е, D-F, Е-А, F-B. На рисунке 2.6 приведены зависимости фазы измерительной ЭДС при модулировании измерительных токов в парах катушек принадлежащих фазным обмоткам А-D, В-Е, С-F, D-А, Е-В, F-С. Стоит отметить, что характеристики, представленные на рисунке 2.4., в отличие от характеристик представленных на рисунках 2.5. - 2.6., имеют более протяженный участок, который можно считать линейным. Что позволяет упростить построение функционального преобразователя фазы измерительной ЭДС в угловое положение ротора. В связи с чем, данные характеристики более удобны для использования при практической реализации бездатчикового управления.

Из сравнения характеристик для трехфазной ВИМ, представленных на рисунке 2.3., и 6-фазной ВИМ, представленных на рисунке 2.4., видно, что для 6-фазной ВИМ характеристики имеют более протяженный линейный участок, что упрощает реализацию идентификации углового положения ротора. Наличие

у 6-фазной ВИМ большого количества катушек, позволяет использовать не только одиночную коммутацию фаз, как у трехфазной ВИМ, но и парную или смешанную. Следует отметить, что даже в случае использования парной коммутации в каждый момент времени остаются незадействованными катушки расположенные в 4-х обмотка, принадлежащих разным фазам, которые можно использовать для модулирования измерительных потоков и анализа фазы измерительной ЭДС. В связи с чем, предлагаемый метод идентификации углового положения ротора ВИМ предпочтительно использовать для многофазных ВИМ.

В реальных ВИМ между зубцами статора и ротора в согласованном положении присутствует воздушный зазор, в связи с чем магнитная проводимость под полюсами фазных обмоток изменяется не от 0 до до  $\lambda_{\max}$ , а от  $\lambda_{\min}$  до  $\lambda_{\max}$ .

Примем, что магнитная проводимость в зависимости от углового положения ротора изменяется по синусоидальному закону от  $\lambda_{\min}$  до  $\lambda_{\max}$ , тогда для трехфазной ВИМ можно записать зависимости магнитных проводимостей в воздушном зазоре от углового положений ротора:

$$\lambda_A(\Theta) = \frac{\lambda_{\max} + \lambda_{\min}}{2} + \frac{\lambda_{\max} - \lambda_{\min}}{2} \cdot \cos(\Theta) = \lambda_{cp} + \lambda_{AM} \cdot \cos(\Theta) \quad (2.20)$$

$$\lambda_B(\Theta) = \frac{\lambda_{\max} + \lambda_{\min}}{2} + \frac{\lambda_{\max} - \lambda_{\min}}{2} \cdot \cos(120^\circ + \Theta) = \lambda_{cp} + \lambda_{AM} \cdot \cos(120^\circ + \Theta) \quad (2.21)$$

$$\lambda_C(\Theta) = \frac{\lambda_{\max} + \lambda_{\min}}{2} + \frac{\lambda_{\max} - \lambda_{\min}}{2} \cdot \cos(120^\circ - \Theta) = \lambda_{cp} + \lambda_{AM} \cdot \cos(120^\circ - \Theta), \quad (2.22)$$

где  $\lambda_{cp} = \frac{\lambda_{\max} + \lambda_{\min}}{2}$  – среднее значение магнитной проводимости в воздушном зазоре под полюсами статора,  $\lambda_{AM} = \frac{\lambda_{\max} - \lambda_{\min}}{2}$  – амплитуда изменения магнитной проводимости

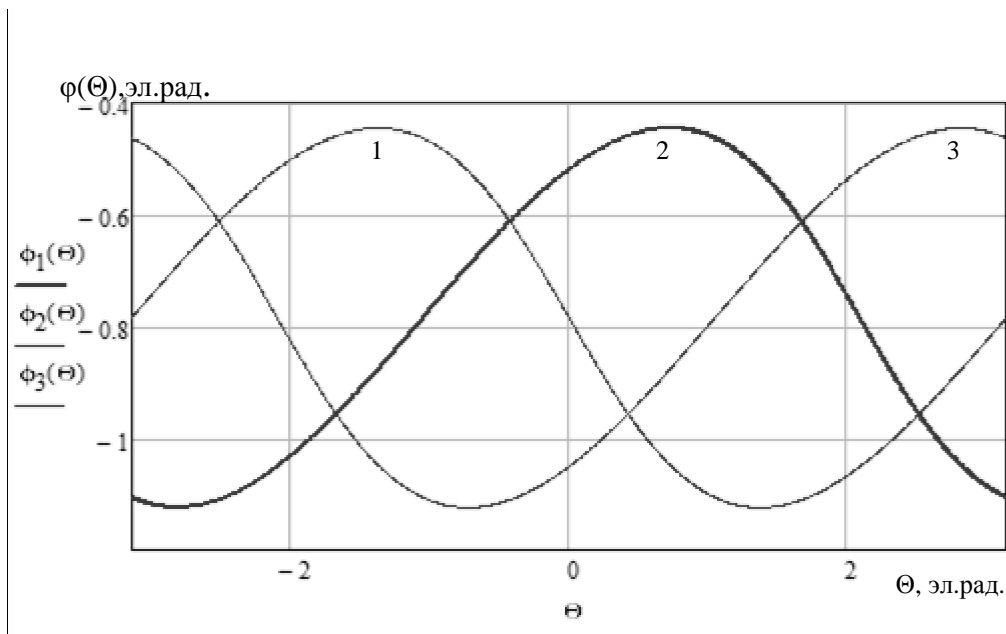
Выражение (2.8) принимает вид:

$$\Phi = \Phi_{\max} [\sin(\omega t)(\lambda_{cp} + \lambda_{AM} \cos(\Theta)) + \cos(\omega t)(\lambda_{cp} + \lambda_{AM} \cos(120^\circ + \Theta))] \quad (2.23)$$

Значение измерительной ЭДС примет вид:

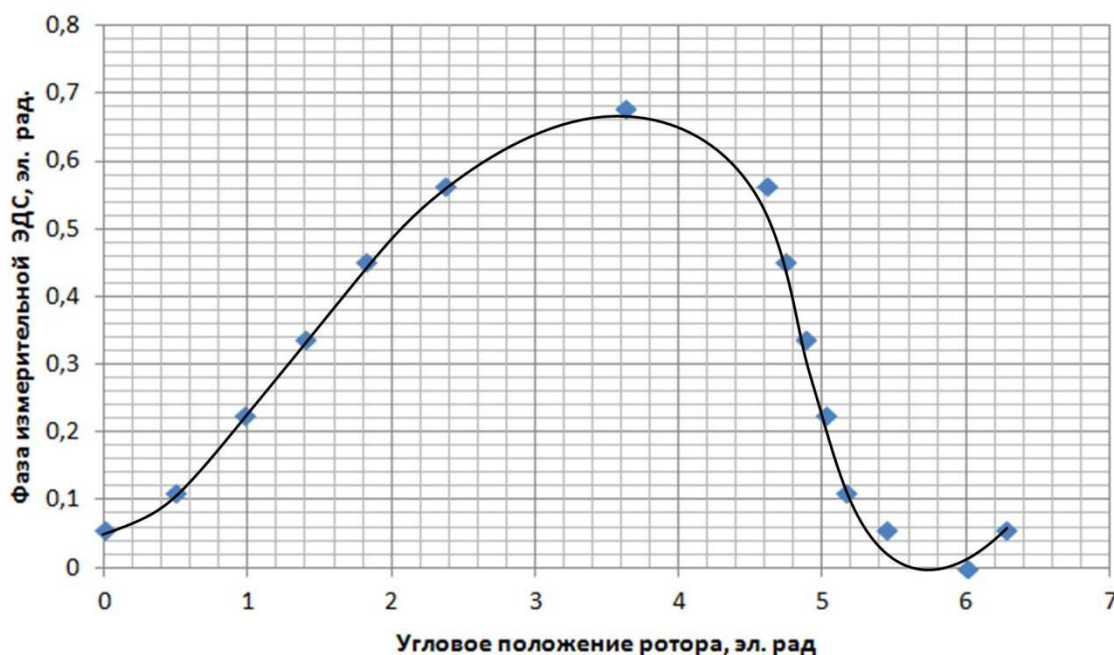
$$E = -E_{\max} [\cos(\omega t)(\lambda_{cp} + \lambda_{AM} \cos(\Theta)) - \sin(\omega t)(\lambda_{cp} + \lambda_{AM} \cos(120^\circ + \Theta))] \quad (2.24)$$

На рисунке 2.7. представлены зависимости фазы измерительной ЭДС от углового положения ротора ВИМ для машины имеющей следующие характеристики: Средняя индуктивность:  $L_{cp} = 48,25$  мГн; амплитуда изменения индуктивности в зависимости от углового положения ротора ВИМ:  $L_{AM} = 19,25$  мГн; каждая фазная обмотка состоит из 4 последовательно соединенных катушек по 100 витков. А также для данной ВИМ на макетном образце бездатчикового ВИП снята экспериментальная зависимость фазы измерительной ЭДС от углового положения ротора. Данная зависимость приведена на рисунке 2.10.



**Рис. 2.7.** Теоретическая зависимость фазы измерительной ЭДС от углового положения ротора ВИМ.

- 1 – зависимость при модулировании измерительных токов в катушках фазных обмоток А и В
- 2 – зависимость при модулировании измерительных токов в катушках фазных обмоток В и С
- 3 – зависимость при модулировании измерительных токов в катушках фазных обмоток С и А



**Рис. 2.8.** Экспериментальная зависимость фазы измерительной ЭДС от углового положения ротора.

Стоит отметить, что экспериментальная и теоретическая зависимости фазы измерительной ЭДС от углового положения ротора ВИМ, представленные на рисунках 2.7. и 2.8. имеют одинаковых диапазон изменения фазы измерительной ЭДС в зависимости от углового положения ротора, составляющий 0,68 радиан, что подтверждает верность приведенного математического описания. Но характеристики имеют различное абсолютное значение фазы, это связано с выбором различной точки отчета при расчете фазы измерительной ЭДС при ее экспериментальном измерении.

Можно увидеть, что теоретическая и экспериментальная зависимости фазы измерительной ЭДС от углового положения ротора ВИМ имеют незначительное отличие в форме, это обусловлено тем, что при расчетах теоретической зависимости принято, что магнитная проводимость под полюсами ВИМ изменяется по синусоидальному закону, в реальных ВИМ форма магнитной проводимости значительно отличается от теоретической.

Подводя итог, стоит отметить, что экспериментальные исследования показали адекватность предложенного метода идентификации углового

положения ротора ВИМ, и возможность использования ВИМ в режиме датчика углового положения.

## 2.2. Анализ вариантов коммутации обмоток ВИМ.

Главная задача ВИМ, как и любого двигателя, - это формирование электромагнитного момента. Величина электромагнитного момента ВИМ и пульсации момента будут зависеть от выбора углов рассогласования зубцов статора и ротора для включения и выключения обмоток ВИМ. Так как в нашем случае от значения фазы измерительной ЭДС.

При реализации бездатчикового управления ВИМ необходимо совместить двигательный режим работы ВИМ и режим работы датчика угловых положений. Для этого необходимо совместить создание силовых магнитных потоков, формирующих электромагнитный момент, и измерительных во времени, но разнести пространственно в разные катушки машины.

Рассмотрим математическое описание электромагнитного момента ВИМ.

В общем случае мгновенный момент ВИМ, формируемый одной фазной обмоткой, описывается уравнением:

$$M = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{d\theta} \int_0^I i \cdot L(\theta) di , \quad (2.25)$$

где  $L(\theta)$  - зависимость индуктивности фазной обмотки от углового положения ротора,  $I$  – ток в фазной обмотке.

На этапе разработки способа коммутации обмоток ВИМ можно пренебречь насыщением магнитной системе ВИМ и принять, что магнитная проводимость в воздушном зазоре под полюсами ВИМ в зависимости от углового положения ротора ВИМ изменяется по синусоидальному закону от  $\lambda_{\min}$  до  $\lambda_{\max}$  и описывается уравнением:

$$\lambda(\Theta_p) = \frac{\lambda_{\max} + \lambda_{\min}}{2} + \frac{\lambda_{\max} - \lambda_{\min}}{2} \cdot \cos(\Theta_p), \quad (2.26)$$

где  $\lambda_{\max}$  – магнитная проводимость при согласованном положении зубцов ротора и статора,  $\lambda_{\min}$  – магнитная проводимость при рассогласованном

положении зубцов ротора и статора,  $\Theta_p$  – угол рассогласования зубцов статора и ротора.

Индуктивность катушки будет изменяться по синусоидальному закону и описываться уравнением:

$$L(\Theta_p) = \frac{L_{\max} + L_{\min}}{2} + \frac{L_{\max} - L_{\min}}{2} \cdot \cos(\Theta_p), \quad (2.27)$$

где  $L_{\max}$  – индуктивность фазной обмотки при согласованном положении зубцов ротора и статора,  $L_{\min}$  – индуктивность фазной обмотки при рассогласованном положении зубцов ротора и статора.

Подставив (2.17) в (2.18) можно получить:

$$M = -\frac{L_{\max} - L_{\min}}{8} \cdot I^2 \cdot \sin(\Theta) \quad (2.28)$$

Данное уравнение справедливо только для ненасыщенной магнитной цепи ВИМ и может использоваться только для расчета расположения экстремальных точек электромагнитного момента в зависимости от углового положения. Более подробный расчет электромагнитного момента с учетом насыщения рассмотрен в главе 3.

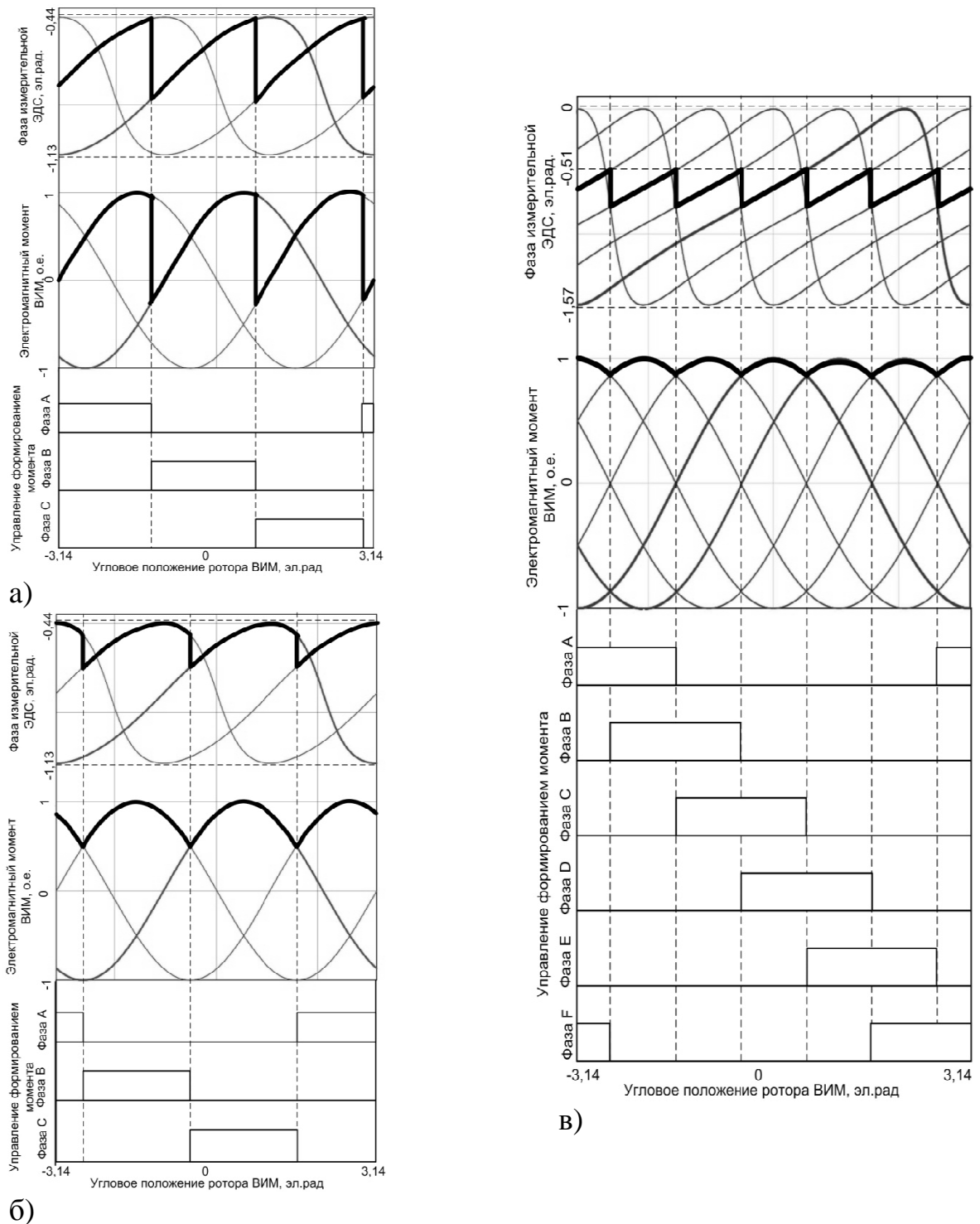
Для формирования измерительных потоков необходимо разнести в пространстве с формированием силовых потоков. Используем для формирования измерительных потоков катушки, не используемые в данный момент времени для формирования силовых потоков, т.е. расположенные в смежных фазных обмотках.

На рисунках 2.3.-2.7. представлены функциональные зависимости фазы измерительной ЭДС от углового положения ротора. Совмещая зависимости фазы измерительной ЭДС и электромагнитного момента ВИМ от углового положения ротора, можно рассмотреть различные варианты коммутации обмоток в зависимости от значения фазы измерительной ЭДС.

При помощи математического пакета Matcad рассчитаны и построены зависимости электромагнитного момента от углового положения ВИМ, формируемого каждой фазной обмоткой при постоянном токе, и зависимости



фазы измерительной ЭДС при различных вариантах коммутации фазных обмоток ВИМ. Результаты приведены на рисунке 2.9.



**Рис. 2.9.** Варианты коммутации обмоток ВИМ в зависимости от фазы измерительной ЭДС и электромагнитного момента.

На рисунке 2.9.а. представлен вариант одиночной коммутации обмоток трехфазной ВИМ в зависимости от значения фазы измерительной ЭДС.

Преимуществом данного варианта коммутации является то, что на всем цикле коммутации используем линейный участок зависимости фазы измерительной ЭДС от углового положения ротора. В результате всегда можно однозначно определить текущее угловое положение, что упрощает выполнение реверса и перевод ВИМ в тормозные режимы работы. Недостатком данного варианта коммутации обмоток ВИМ является сильные пульсации момента, и, как следствие, недоиспользование машины, что приводит к увеличению массогабаритных свойств электропривода.

На рисунке 2.9. б. представлен вариант одиночной коммутации обмоток ВИМ, при котором обеспечен максимальный момент ВИМ. В данном варианте энергетические характеристики привода находятся на максимальном уровне, что приводит к снижению массогабаритных свойств электропривода. Недостатком данного варианта коммутации является работа на экстремуме зависимости фазы измерительной ЭДС от углового положения ротора, как следствие, имеем участки, где определенному значению фазы измерительной ЭДС соответствует два значения текущего углового положения. Имеем неоднозначность определенного углового положения ротора ВИМ. Для исключения неоднозначности необходимо контролировать прохождение экстремума зависимости. В этом случае при работе ВИМ на заданных оборотах, контролируя прохождение экстремума, однозначно определяем текущее угловое положение и обеспечиваем формирование максимального момента. Однако, при реверсе ВИМ, если в момент изменения направления вращения ротора ВИМ находимся вблизи экстремума зависимости фазы измерительной ЭДС от углового положения, возможно неверное определение углового положения, в результате чего произойдет неверная коммутация обмоток. В результате при реверсе можем иметь колебание оборотов ВИМ, когда при прохождении нулевой скорости несколько раз меняет направление вращения. После прохождения нулевой скорости нарушение циклов коммутации исчезнет, электропривод начнет работать в нормальном режиме.

В случае применения рассмотренного метода бездатчиковой коммутации к ВИМ с большим количеством фазных обмоток, появляется возможность исключить недостатки, присущие использованию трехфазной ВИМ, такие как большие пульсации электромагнитного момента, присущие первому варианту коммутации, и неоднозначность углового положения, присущие второму варианту коммутации.

На рисунке 2.9.в. представлен вариант парной коммутации обмоток 6-фазной ВИМ конфигурации 12/10. В данном варианте коммутации имеем низкие пульсации электромагнитного момента и, при этом, каждому значению фазы измерительной ЭДС соответствует только одно значение углового положения ротора ВИМ. При этом, на каждом цикле коммутации зависимость фазы измерительной ЭДС от углового положения можно считать линейным, что упрощает построение бездатчиковых следящих систем.

Рассмотрим реализацию коммутаций обмоток применительно к трехфазной ВИМ со следующими параметрами: средняя индуктивность:  $L_{cp} = 48,25$  мГн; амплитуда изменения индуктивности в зависимости от углового положения ротора ВИМ:  $L_{AM} = 19,25$  мГн; каждая фазная обмотка состоит из 4 последовательно соединенных катушек по 100 витков.

Для обеспечения одновременной работы ВИМ в режиме датчика углового положения и в режиме двигателя необходимо обеспечить одновременное формирование силовых и измерительных токов в фазных обмотках ВИМ. Для чего цикл коммутации обмоток трехфазной ВИМ можно разделить на следующие интервалы:

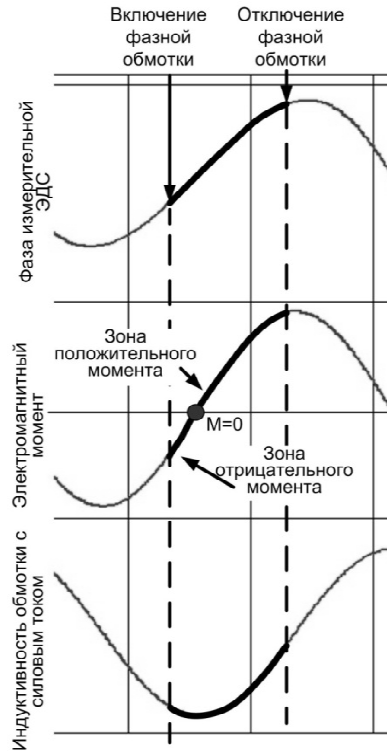
1.  $1/3$  периода коммутации всем катушкам фазной обмотки протекают силовые токи. Фаза формирует электромагнитный момент.
2.  $1/3$  периода коммутации в катушках фазной обмотки формируем синусную составляющую квадратуры измерительного тока.
3.  $1/3$  периода коммутации в катушках фазной обмотки формируем косинусную составляющую квадратуры измерительного тока, на

неиспользуемой катушке этой же фазной обмотки измеряем мгновенное значение наведенной ЭДС.

4. Далее цикл повторяется.

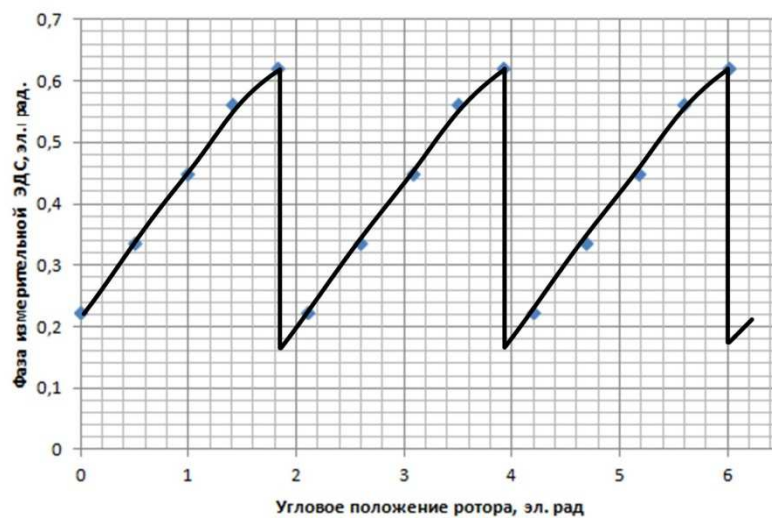
Таким образом, при работе трехфазной ВИМ в режиме датчика угловых положений и в режиме двигателя в каждый момент времени задействованы все фазные обмотки, одна фазная обмотка задействована в формировании электромагнитного момента, катушки двух других фазных обмоток используются для идентификации углового положения ротора ВИМ. В приложении приведены коммутационные диаграммы, обеспечивающие работы ВИМ в режиме двигателя и датчика угловых положений одновременно.

При использовании варианта коммутации, представленного на рисунке 2.9.а. коммутации целесообразно производить вблизи экстремума зависимости фазы измерительной ЭДС от углового положения ротора ВИМ. Для обеспечения исключения пропуска коммутации производить переключение фазных обмоток ВИМ необходимо при вхождении в 5% зону от экстремального значения. Так как экстремальное значение равно  $-0,448$  эл.рад., то коммутацию фазных обмоток необходимо проводить при значении фазы измерительной ЭДС равной  $-0,470$  эл.рад. (рисунок 2.7.) Коммутация одной фазной обмотки согласно данному варианту представлен на рисунке 2.10.



**Рис. 2.10.** Коммутация фазной обмотки ВИМ.

На рисунке 2.11 представлена зависимость фазы измерительной ЭДС от углового положения ротора, макетном образце бездатчикового ВИП, при практической реализации варианта коммутации согласно рисункам 2.9.а., и 2.10. При этом на экспериментальной характеристике имеем отличное от теоретического значения фазы измерительной ЭДС, это связано с особенностями выбора точек отчета при снятии экспериментальной зависимости (см. главу 4).



**Рис. 2.11.** Экспериментальная зависимость фазы измерительной ЭДС от углового положения ротора при выполнении коммутации обмоток ВИМ.

Для уменьшения массогабаритных свойств электропривода и улучшения энергетических показателей электропривода целесообразно использовать вариант коммутации обмоток ВИМ в зависимости от фазы измерительной ЭДС показанный на рисунке 2.8.б. В этом случае получаем минимальные пульсации электромагнитного момента.

При синусоидальном изменении магнитной проводимости под полюсами ВИМ электромагнитный момент формируемый отдельной фазной обмоткой при неизменном токе можно рассчитать по формуле:

$$M(\Theta) = K \cdot \frac{dL(\Theta)}{d\Theta} = K' \cdot \frac{d\lambda(\Theta)}{d\Theta} \quad (2.29)$$

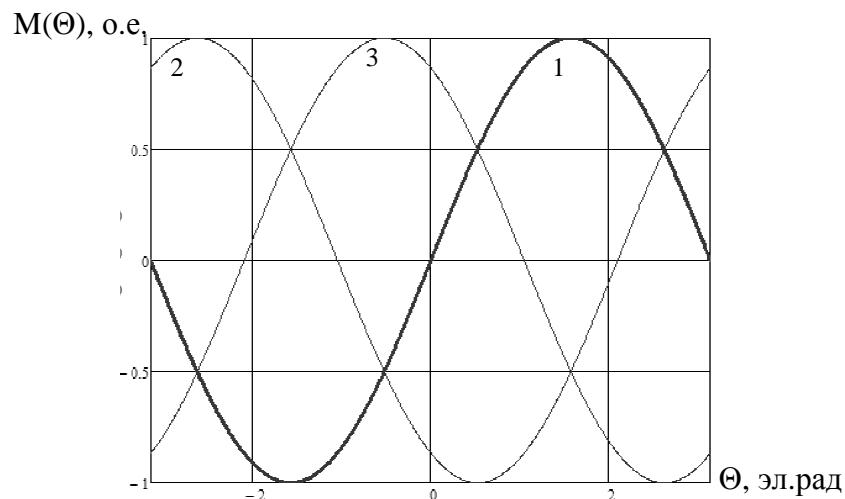
Применительно к трехфазной ВИМ формула (2.25) примет вид:

$$\text{Для фазной обмотки А: } M_A(\Theta) = -K'' \cdot \sin(\Theta) \quad (2.30)$$

$$\text{Для фазной обмотки В: } M_B(\Theta) = -K'' \cdot \sin(\Theta + 120^\circ) \quad (2.31)$$

$$\text{Для фазной обмотки С: } M_C(\Theta) = -K'' \cdot \sin(\Theta - 120^\circ) \quad (2.32)$$

Зависимости электромагнитных момент моментов, формируемых фазными обмотками в зависимости от углового положения ротора при постоянном токе, представлены на рисунке 2.12.



**Рис. 2.12.** Зависимости электромагнитного момента ВИМ от углового положения ротора при неизменном токе.

- 1 – электромагнитный момент фазной обмотки А;
- 2 – электромагнитный момент фазной обмотки В;
- 3 – электромагнитный момент фазной обмотки С;

При варианте коммутации, представленном на рисунке 2.9.б. производить коммутацию целесообразно в моменты времени, когда  $M > 0$  и при фиксированном токе  $M_A(\Theta) = M_B(\Theta)$  или  $M_B(\Theta) = M_C(\Theta)$ , или  $M_C(\Theta) = M_B(\Theta)$ . Эти условия выполняются при значении фазы измерительной ЭДС  $\varphi(\Theta) = 0,579$  эл.рад. и нахождении на убывающем участке зависимости фазы измерительной ЭДС.

Таким образом, при реализации варианта коммутации, представленном на рисунке 2.9.б, необходимо контролировать прохождение максимального значения фазы измерительной ЭДС и, затем, выполнить коммутацию при достижении значения фазы измерительной ЭДС значения равного  $-0,579$  эл.рад. (рисунок 2.7.). Коммутация одной фазной обмотки по данному варианту представлена на рисунке 2.13.

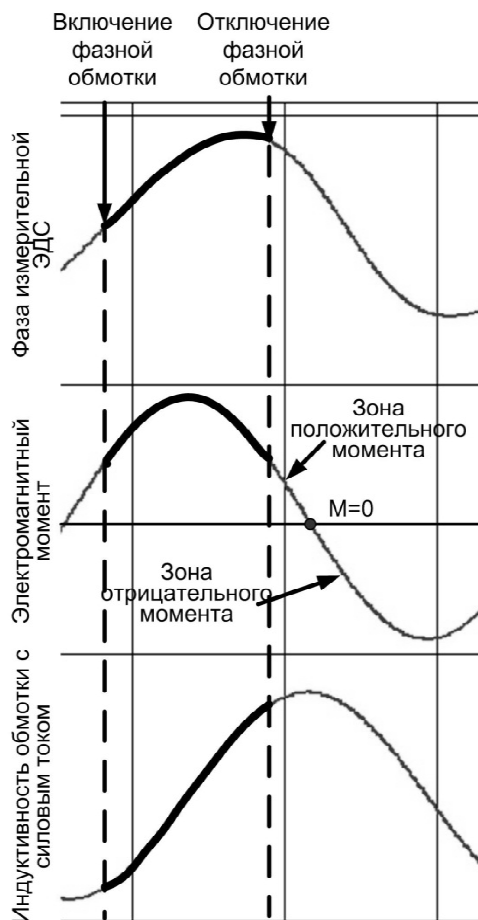
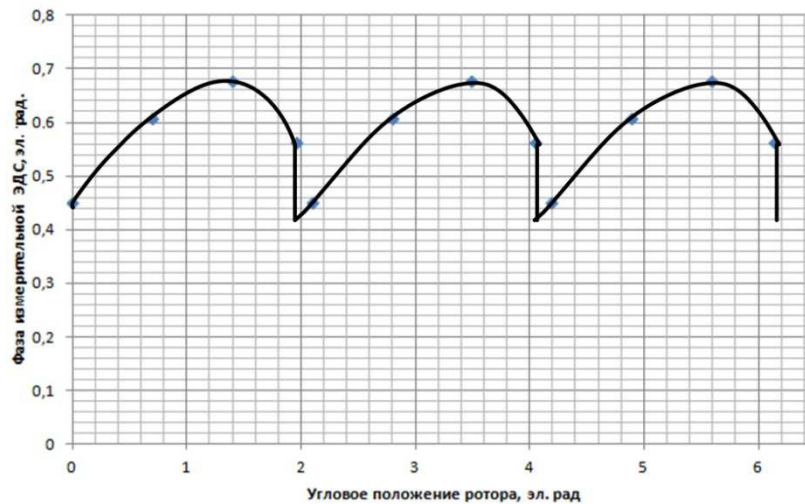


Рис 2.13. Коммутация фазной обмотки ВИМ.



**Рис. 2.14.** Экспериментальная зависимость фазы измерительной ЭДС от углового положения ротора при выполнении коммутации обмоток ВИМ.

На рисунке 2.14 представлена зависимость фазы измерительной ЭДС от углового положения ротора, полученная на макетном образце бездатчикового ВИП, при практической реализации варианта коммутации согласно рисункам 2.9.б., и 2.13. При этом на экспериментальной характеристике имеем отличное от теоретического значения фазы измерительной ЭДС, это связано с особенностями выбора точек отчета при снятии экспериментальной зависимости (см. главу 4).

Снятые экспериментальные зависимости фазы измерительной ЭДС от углового положения ротора при выполнении коммутации обмоток ВИМ (рисунок 2.11., 2.14.) показали возможность практической реализации рассмотренных вариантов коммутации.

### **Выводы по главе 2:**

Во второй главе:

1. Разработан метод бездатчиковой идентификации углового положения ротора ВИМ, в основе которого лежит формирование в магнитной системе ВИМ дополнительных измерительных квадратурных потоков и измерение фазы ЭДС наведенной измерительными потоками, что позволяет использовать ВИМ в режиме датчика углового положения.



2. Рассмотрены зависимости фазы измерительной ЭДС от углового положения ротора ВИМ от углового положения ротора.

3. Проанализированы варианты коммутации обмоток ВИМ в зависимости от значения фазы измерительной ЭДС, представлены зависимости электромагнитного момента от углового положения ротора при различных вариантах коммутации.

4. Приведены экспериментальные зависимости фазы измерительной ЭДС от углового положения ротора

### ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ БЕЗДАТЧИКОВОГО УПРАВЛЕНИЯ ВЕНТИЛЬНО-ИНДУКТОРНОЙ МАШИНОЙ.

Предложенный выше способ идентификации углового положения ротора ВИМ требует дополнения классической функциональной и принципиальной схемы ВИП дополнительными элементами, позволяющими реализовать работу ВИМ в режиме датчика угловых положений и двигателя одновременно.

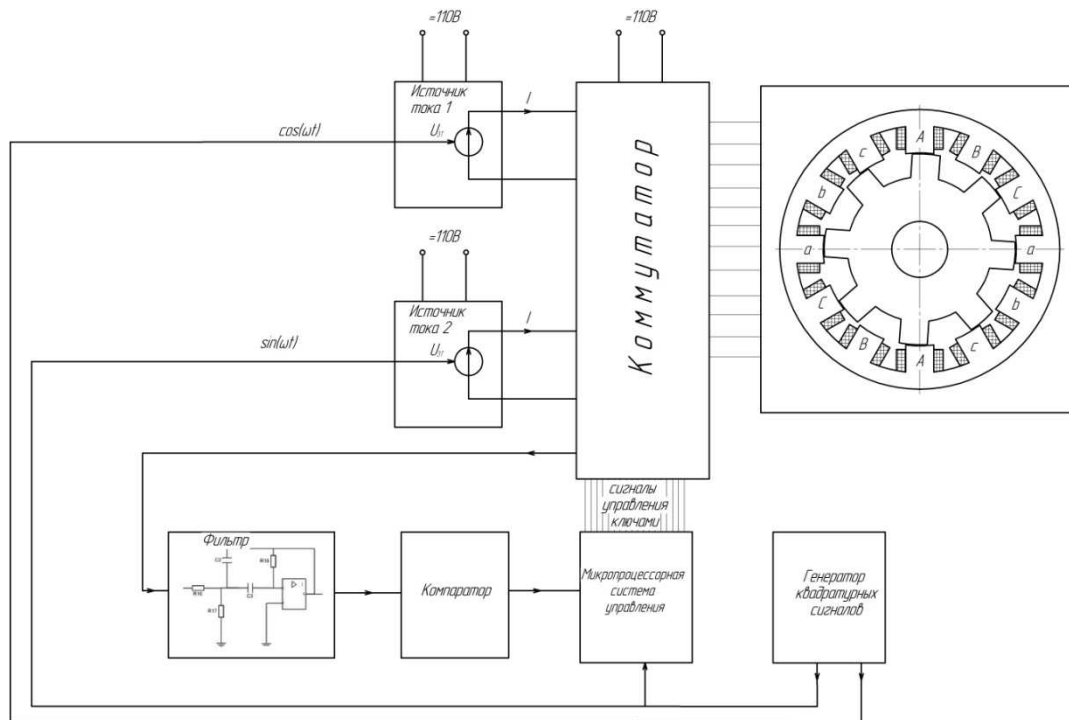
В главе 3 произведена разработка системы бездатчикового управления ВИМ для последующего внедрения в макетный образец бездатчикового ВИП. Произведено распределение программно-аппаратных средств контроллера управления и разработаны и описаны алгоритмы управления. Разработана аппаратная часть системы управления, представлены принципиальные схемы аппаратной части, рассчитаны компоненты для ее реализации.

#### **3.1. Обоснование способов и алгоритмов бездатчикового управления ВИМ.**

Электропривод с бездатчиковым управлением ВИМ должен обеспечить работу ВИМ в двигательном режиме и режиме датчика углового положения одновременно. В связи с чем, функциональная схема должна содержать блоки обеспечивающие работу ВИМ в данных режимах.

На рисунке 3.1. приведена функциональная схема электропривода с бездатчиковым управлением ВИМ.

Для бездатчиковой идентификации углового положения ротора ВИМ согласно описанной выше технологии необходимо в катушках ВИМ формировать связанные квадратурно измерительные токи. Эту функцию выполняют два источника тока, которые получают сигналы синхронизации частотой 10 кГц от генератора квадратурных сигналов. Источники токов через ключи коммутатора подключаются к катушкам ВИМ, в которых необходимо формировать измерительные токи.



**Рис. 3.1.** Функциональная схема бездатчикового ВИП.

Для управления формированием в катушках ВИМ силовых и измерительных токов используется полупроводниковый транзисторный коммутатор. Коммутатор, получая сигналы управления от микропроцессорной системы, осуществляет подключение катушек ВИМ к питающей сети и источникам измерительных токов, а также подключение датчика напряжения к катушкам ВИМ для фиксации измерительной ЭДС.

Сигнал от датчика напряжения проходит через полосовой фильтр, который выделяет первую гармонику измерительной ЭДС (10 кГц) и подает сигнал на компаратор, преобразующий синусоидальный сигнал в последовательность импульсов, при этом передний и задний фронт импульса формируются в момент изменения знака синусоиды измерительной ЭДС. Последовательность импульсов поступает в микропроцессорную систему управления. Для анализа фазы измерительной ЭДС микропроцессорная система управления отчитывает фазовый сдвиг импульса, идущего от компаратора, относительно сигнала синхронизации, идущего от генератора квадратурных сигналов. Фазовый сдвиг импульса пропорционален фазе измерительной ЭДС.

Бездатчиковое управление ВИМ осуществляет микропроцессорная система управления, которая анализирует изменения фазы измерительной ЭДС и определяет необходимые моменты коммутации обмоток ВИМ, производит регулирование силового тока в фазных обмотках ВИМ, рассчитывает текущую скорость вращения ротора и, согласно требуемому закону регулирования, который зависит от типа механизма, где используется ВИП, производит стабилизацию скорости вращения ротора.

Для реализации бездатчикового управления ВИМ реализована микропроцессорная система управления. Функциональная схема которой приведена на рисунке 3.2. Задачи управления ВИМ и идентификации углового положения ротора решаются программно-аппаратными средствами системы управления.



**Рис. 3.2.** Функциональная схема взаимодействия аппаратных частей микропроцессорной системы управления бездатчикового ВИП.

Система управления состоит из следующих функциональных блоков: вентильно-индукторной машины, коммутатора, 3-х блоков драйверов, источника квадратурных токов, генератора квадратурно связанных сигналов, датчика напряжения и компаратора, контроллера управления.

В качестве объекта управления выбрана трехфазная ВИМ, имеющая 12 зубцов на статоре и 8 на роторе.

Для управления формированием силовых и измерительных токов в катушках ВИМ разработан транзисторный коммутатор, построенных на полевых транзисторах. Коммутатор запитан от блока питания напряжением 110 В и источника квадратурных токов.

Сигналы управления коммутатор получает от 3-х блоков драйверов, которые выполняют функцию гальванической развязки коммутатора и контроллера управления и функцию формирования напряжения для управления затворами полевых транзисторов коммутатора. Один блок драйверов используется для формирования сигналов управления ключами, коммутирующими силовые токи катушках ВИМ, два других блока драйверов – для управление ключами, коммутирующими измерительные токи. С целью исключения возникновения сквозных токов, драйвера запитаны от гальванически развязанных блоков питания.

Для анализа фазы измерительной ЭДС используется 3 датчика напряжения, которые подключены к катушкам, находящимся в разных фазных обмотках. Для анализа фазы измерительной ЭДС в каждый момент времени используется только один датчик напряжения. Для выбора необходимого датчика напряжения на биполярных транзисторах реализован мультиплексор, который подключает только один из датчиков напряжения к микропроцессорной системе управления.

Источник квадратурных токов формирует измерительные токи, связанные квадратурными соотношениями, необходимые для бездатчиковой идентификации углового положения ротора ВИМ. Источник квадратурных токов состоит из двух линейных источников тока, выполненных на транзисторах и операционном усилителе, и генератора квадратурных сигналов, выполненном на базе микроконтроллера PIC12F629.

Контроллер управления, построен на базе микроконтроллера PIC18F4321 и выполняет бездатчиковую идентификацию углового положения и, управляя ключами коммутатора, производит управление ВИМ. Алгоритмы управления ВИМ и идентификации углового положения реализованы программно

аппаратными средствами микроконтроллера, и при необходимости могут быть модернизированы за счет обновления программного обеспечения контроллера.

Стоит отметить, что программно-аппаратные средства микроконтроллера отвечают за идентификацию углового положения ротора ВИМ, формирование сигналов управления ключами коммутатора, регулирования координат электропривода (скорости, момента и тд.).

Рассмотрим структуру контроллера управления бездатчиковым ВИП.



**Рис. 3.3.** Функциональная схема взаимодействия программно аппаратных средств контроллера управления.

Функциональная схема взаимодействия программно-аппаратных средств контроллера управления приведена на рисунке 3.3. Рассмотрим варианты реализации функциональных блоков данной структуры и их связи.

Рассмотрим работу блока расчета фазы измерительной ЭДС.

В связи с тем, что измерительная ЭДС при помощи компаратора напряжения преобразуется в последовательность импульсов, фронты которых связаны с изменением знака мгновенного значения измерительной ЭДС, поэтому для анализа фазы измерительной ЭДС достаточно измерить время между следованием фронтов сигнала синхронизации и сигнала от компаратора напряжения. Время между следованиями фронтов будет пропорционально фазе измерительной ЭДС.

При практической реализации данного блока необходимо реализовать непрерывную работу таймера, при прохождении фронта сигнала от компаратора напряжения и фронта синхронизирующего сигнала считывать значение таймера и рассчитывать разность считанных значений. В случае программной реализации данного блока все ресурсы микроконтроллера будут задействованы на расчет времени прохождения импульсов, что приведет к невозможности реализации всех алгоритмов управления на одном микроконтроллере. В случае использования аппаратно реализованного таймера и программного считывания значений таймера по фронтам сигналов, вызывающих системные прерывания, высвобождается значительная часть вычислительной мощности микроконтроллера, но возможно неверное считывание значения таймера в случае возникновения прерываний одного приоритета. Наиболее предпочтительным вариантом является организация отчета времени на аппаратно реализованном таймере и аппаратном считывании состояния таймера, в этом случае вычислительные ресурсы микроконтроллера не задействованы в измерении фазы измерительной ЭДС. В настоящее время многие микроконтроллеры позволяют это реализовать при помощи интегрированных аппаратных средств, например, в 8-ми битных микроконтроллера фирмы microchip серии PIC18, это аппаратно реализованный модуль CCP, работающий в режиме захвата.

В зависимости от поставленной задачи и области применения ВИМ модуль вычисления текущего углового положения ротора ВИМ может быть выполнен в виде программно реализованного функционального преобразователя, на входе которого имеем текущее значение фазы измерительной ЭДС, на выходе – текущее угловое положение ротора, либо информация о текущем угловом положении. В случае если перед нами стоит задача реализовать бездатчиковое управление коммутацией обмоток ВИМ и нет необходимости передавать информацию о текущем угловом положении в систему управления высокого уровня, необходимость преобразовывать фазу измерительной ЭДС в угловое положение ротора ВИМ отпадает. В этом случае, достаточно, по изменению

фазы информационной ЭДС определить момент времени, когда необходимо произвести коммутацию фазных обмоток ВИМ и передать информацию о необходимости коммутации в блок включение/отключение фазных обмоток ВИМ. В этом случае блок включения/отключения фазных обмоток ВИМ и блок вычисления текущего углового положения ВИМ целесообразно объединить.

Модуль расчета скорости ВИМ можно реализовать двумя способами. Один способ – дифференцировать текущее угловое положение ротора ВИМ. Этот способ дает наиболее точное значение скорости при достаточно быстром ее изменении, но требует обязательного построения функционального преобразователя фазы информационной ЭДС в угловое положение ротора ВИМ, что не позволит отказаться от функционального преобразования фазы измерительной ЭДС в угловое положение ротора ВИМ.

Альтернативным вариантом реализации блока расчета скорости заключается в измерении времени между коммутациями фазных обмоток ВИМ. В этом случае скорость вращения ротора ВИМ будет обратно пропорционально времени между коммутациями фазных обмоток. Данный вариант расчета скорости является наиболее предпочтительным, так как при его реализации упрощается структура программного обеспечения и высвобождается вычислительная мощность микроконтроллера.

Модуль регулятора скорости реализуются программно как пропорциональный регулятор или пропорционально-интегральный регулятор в зависимости от требований, предъявляемых к электроприводу. Данные алгоритмы достаточно известны, поэтому подробно их описывать не будем. Вызов модуля происходит по прерыванию высокого приоритета от интегрированного в микроконтроллер аппаратного таймера, генерирующего системные прерывания с фиксированной частотой. По прерыванию от данного таймера происходит вызов программы измерения силового тока в обмотках ВИМ.

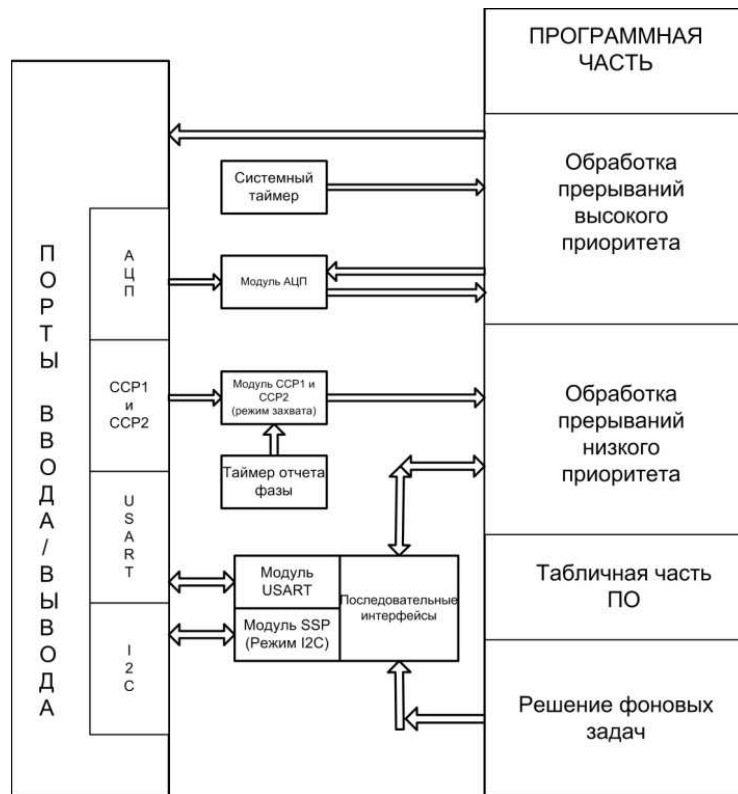
Измерение силового тока в обмотках ВИМ реализовано на базе АЦП. Предпочтительно использовать интегрированное в микроконтроллер АЦП, так



как в этом случае уменьшится количество электронных компонентов, уменьшится количество связей между элементами, что приведет к увеличению надежности системы управления. Измерение тока следует проводить в прерывании, вызываемом системным таймером, из модуля регулятора тока.

Модуль формирования ШИМ работает как релейный регулятор, сравнивает значение текущего силового тока с заданным: если силовой ток выше заданного, то формируются сигналы отключения необходимых ключей коммутатора, если силовой ток ниже заданного, то формируются сигналы включения ключей. Вызов модуля формирования ШИМ происходит при завершении измерения силового тока в обмотках ВИМ.

Модуль включения фазных обмоток по текущему угловому положению реализует включения необходимых ключей коммутатора для обеспечения формирования в магнитной системе ВИМ силовых и измерительных потоков. Применительно к трехфазной ВИМ в данном модуле реализовано 6 комбинаций включения силовых и измерительных ключей: 3 комбинации для обеспечения вращения ротора ВИМ в положительном направлении, 3 комбинации для обеспечения вращения ротора ВИМ в отрицательном направлении. В приложениях представлены коммутационные диаграммы включения ключей.



**Рис. 3.4.** Функциональная схема распределения программно аппаратных средств микроконтроллера.

На рисунке 3.4. приведена функциональная схема распределения программно-аппаратных средств микроконтроллера. Данная схема составлена с учетом структуры ядра микроконтроллера PIC18F4321.

Работает программно аппаратная часть микроконтроллера по следующему алгоритму. На таймере 2 реализовано системное прерывание высокого приоритета. Отличительной особенностью данного таймера является возможность осуществить прерывание и аппаратный сброс таймера не при его переполнении, а при достижении таймером определенного значения, которое хранится в регистре PR2. Это позволяет осуществить генерацию прерываний с фиксированным интервалом времени и исключить необходимость при каждом прерывании выполнять перезагрузку таймера. Период, с которым таймер генерирует прерывания, можно рассчитать по формуле:

$$T_{sys} = \frac{k_{пред.T2} \cdot k_{ном.T2} \cdot PR2}{F_{osc}/4} \quad (3.1)$$

где  $k_{пред.Т2}$  - предделитель таймера 2,  $k_{ном.Т2}$  - постделитель таймера 2, PR2 – загруженное в регистр PR2 однобайтное число,  $F_{osc}$  – тактовая частота микроконтроллера.

При тактовой частоте микроконтроллера 32 МГц,  $k_{пред.Т2} = 2$ ,  $k_{ном.Т2} = 1$ , PR2 =200 можно получить:

$$T_{sys} = \frac{k_{пред.Т2} \cdot k_{ном.Т2} \cdot PR2}{F_{osc}/4} = \frac{2 \cdot 1 \cdot 200}{32 \cdot 10^6 / 4} = 50 \cdot 10^{-6} \text{ с} \quad (3.2)$$

что соответствует частоте 20 кГц

По прерыванию от таймера 2, на высоком приоритете происходит вызов программного модуля регулятора скорости вращения ротора, выполняется расчет выходного сигнала регулятора.

По прерыванию от АЦП выполняется сравнение текущего силового тока с заданным. Если текущий ток превышает заданный, то выполняется отключение фазной обмотки ВИМ от питающей сети и замыкание выводов обмотки. Начинается процесс плавного снижения уровня тока. Если уровень силового тока ниже заданного, то выполняется подключение фазной обмотки ВИМ к питающей сети. Начинается процесс формирования силового тока в фазной обмотке ВИМ.

По прерыванию от модуля ССР1 выполняется сохранение результата захвата значения таймера отчета фазы. По прерыванию от модуля ССР2 происходит сохранения результата захвата значения таймера отчета фазы, расчет разности сохраненных значений результатов захвата произошедших при текущем прерывании и при прерывании от модуля ССР1. Рассчитанная разность пропорциональна фазе измерительной ЭДС. По таблице преобразования фаза-угол, расположенной в табличной части программного обеспечения, происходит расчет текущего углового положения ротора ВИМ. В случае, если информация об текущем угловом положении, используется только для определения моментов коммутации фаз, то преобразовывать текущее значение фазы в угловое

положение отпадает. Моменты коммутации можно определять по текущему значению фазы измерительной ЭДС. В этом случае отпадает необходимость строить таблицу преобразования фазы измерительной ЭДС в текущее угловое положение.

По прерыванию от последовательных интерфейсов происходит сохранение в программный буфер приемника принятых данных и загрузка из программного буфера передатчика данных для последующей передачи. В фоновой задаче происходит работа с пользовательским интерфейсом и обработка запросов от ПК.

Рассмотренная микропроцессорная система управления позволяет реализовать бездатчиковое управление ВИП с использованием структур с различными типами обратных связей (по скорости, току, положению), а также, при необходимости, за счет обновления ПО, быстро модернизировать структуру ВИП, корректировать обратные связи, изменять настройки регуляторов.

Один из вариантов реализации генератора квадратурных сигналов – это реализация на базе микроконтроллера. Так как при решении данной задачи генерацию квадратурных сигналов можно реализовать программным способом, то при практической реализации можно использовать самые простые и дешевые контроллеры. Реализация источника квадратурных сигналов программным способом позволяет на этапе отладки, за счет обновления программного обеспечения, оперативно изменять частоту сигналов и другие параметры. При генерации квадратурных сигналов на частоте 10 кГц период следования импульсов требуется разделить на 4 интервала, как показано на рисунке 3.5. На каждом интервале необходимо генерировать программное прерывание, на котором потребуется изменять состояние одного из сигналов, образующих квадратуру. Таким образом, при частоте квадратурных сигналов 10 кГц, генерировать прерывания требуется с частотой 40 кГц.

В макетном образце бездатчикового ВИП для генерации квадратур использован 8-ми битный микроконтроллер PIC12F629 в корпусе PDIP-8. Данный контроллер имеет встроенный тактовый генератор частотой 4 МГц.

Один машинный цикл выполняется за 4 такта генератора. Таким образом генерировать прерывания потребуется через каждые 25 машинных циклов. Так как данный микроконтроллер выполняет только формирование квадратурных сигналов, то для универсальности и мобильности программного обеспечения реализуем программный счетчик, который будет генерировать программное прерывание каждые 25 машинных циклов. При возникновении каждого программного прерывания будем изменять состояние одного из квадратурных сигналов согласно диаграмме, приведенной на рисунке 3.5.

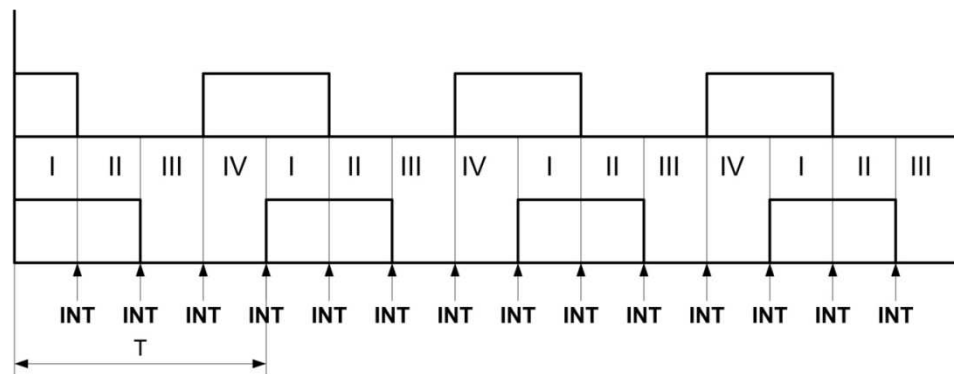


Рис. 3.5. Диаграммы формирования квадратурных сигналов.

Блок схемы всех алгоритмов и программное обеспечение приведены в приложениях.

### 3.2. Разработка имитационной компьютерной модели ВИМ, коммутатора и системы управления

С целью выявления не точности в методе идентификации углового положения ротора ВИМ и предварительной апробации способов и алгоритмов бездатчикового управления ВИМ разработана компьютерная модель системы управления ВИМ.

Разрабатываемая модель ВИМ по параметрам соответствует трехфазной ВИМ марки ВИД80-3,0, имеющей 8 зубцов на роторе и 12 на статоре. В таблице 3.1 приведены параметры машины. Для данного типа ВИМ разработаем систему бездатчикового управления.

Таблица 3.1. - Параметры вентильно-индукторной машины ВИД80-3,0 УХЛ 4.

Мощность, кВт	3,0
Максимальный момент, Нм	9
Максимальное фазное напряжение, В	400
Максимальный фазный ток, А	7,5
Число фаз	3
Конфигурация магнитной системы	12/8
Минимальная индуктивность фазы, мГн	29,5
Максимальна индуктивность фазы, мГн	68
Сопротивление фазы, Ом	10

На рисунке 3.6. представлены зависимости индуктивности фазных обмоток ВИМ от углового положения ротора. На рисунке 3.7 приведена конфигурация магнитной системы ВИМ.

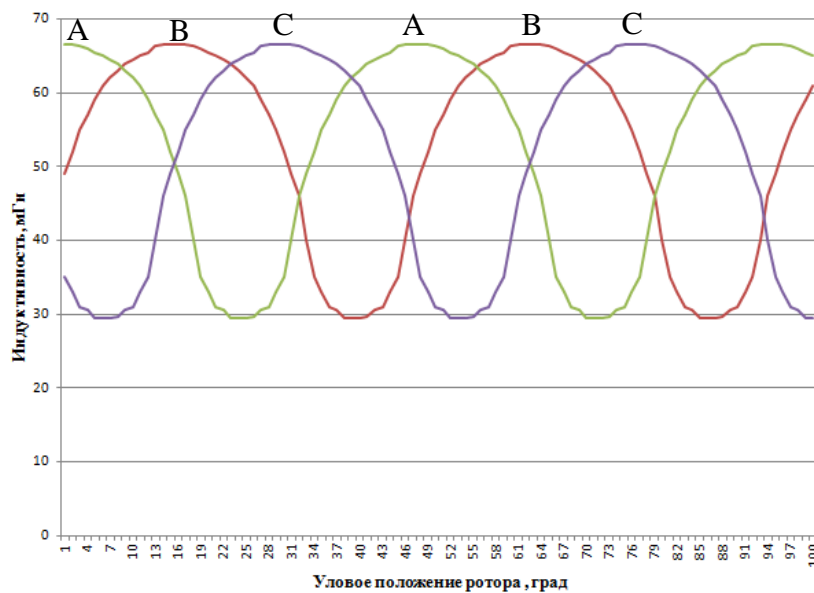
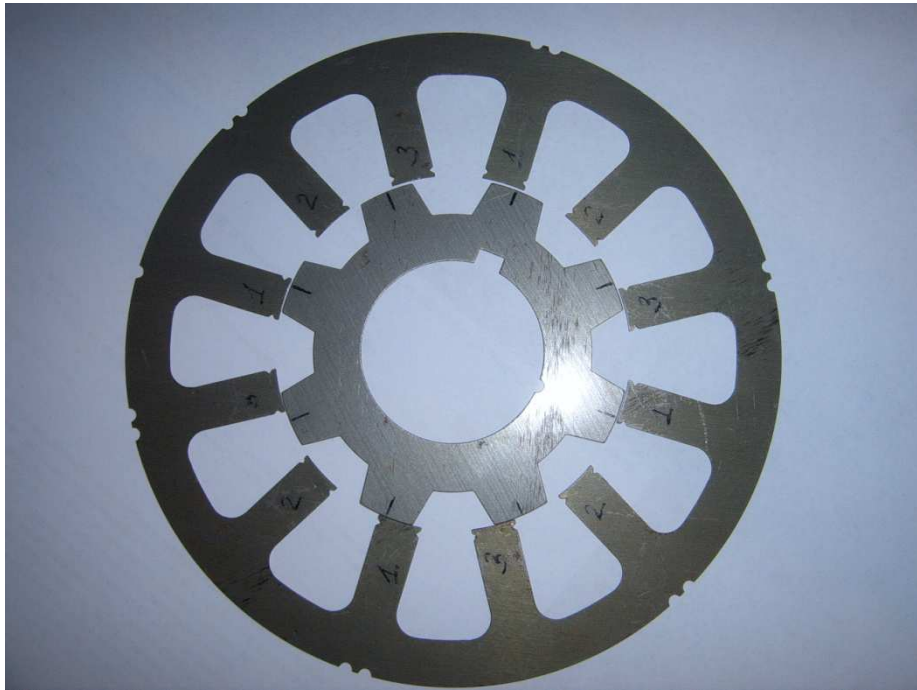


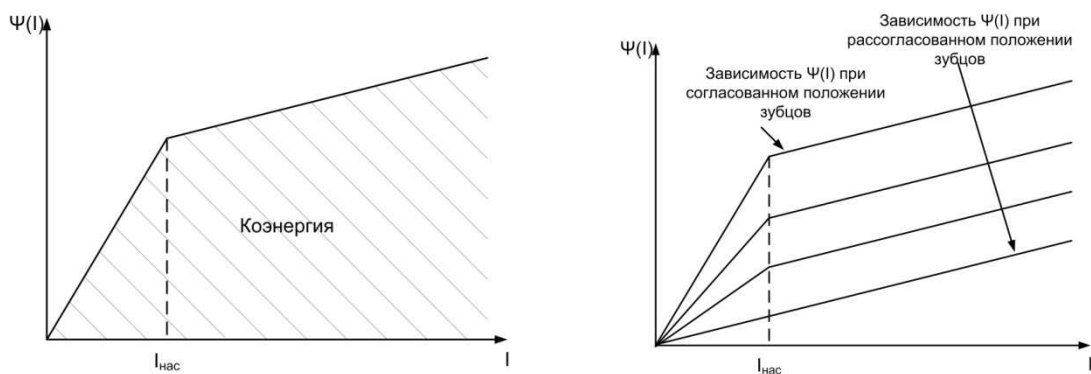
Рис. 3.6. Зависимости индуктивности фазных обмоток от углового положения ротора.



**Рис. 3.7.** Магнитная система ВИМ.

При разработке модели ВИМ сделаем следующие допущения:

1. Магнитная проводимость в воздушном зазоре под полюсами статора изменяется по синусоидальному закону;
2. Насыщение магнитной цепи обусловлено насыщением зубцовой зоны статора;
3. Магнитная проводимость стали равна бесконечности;
4. Зависимость потокосцепления от тока в фазной обмотке носит нелинейный характер и имеет вид, представленный на рисунке 3.8.



**Рис. 3.8.** Зависимости потокосцепления фазы тока.

Так как принято, что магнитная проводимость в зависимости от углового положения ротора изменяется по синусоидальному закону, то индуктивность фазной обмотки ВИМ на ненасыщенном участке кривой намагничивания имеет вид:

$$L(\Theta) = L_{cp} + L_A \cdot \cos(\Theta), \quad (3.3)$$

где  $L_{cp}$  – среднее значение индуктивности фазной обмотки,  $L_A$  – амплитуда изменения индуктивности.

Если принять, что потокосцепление фазы ВИМ в зависимости от тока в фазной обмотке изменяется согласно рисунку 3.2, то при ненасыщенной зубцовой зоне статора (при  $I < I_{нас}$ ), зависимость потокосцепления от тока определяется выражением:

$$\Psi(I, \Theta) = I \cdot L(\Theta), \quad (3.4)$$

где  $L(\Theta)$  - индуктивность фазной обмотки статора в зависимости от углового положения;

При насыщении зубцовой зоны статора (при  $I > I_{нас}$ ), зависимость потокосцепления от тока определяется выражением:

$$\Psi(I, \Theta) = L_{нас} \cdot I + I_{нас} \cdot L(\Theta) - I_{нас} \cdot L_{нас}, \quad (3.5)$$

где  $L_{нас}$  – индуктивность фазной обмотки при насыщении зубцовой зоны статора,  $I_{нас}$  – ток насыщения

Суммарная ЭДС фазной обмотки ВИМ, включающая ЭДС самоиндукции и ЭДС вращения, рассчитывается по формуле:

$$E = \frac{d\Psi(I, \Theta)}{dt} \quad (3.6)$$

Мгновенный электромагнитный момент, формируемый фазной обмоткой ВИМ, численно равен производной коэнергии по угловому положению ротора. Коэнергия численно равна площади под графиком зависимости потокосцепления фазы от тока. С учетом выше сказанного мгновенный электромагнитный момент рассчитывается по формуле:

$$M(I, \Theta) = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{d\Theta} \int_0^I i \cdot L(\Theta) di \quad (3.7)$$



При  $I < I_{нас}$  формула (3.5) приобретает вид:

$$M(I, \Theta) = \frac{1}{2} I^2 \cdot \frac{dL(\Theta)}{d\Theta} \quad (3.8)$$

При  $I > I_{нас}$  формула (3.5) приобретает вид:

$$M(I, \Theta) = \frac{1}{2} \cdot I_{нас}^2 \cdot \frac{dL(\Theta)}{d\Theta} + I_{нас} \cdot (I - I_{нас}) \cdot \frac{dL(\Theta)}{d\Theta} + \frac{1}{2} (I - I_{нас})^2 \cdot \frac{dL(\Theta)}{d\Theta} \quad (3.9)$$

Магнитная проводимость под полюсами ВИМ связана с индуктивностью фазной обмотки соотношением:

$$\lambda(\Theta) = \frac{L(\Theta)}{w^2} = \lambda_{cp} + \lambda_A \cos(\Theta), \quad (3.10)$$

где  $w$  – число витков в фазной обмотке.

Так как фазная обмотка состоит из  $n$  катушек, в нашем случае  $n=4$ , соединенных последовательно, то можно принять, что индуктивность отдельной катушки рассчитывается по формуле:

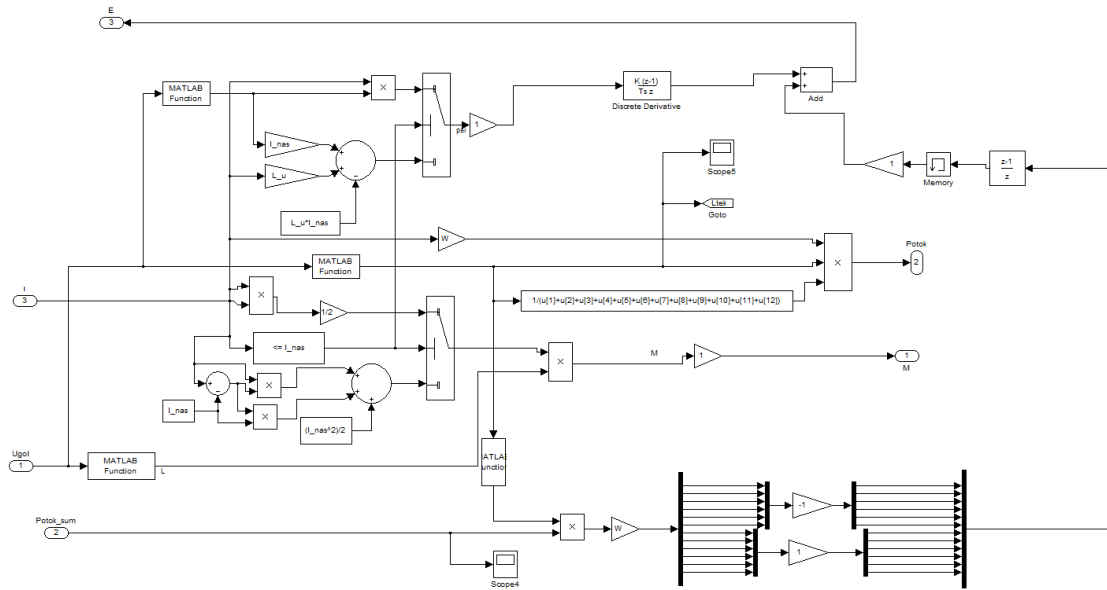
$$L_{кат}(\Theta) = \frac{L(\Theta)}{n}, \quad (3.11)$$

Магнитный поток, создаваемый отдельной катушкой, согласно схеме замещения магнитной цепи, приведенной на рисунке 2.х, рассчитывается по формуле:

$$\Phi(i, \Theta) = w \cdot i \cdot \frac{\lambda(\Theta)}{\lambda_{\Sigma}(\Theta)}, \quad (3.12)$$

где  $i$  – мгновенное значение тока в катушке ВИМ,  $\lambda_{\Sigma}(\Theta)$  – сумма проводимостей под всеми полюсами статора ВИМ.

Согласно выше описанным формулам составлена математическая модель катушки фазной обмотки ВИМ. Схема составленной модели приведена на рисунке 3.9.



**Рис. 3.9.** Схема модели катушки фазной обмотки ВИМ.

Суммарный момент ВИМ, рассчитывается как сумма моментов, формируемых каждой катушкой фазной обмотки машины.

Скорость вращения ротора ВИМ можно рассчитать по формуле:

$$\omega(t) = \frac{1}{J_{\Sigma}} \int_0^t (M_{\Sigma}(\tau) - M_c(\tau)) d\tau, \quad (3.13)$$

где  $M_{\Sigma}$  – суммарный момент ВИМ, формируемый всеми фазными обмотками.

Текущее угловое положение ротора рассчитывается по формуле:

$$\Theta = \int_0^t \omega(\tau) d\tau \quad (3.14)$$

Согласно приведенным формулам составлена схема модели ВИМ. Составленная схема приведена на рисунке 3.10. Данная модель производит расчет следующих параметров: текущего суммарного электромагнитного момента ВИМ, текущей скорости вращения ротора, текущего углового положения ротора, мгновенного значения ЭДС и токов в катушках ВИМ.

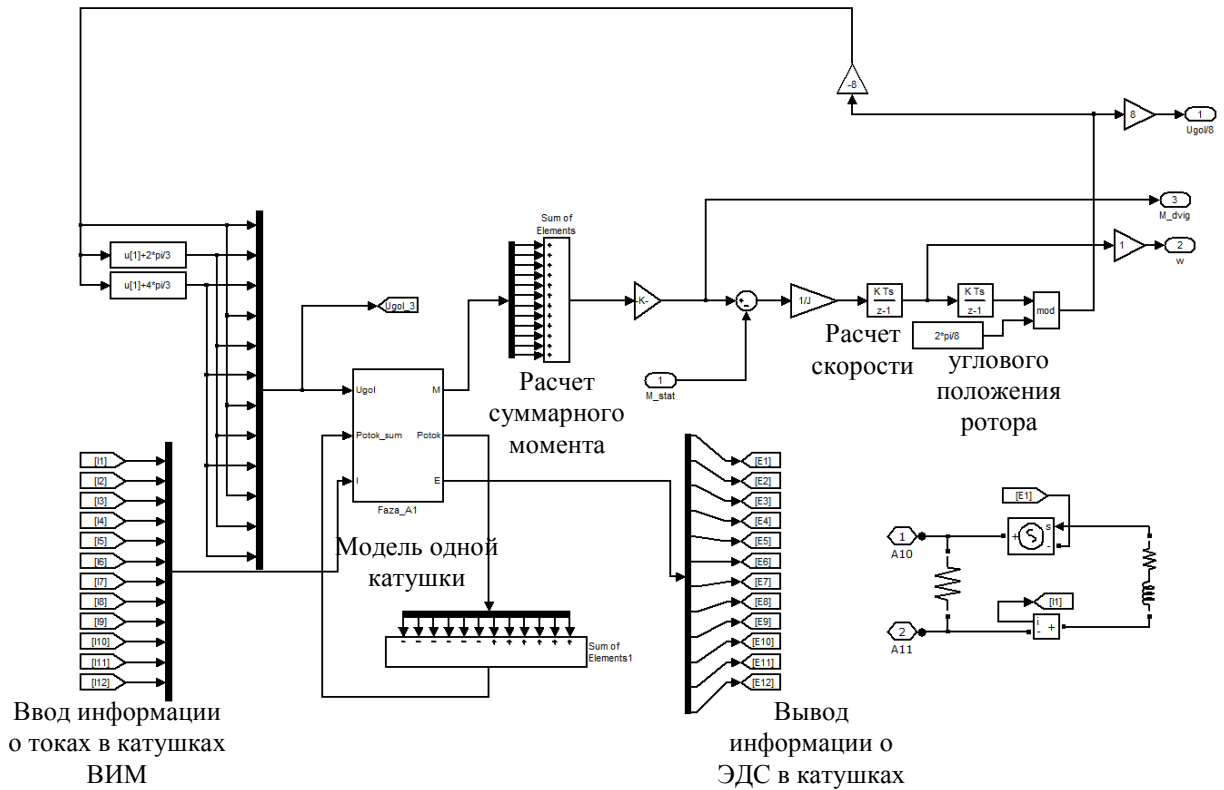


Рис. 3.10. Схема модели ВИМ.

Для обеспечения бездатчиковой идентификации углового положения ротора ВИМ, согласно описанной во 2 главе технологии, необходимо в катушках ВИМ формировать силовые и измерительные токи. Для чего катушки ВИМ необходимо подключать либо к источнику питания, либо источнику синусной или косинусной квадратуры измерительного тока. С этой целью разработана модель коммутатора, которая обеспечивает формирование силового тока во всех 4-х катушка фазной обмотки ВИМ, и формирование измерительных токов в двух катушках фазной обмотки. При формировании измерительных токов катушки включены встречно, что обеспечивает замыкание измерительных магнитных потоков через все зубцы статора и ротора. Это позволяет измерять ЭДС, наводимую измерительными потоками в отключенных катушках ВИМ. Схема одного плеча коммутатора приведена на рисунке 3.11. Схема модели коммутатора представлена на рисунке 3.12.

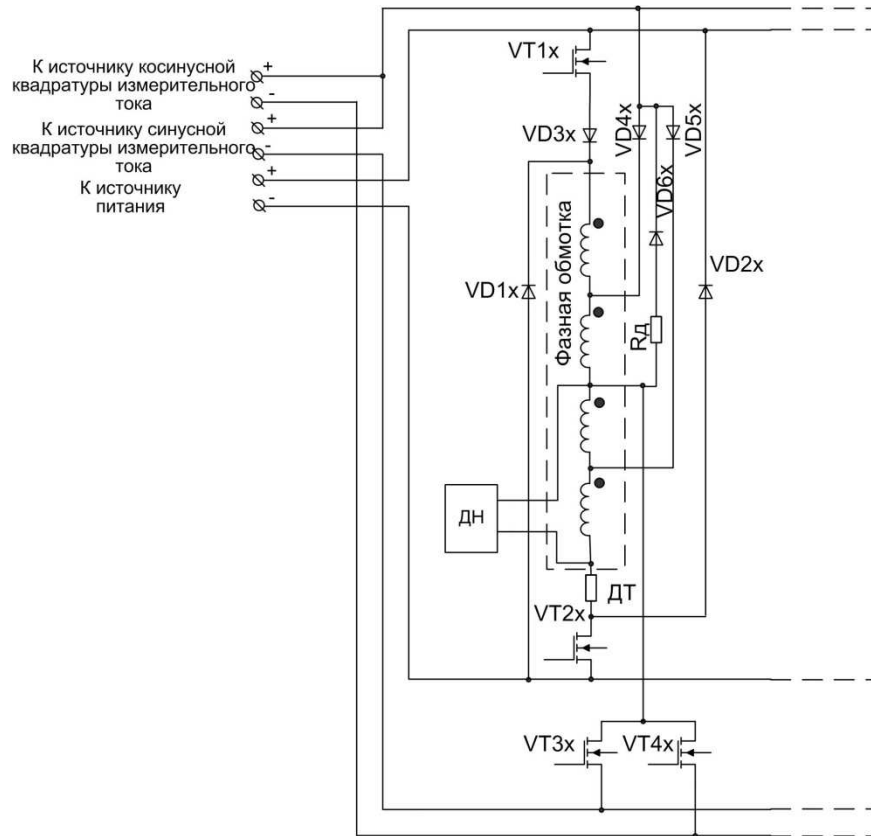
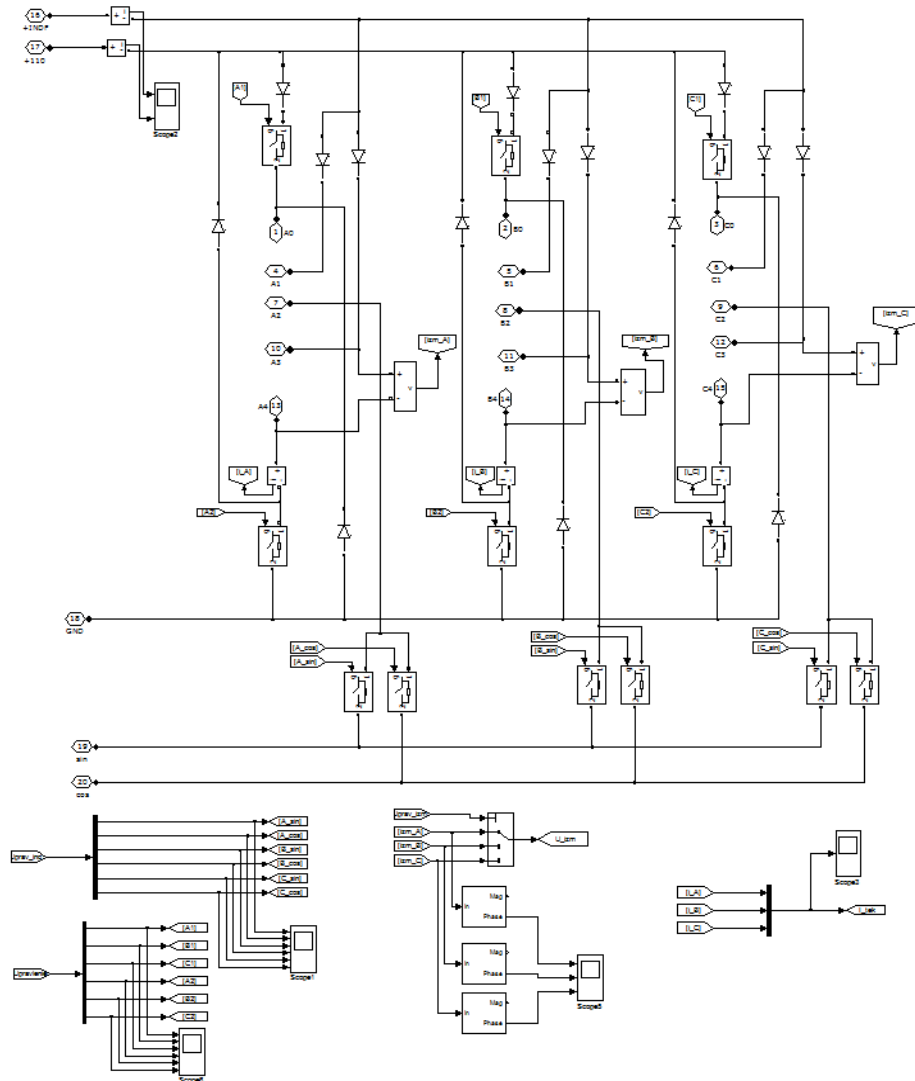


Рис. 3.11. Схема плеча коммутатора.

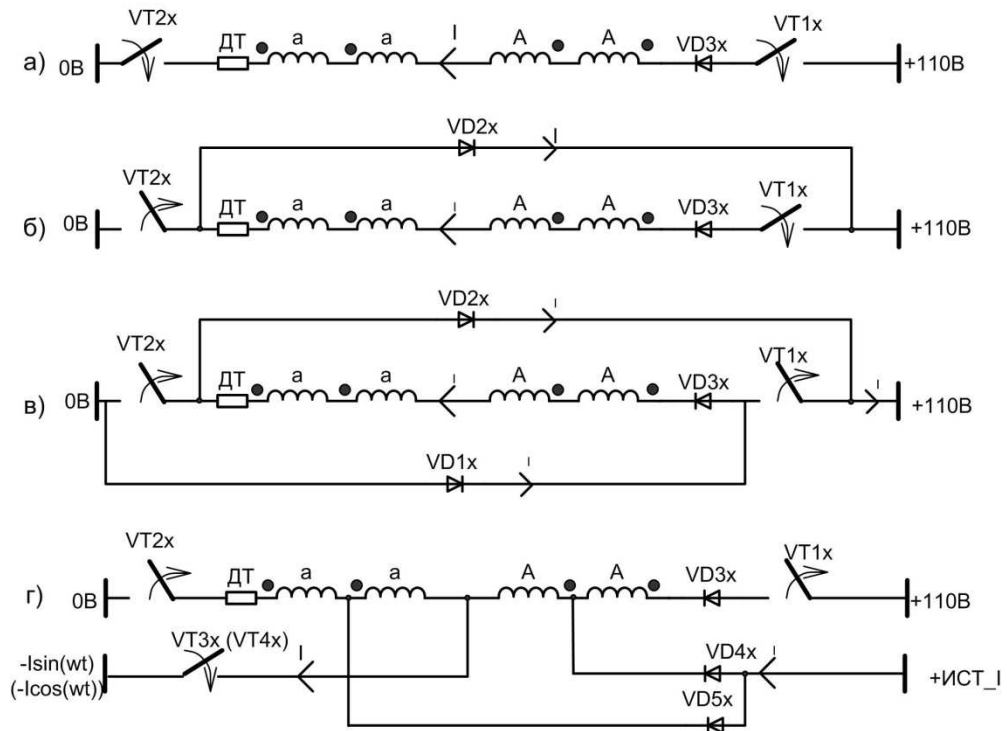
В приведенном варианте коммутатора ключи VT1x и VT2x обеспечивают формирование силового тока в фазных обмотках ВИМ, обратные диоды VD1x и VD2x обеспечивают поддержание и вывод электромагнитной энергии из фазных обмоток, защитные диоды VD3x, VD4x, VD5x защищают катушки ВИМ от протекания сквозных токов, возникающих в результате формирования в катушках ВИМ силового и измерительных токов. Защитный диод VD6x защищает ключи VT3x и VT4x от перенапряжения, возникающего в момент их коммутации. Ключи VT3x и VT4x отвечают за выбор катушек для формирования синусной и косинусной составляющих квадратур измерительных токов. Датчики напряжения ДН производят измерение напряжения на катушке, которое необходимо для определения величины ЭДС, которая наводится измерительными потоками. Датчик тока ДТ используется для измерения силового тока протекающего через катушки ВИМ, с целью дальнейшего регулирования силового тока в катушках ВИМ и, соответственно, электромагнитного момента.



**Рис. 3.12.** Схема модели коммутатора.

Поясним принцип работы коммутатора. При замыкании ключей VT1x (рисунок 3.13.) и VT2x фазная обмотка ВИМ подключается к источнику постоянного напряжения 110В. В катушках фазной обмотки начинает нарастать ток. Когда ток в фазной обмотке достигает номинального значения, размыкается ключ VT2x. Вход и выход фазной обмотки замыкаются через диод VD2x. Ток в фазной обмотке поддерживается на заданном уровне за счет индуктивности катушек. В случае падения тока ниже номинального значения ключ VT2x снова замкнется, и ток восстановит свое значение. При отключении фазной обмотки размыкаются ключи VT1x и VT2x. Ток в обмотке замыкается через обратные

диоды VD1x и VD2x, обмотка оказывается под обратным напряжением. Начинается процесс гашения токов в фазной обмотке машины. При замыкании ключа TV3x (VT4x) происходит подключение катушек фазной обмотки к источнику измерительного тока частотой 10 кГц. Катушка модулирует синусную или косинусную составляющую измерительной МДС, необходимую для перевода ВИМ в режим датчика углового положения.



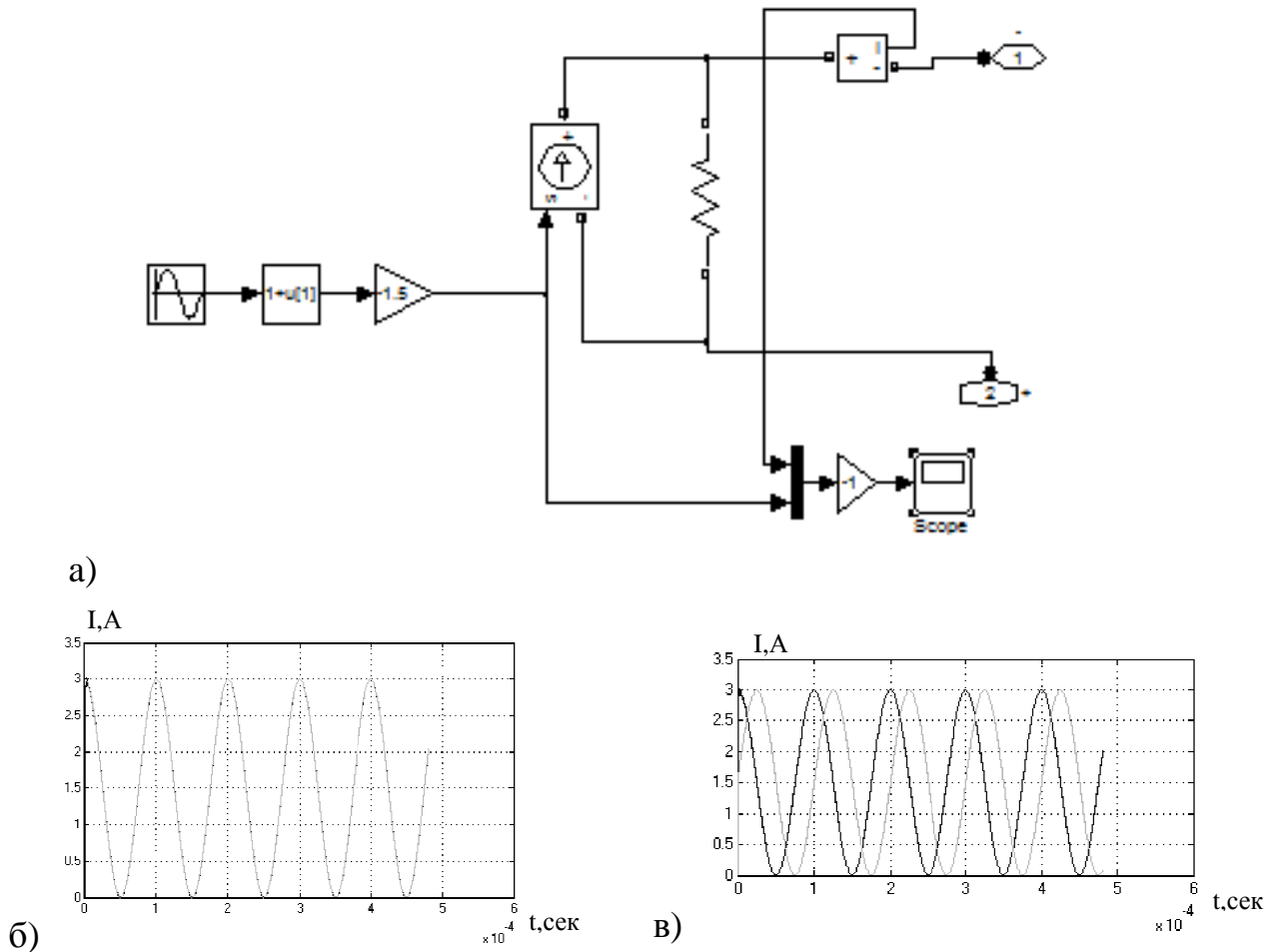
**Рис. 3.13.** Принцип работы коммутатора.

Для формирования измерительных токов, связанных квадратурными соотношениями, в среде matlab разработана модель двух источников тока. Модель одного из источников приведена на рисунке 3.7.а. Модели второго источника тока полностью идентична первому источнику, единственное отличие сигнал задания имеет фазовый сдвиг 90 эл.град. Источники формируют ток синусоидальной формы.

Представленный на рисунке 3.14.а. источник тока реализует синусоидальный ток частотой 10 кГц. Для обеспечения работоспособности коммутатора в источник дополнительно введена постоянная составляющая,

которая смещает первую гармонику, исключая формирование тока обратного направления. Это видно на диаграмме тока на выходе источника (рис.3.14.б.)

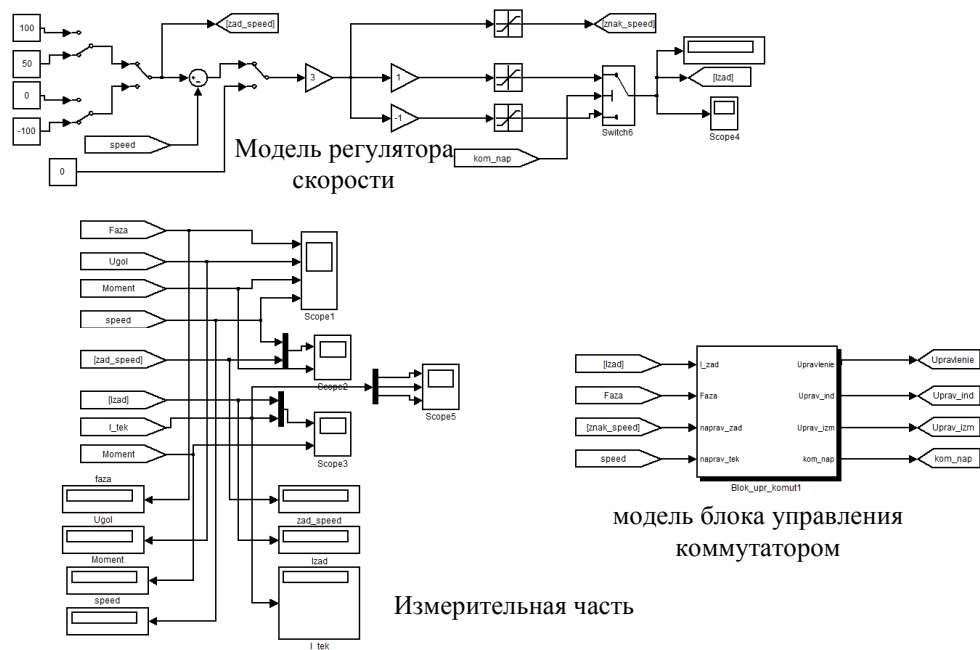
На рисунке 3.14.в. представлены токи на выходах двух источников. Из диаграмм видно соблюдение квадратурных соотношений (фазовый сдвиг на 90 эл.град.).



**Рис 3.14.** Модель источника тока (а) и диаграммы его работы (б,в).

Для моделирования сигналов управления ключами коммутатора, разработана модель системы управления. Схема модели системы управления приведена на рисунке 3.9. Она состоит из следующих частей:

1. модель регулятора скорости вращения ротора
2. модель блока управления коммутатором со встроенным регулятором тока;
3. измерительной части.



**Рис.3.15.** Схема модели системы управления.

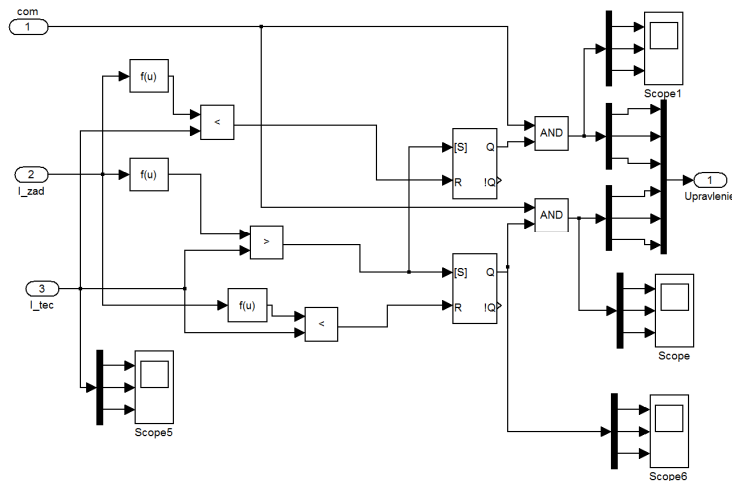
Регулятор скорости представлен в виде П-регулятора, на входе которого имеем сигнал ошибки регулирования, на выходе сигнал задания тока.

Регулятор тока (рисунок 3.16.) представлен в виде релейного регулятора, который переключается в логическую единицу, если ток на 4 % ниже заданного и в логический ноль, если ток на 4% выше заданного. Регулирование тока в 4% зоне осуществляется за счет включения-отключения нижнего ключа коммутатора, при включенном верхнем ключе. Это обеспечивает при отключении нижнего ключа замыкания тока внутри обмотки, как показано на рисунке 3.13. При превышении тока на 20 % от заданного регулятор тока отключает верхний и нижний ключ, что обеспечивает форсированное гашение тока в обмотке ВИМ и вывод энергии в сеть за счет обеспечения обратной полярности на обмотке. Превышение тока на 20% от заданного возможно в случаях:

1. Если после выхода за пределы 4% и отключения нижних ключей коммутатора ток в фазной обмотке продолжит расти, это характерно для перехода ВИМ в генераторный режим;

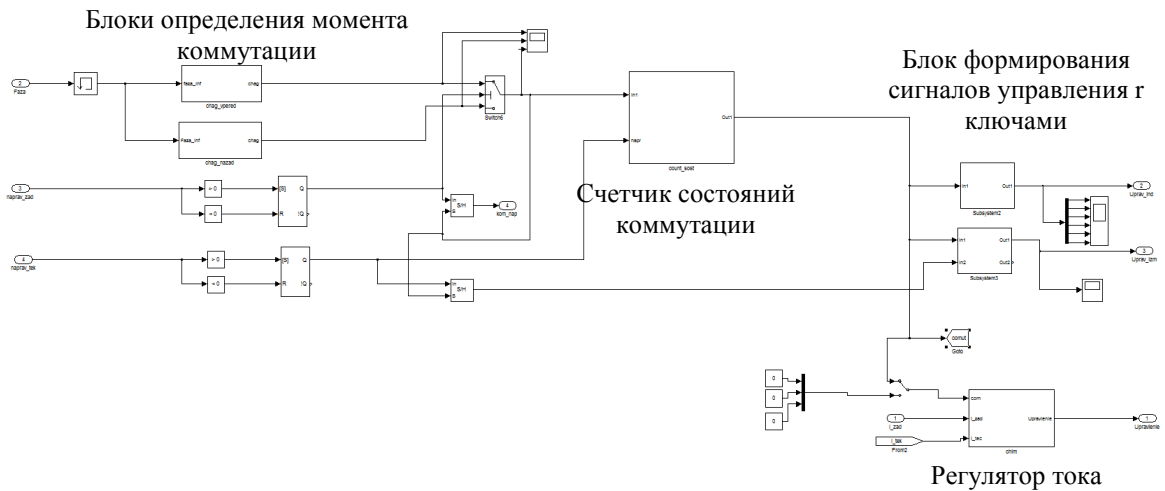


2. При уменьшении сигнала задания тока более чем на 20%.

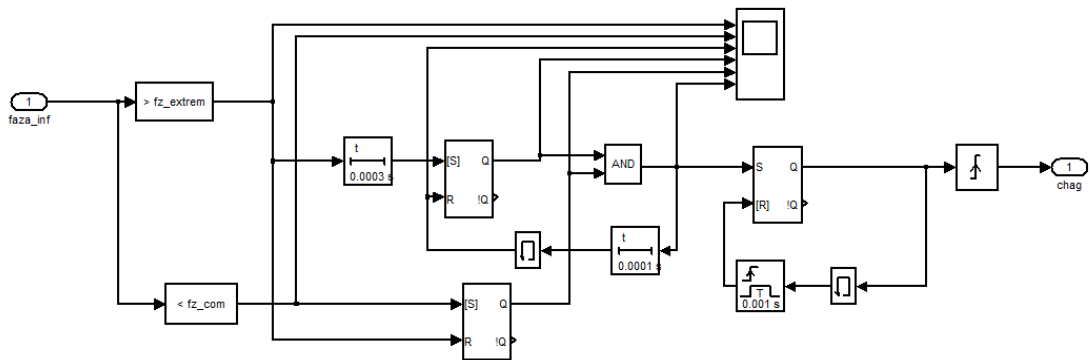


**Рис. 3.16.** Схема модели регулятора тока.

Блок управления коммутатором приведен на рисунке 3.17. Он состоит из двух блоков определения моментов коммутации обмоток ВИМ (рисунок 3.18.), счетчика состояний ключей коммутатора и блока формирования сигналов управления ключами коммутатора. Один блок определения момента коммутации формирует сигналы управления при формировании электромагнитного момента в положительном направлении, второй – в отрицательном. На вход блоков подаются сигналы фазы измерительной ЭДС. Сигнал фазы выделяется при помощи входящего в библиотеку PowerSistem блока преобразования Фурье, который из периодического сигнала выделяет значения фазы и амплитуды. В нашем случае необходимо использовать значение фазы. Вход блока преобразования Фурье через мультиплексор соединяется с выходом датчика напряжения, установленным на одной из катушек фазных обмоток.



**Рис.3.17.** Схема модели блока управления коммутатором.

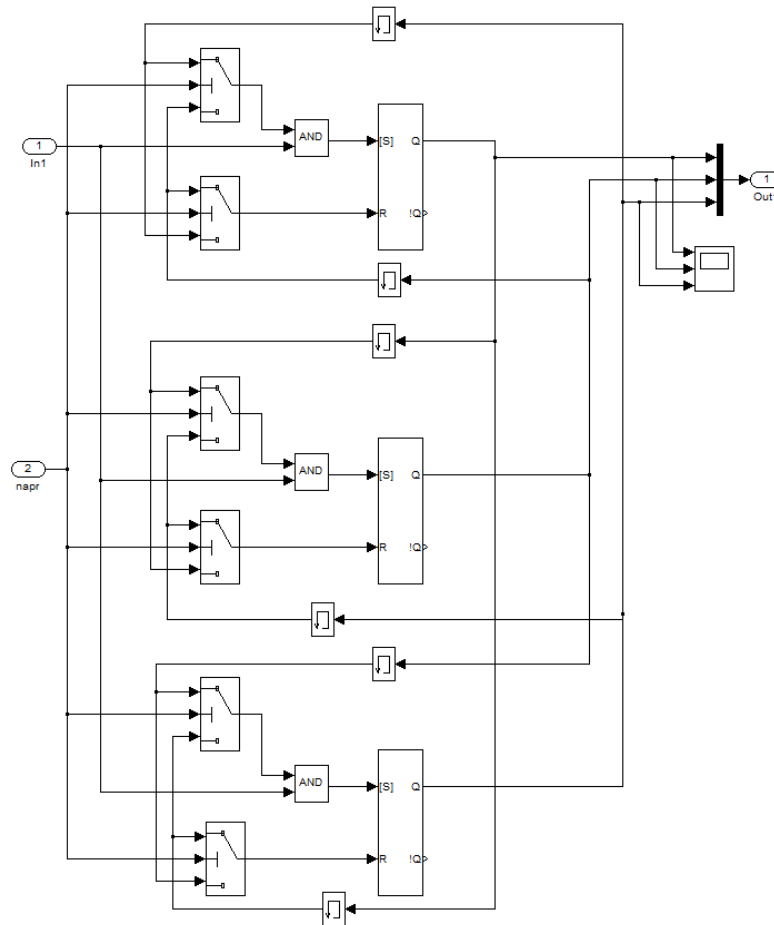


**Рис. 3.18.** Блок определения моментов коммутации.

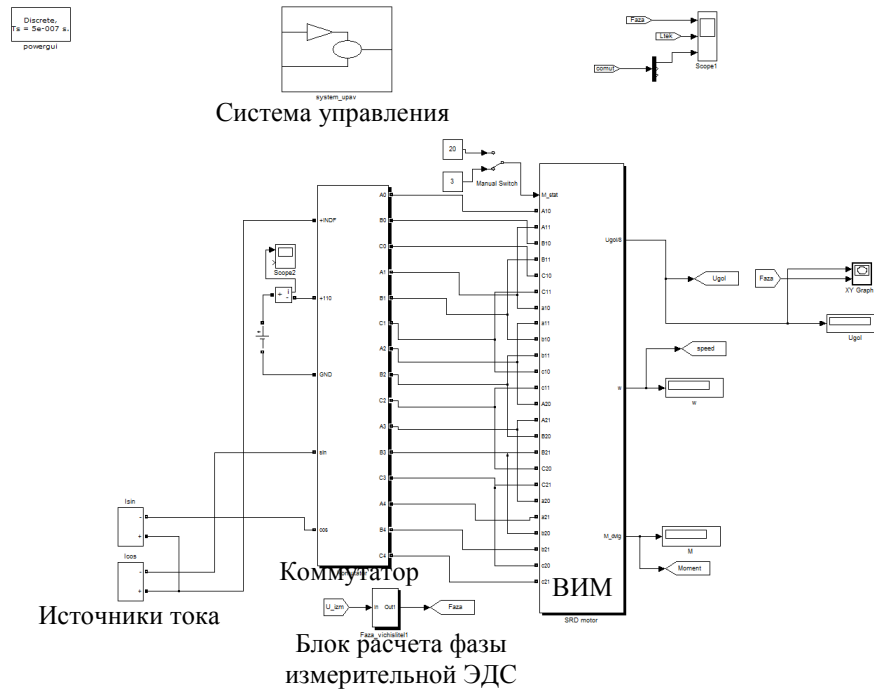
Сигналы с выходов блоков определения необходимости коммутации через мультиплексор поступают на вход счетчика состояний коммутации. В зависимости от текущего направления вращения счетчик состояний работает как на инкремент состояния, так и на декремент. На выходе счетчика имеем линию, состоящую из трех логических сигналов, один из которых равен единице, а два других нулю. Единичный сигнал указывает на фазную обмотку, в которой необходимо формировать силовые токи. Схема счетчика состояний приведена на рисунке 3.19.

Выход счетчика состояний соединен с блоками формирования сигналов управления ключами коммутатора. В зависимости от состояния счетчика блоки

управления ключами формируют логические сигналы управления, выбирают ключи, которые необходимо включить для формирования информационных токов, и выбирают необходимый датчик напряжения, с помощью которого измеряем ЭДС.



**Рис. 3.19.** Счетчик состояний коммутаций.



**Рис. 3.20.** Схема модели бездатчикового ВИП.

Из разработанных моделей ВИМ и элементов системы бездатчикового управления ВИМ в соответствии с функциональной схемой, приведенной на рис. 3.1., составлена модель бездатчикового ВИП. Схема модели представлена на рисунке 3.20.

Следует отметить, что разработанная модель системы бездатчикового управления ВИМ позволяет исследовать метод бездатчиковой идентификации углового положения ротора ВИМ и работу бездатчикового ВИП в различных режимах работы электропривода.

Исследования проведенные на компьютерной модели и макетном образце бездатчикового ВИМ показали их соответствие и подтвердили адекватность модели.

### **3.3. Разработка принципиальной схемы бездатчикового управления ВИМ.**

Для практической реализации системы бездатчикового управления ВИМ, а также для исследования метода идентификации углового положения ротора

разработана принципиальная схема системы управления ВИМ, которая на основе которой разработан макетный образец бездатчикового ВИП.

### 3.3.1. Разработка источника тока.

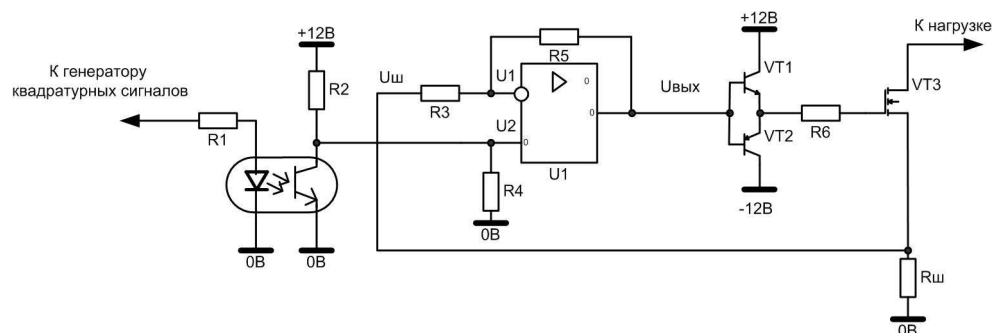


Рис. 3.21. Принципиальная схема источника тока.

Источник тока необходим для формирования квадратур измерительных токов в фазных обмотках машины. Данные квадратуры используются для идентификации углового положения ротора ВИМ. Сигнал управления источник тока получает от генератора квадратурно связанных сигналов, выполненных на базе микроконтроллера PIC12F629. Так как в информационно измерительной системе используется полосовой фильтр, настроенный на 10 кГц, то форма тока не критична, необходимо только соблюсти фазовый сдвиг между первыми гармониками двух источников. Для упрощения реализации источника тока разработан источник, формирующий не синусоидальные токи, а токи по форме близкие к меандру.

В рассмотренном источнике тока за формирование тока отвечает полевой транзистор VT3, работающий в активном режиме. Для формирования напряжения на затворе используется операционный усилитель U1. Для уменьшения нагрузки на выход операционного усилителя, усилитель U1 подключается к полевому транзистору VT3 через эмиттерный повторитель, выполненный на биполярных транзисторах VT1 и VT2. Для поддержания требуемого тока реализована отрицательная обратная связь по току.

При логическом нуле, на входе источника тока 0 В, источник тока должен формировать ток равный 0,5 А. При логической единице, на выходе источника должны иметь ток равный 0 А.

Рассчитаем источник тока.

Так как входным током операционного усилителя можно пренебречь, 0, то справедливы равенства:

$$\frac{U_{ш} - U_1}{R_3} = \frac{U_1 - U_{вых}}{R_5} \quad (3.15)$$

$$U_2 = 12 \cdot \frac{R_4}{R_2 + R_4}, \quad (3.16)$$

где  $U_1$  – напряжение на инверсном входе операционного усилителя,  $U_2$  – напряжение на прямом входе операционного усилителя.

Так как операционные усилители обладают коэффициентом усиления  $K > 10000$ , то можно принять:

$$U_1 = U_2 = 12 \cdot \frac{R_4}{R_2 + R_4} \quad (3.17)$$

Из уравнения 3.15:

$$\frac{R_5}{R_3} = \frac{U_1 - U_{вых}}{U_{ш} - U_1} = K > 0 \quad (3.18)$$

Зададимся  $R_{ш} = 0,5$  Ом, тогда:

$$U_{ш} = I \cdot R_{ш} = 0,5 \cdot 0,5 = 0,25 \text{ В} \quad (3.19)$$

Потери в шунте:

$$P_{ш} = I^2 R_{ш} = 0,5^2 \cdot 0,5 = 0,125 \text{ Вт}$$

Из передаточной характеристики транзистора IRF630N (транзистор VT3 рис. 3.21.) получено, что току 0,5 А соответствует напряжение на затворе 4,5 В,

Отсюда:  $U_{вых} = 0,5 \text{ В}$

Из уравнения 3.18:

$$U_1 = \frac{K \cdot U_{ш} + U_{вых}}{1 + K} \quad (3.20)$$

Зададимся  $K = 10$ , тогда:

$$U_1 = \frac{K \cdot U_{ш} + U_{вых}}{1 + K} = \frac{10 \cdot 0,25 + 4,5}{1 + 10} = 0,64 \text{ В} \quad (3.21)$$

Зададимся  $R_3=10$  кОм, тогда  $R_5 = K \cdot R_3 = 10 \cdot 10 = 100$  кОм.

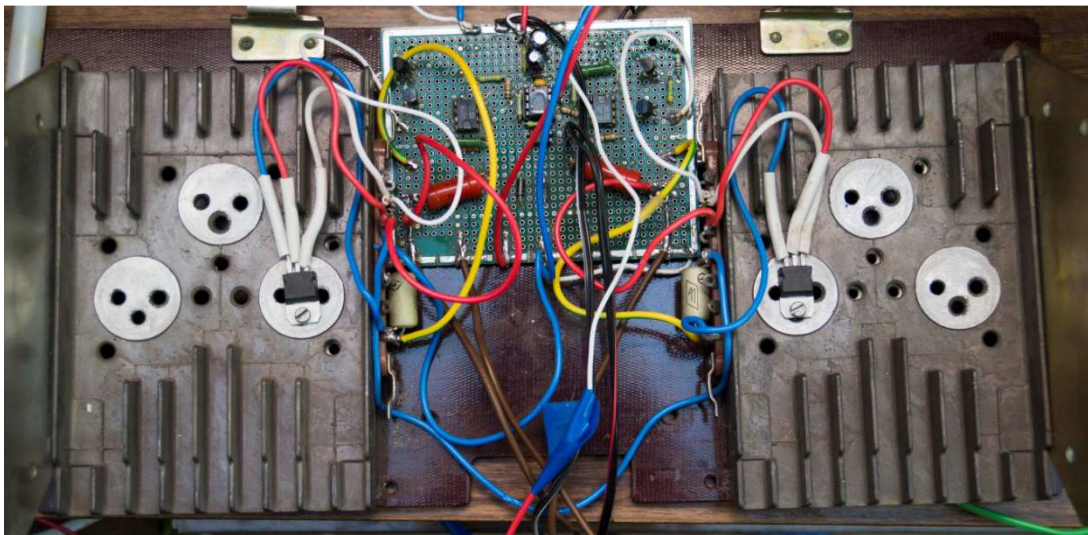
Зададимся  $R_4=1$  кОм, тогда из уравнение 3.15. имеет вид:

$$R_2 = \frac{(12 - U_1) \cdot R_4}{U_1} = \frac{(12 - 0,64) \cdot 1}{0,64} = 17,8 \text{ кОм} \quad (3.22)$$

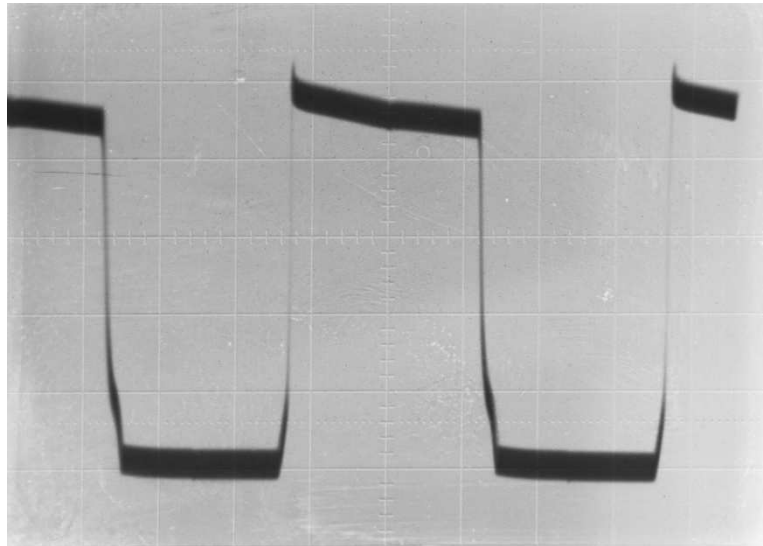
Резистор  $R_1$  устанавливается для ограничения тока через оптопару. Выберем  $R_1=4,7$  кОм

При подаче логической единицы на вход источника тока выходной транзистор оптопары открывается,  $U_1=U_2=0$  В. Равенство 3.17. выполняется при  $U_{вых}=U_{ш}=0$ В, данное равенство выполняется при выходном токе равном 0. Что и требуется.

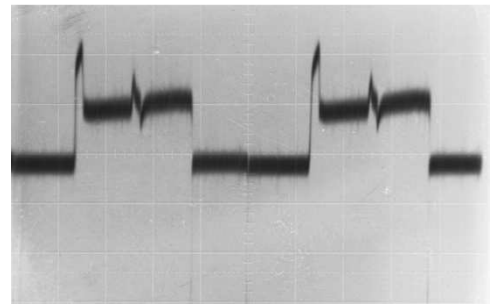
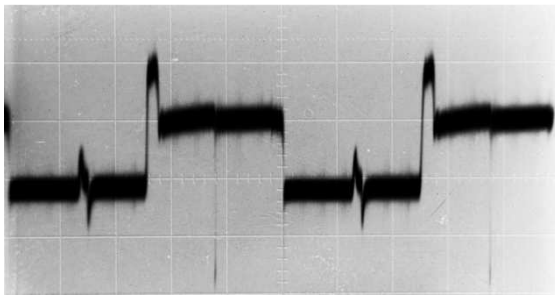
На рисунке 3.22. приведена фотография источника тока, реализованного на макетном образце бездатчикового ВИП. На рисунке 2.23. – 3.24. диаграммы его работы.



**Рис 3.22.** Источник квадратурных токов



**Рис. 3.23.** Осциллограмма измерительного тока в катушках ВИМ (Масштаб по оси X: 1 кл.=20 мкс; масштаб по оси Y: 1 кл.=0,1А).



**Рис. 3.24.** Осциллограммы модулируемых измерительных напряжений на катушках ВИМ (Масштаб по оси X: 1 кл.=20 мкс; масштаб по оси Y: 1 кл.=5 В).

Из осциллограмм напряжений виден сдвиг первых гармоник напряжений на 90 эл. градусов. Бросок напряжения в момент формирования переднего фронта импульса тока обусловлен тем, что в момент нарастания тока его уровень значительно ниже заданного, в результате чего источник тока находится в насыщенном состоянии и формирует на катушке максимальное напряжение, соответствующее напряжению питания. Бросок уровня напряжения в средней части импульса обусловлен изменением уровня квадратурно связанного тока в смежных катушках ВИМ и возникновению, вследствие взаимных электромагнитных связей катушек, ЭДС.



### 3.3.2. Разработка полосового фильтра и компаратора напряжения

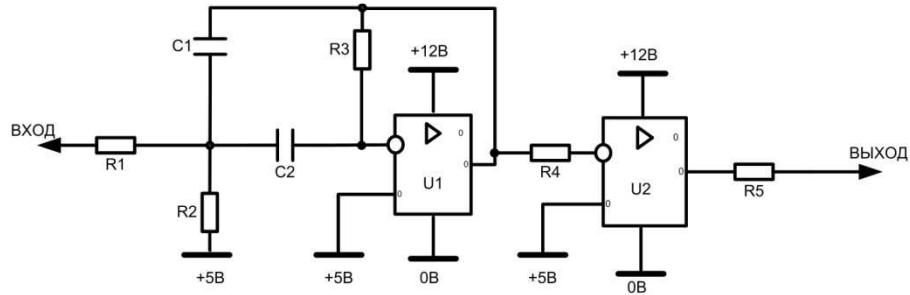


Рис. 3.25. Принципиальная схема полосового фильтра и компаратора.

Полосовой фильтр предназначен для выделения гармоники частотой 10 кГц, необходимой для определения углового положения гармоники наведенной ЭДС. Операционный усилитель U1 (см. рис. 3.25.) выполняет функцию фильтра, а операционный усилитель U2 выполняет функцию компаратора.

Для построения полосового фильтра используем стандартную схему полосно-пропускающего фильтра с многопетлевой обратной связью (рисунок 3.25).

Методика расчета приведена в [57].

Примем коэффициент усиления фильтра  $K=2$ ; добротность фильтра  $Q=1$ , тогда  $\rho = K/Q = 2/1 = 2$ ;  $\beta = 1/Q = 1/1 = 1$ ;  $\gamma = 1$

$\omega_0 = 2\pi f_0 = 2 \cdot 3.14 \cdot 10000 = 62800$  рад/с, где  $f_0 = 10$  кГц – центральная частота фильтра.

Расчет номиналов элементов полосового фильтра:

$$C_1 = \frac{10}{f_0} = \frac{10}{10000} = 0,001 \text{ мкФ} = 1 \text{ нФ} \quad (3.23)$$

$$C_2 > C_1(\rho\beta - \gamma)/\gamma = 1 \cdot (2 \cdot 1 - 1)/1 = 1 \text{ нФ} \quad (3.24)$$

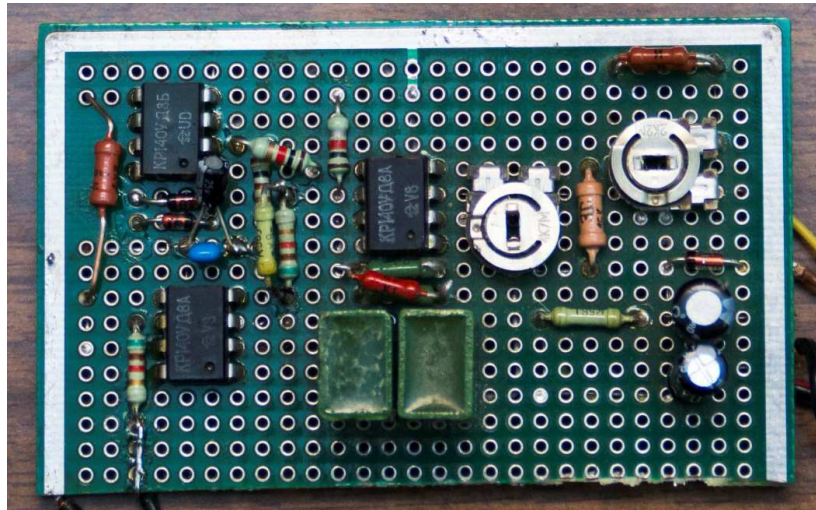
$$R_1 = \frac{1}{\rho\omega_0 C_1} = \frac{1}{2 \cdot 62800 \cdot 1 \cdot 10^{-9}} = 15.92 \cdot 10^3 \text{ Ом} = 15,9 \text{ кОм} \quad (3.25)$$

$$R_2 = \frac{\beta}{[C_1(\gamma - \rho\beta) + \gamma C_2]\omega_0} = \frac{1}{[1 \cdot 10^{-9} \cdot (1 - 2 \cdot 1) + 1 \cdot 1 \cdot 2,2 \cdot 10^{-9}] \cdot 62800} = 13,2 \text{ кОм} \quad (3.26)$$

$$R_3 = \frac{1}{\beta\omega_0} \left( \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \right) = 23.2 \text{ кОм} \quad (3.27)$$

Выходной резистор компаратора  $R_5=10 \text{ кОм}$  служит для согласования и выходного напряжения компаратора  $0 \text{ +}10 \text{ В}$  и входного напряжения микроконтроллера  $0\text{--}5 \text{ В}$ . Так как входной буфер порта микроконтроллера содержит защитные диоды, то напряжения на входе порта микроконтроллера не будет превышать  $5 \text{ В}$ , а входной ток будет ограничен резистором  $R_5$ .

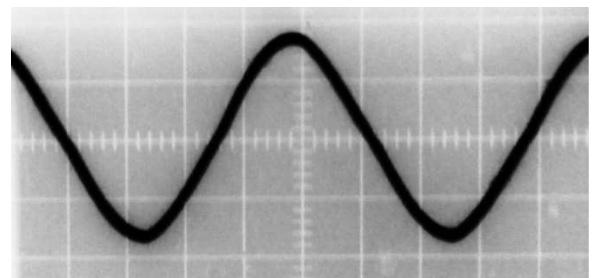
На рисунке 3.26. представлена фотография полосового фильтра, реализованного на макетном образце бездатчикового ВИП, на рисунке 3.27. представлены сигналы на входе и выходе полосового фильтра.



**Рис. 3.26.** Полосовой фильтр и компаратор напряжения.



а) Масштаб по оси X 1 кл.=20 мкс.



б) Масштаб по оси X 1 кл.=10 мкс.

**Рис. 3.27.** Осциллограммы сигналов на входе (а) и выходе (б) полосового фильтра.

### 3.3.3. Разработка коммутатора.

Коммутатор предназначен для формирования силовых и измерительных токов в катушках ВИМ.

Воздействуя на ключи коммутатора, система управления управляет формированием токов в катушках двигателя и, следовательно, формированием момента, также происходит управление формированием измерительных токов.

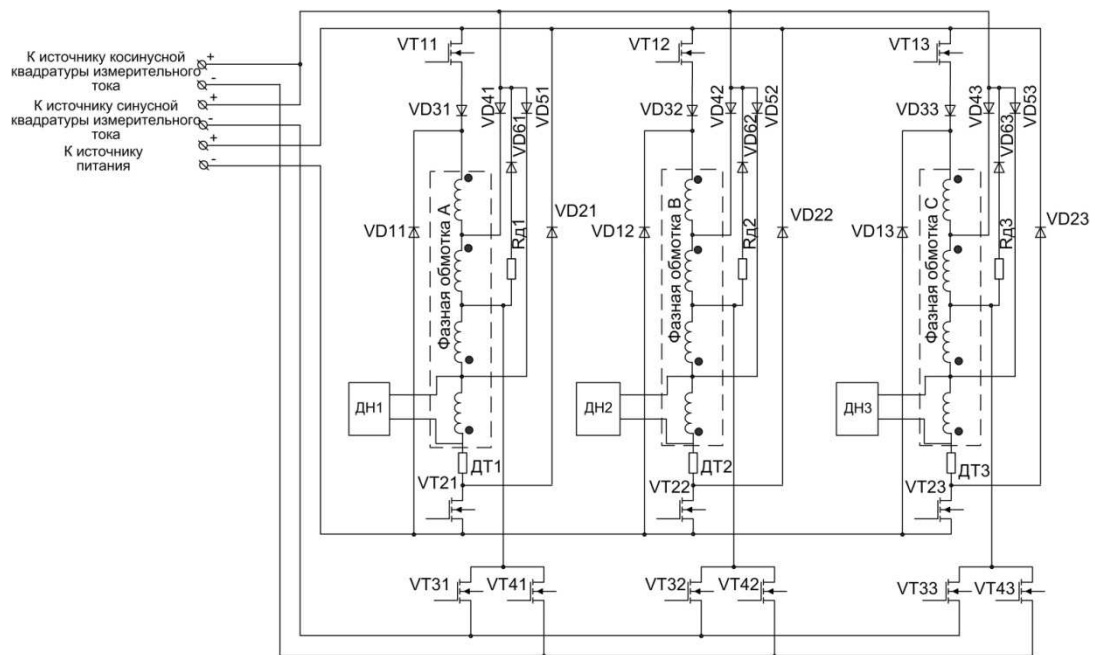


Рис. 3.28. Принципиальная схема силового вентильного коммутатора.

На рисунке 3.28. приведена принципиальная схема коммутатора. В приведенной схеме ключи VT11-VT13, VT21-VT23 коммутируют силовые токи в фазных обмотках машины (данные токи формируют электромагнитный момент машины). Датчики тока ДТ1-ДТ3 измеряют мгновенное значение силового тока в обмотках ВИМ и передают информацию в систему управления. Ключи VT31-VT33 производят выбор фазных обмоток, в которых необходимо модулировать косинусную составляющую квадратуры токов, ключи VT41-VT43 производят выбор фазных обмоток, в которых необходимо модулировать синусную составляющую квадратур токов. Датчики напряжения ДН1 – ДН3 необходимы

для измерения ЭДС, наведенной в катушках ВИМ измерительными потоками. Диоды VD11-VD13 и VD21-VD23 используются для вывода электромагнитной энергии из фазных обмоток ВИМ в процессе формирования силового тока. Диоды VD31-VD33, VD41-VD43 и VD51 – VD53 необходимы для исключения возникновения сквозных токов в процессе формирования силовых и измерительных токов. Диоды VD61-VD63 совместно с резисторами Rд1-Rд3 исключают возникновение перенапряжения на ключах VD31-VD33, VD41-VD43 в момент их коммутации.

Принцип работы коммутатора пояснен на рисунке 3.13.

Для обеспечения работоспособности предлагаемого коммутатора и исключения возникновения сквозных токов требуется осуществлять питание коммутатора и питание источников тока, формирующих квадратурные токи, от гальванически развязанных источников напряжения.

На рисунке 3.29. представлена фотография коммутатора реализованного на макетном образце.

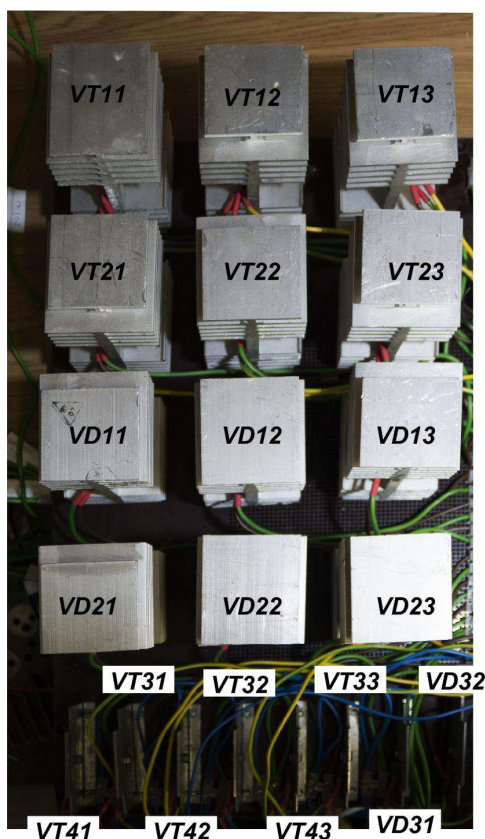


Рис. 3.29. Коммутатор обмоток ВИМ.

Для идентификации углового положения ротора ВИМ необходимо измерять мгновенное значение измерительной ЭДС. Для чего используем датчик напряжения, выполненный на операционном усилителе. Одна из основных функций датчика напряжения – это гальваническая развязка силовой и слаботочной частей системы управления. С этой целью на входе датчика установлены конденсаторы  $C_1$  и  $C_2$  (рисунок 3.30.). Использование конденсаторов исключает измерение постоянной составляющей напряжения, а так как постоянная составляющая напряжения не несет ни какой информации, то исключение постоянной составляющей уменьшает нагрузку на информационную систему.

Используем пленочные конденсаторы емкостью  $C_1=C_2=0,33$  мкФ и напряжением 400В. Емкостное сопротивление конденсаторов на частоте 10 кГц:

$$X = \frac{1}{2\pi f C_1} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 10000 \cdot 0,33 \cdot 10^{-6}} = 48,3 \text{ Ом} \quad (3.28)$$

Так как номиналы входных резисторов более 1 кОм, то емкостным сопротивлением конденсаторов можно пренебречь.

Примем  $R_1 = R_4$ ,  $R_2 = R_3 = 4,7$  кОм, тогда коэффициент усиления рассчитывается по формуле:

$$K = \frac{R_1}{R_2} \quad (3.29)$$

Примем коэффициент усиления  $K=1$ , тогда:

$$R_1 = K \cdot R_2 = 1 \cdot 4,7 = 4,7 \text{ кОм} \quad (3.30)$$

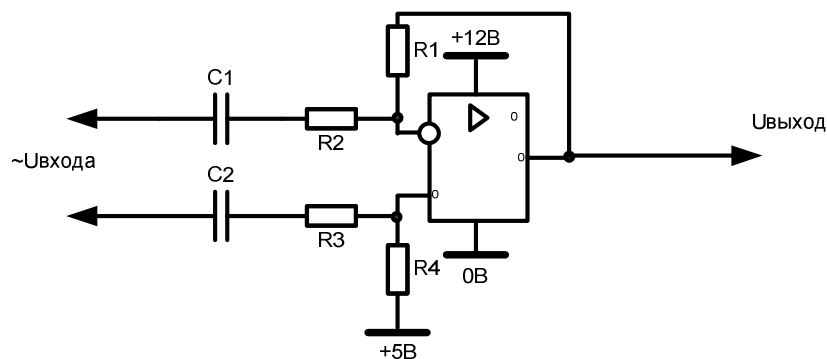


Рис. 3.30. Схема датчика напряжения.

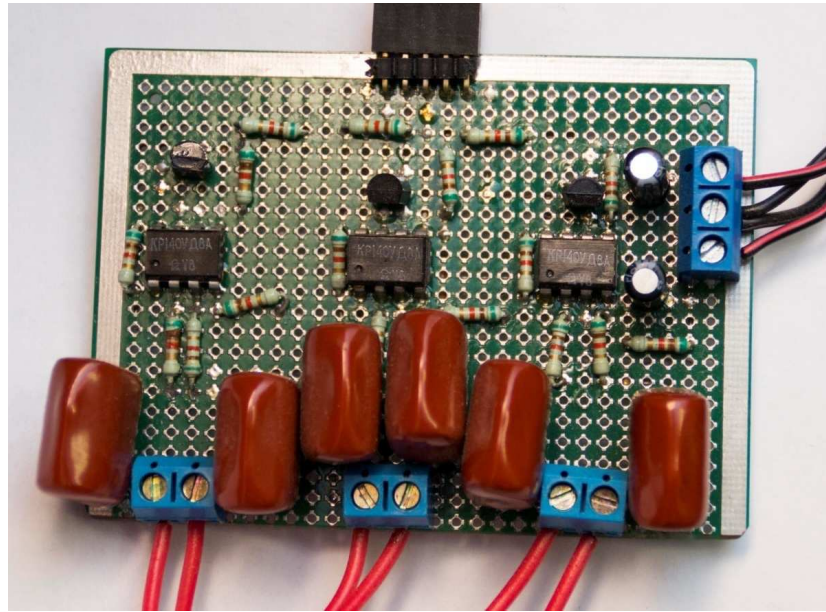


Рис 3.31. Датчики напряжения.

### 3.3.4. Разработка блока драйверов.

Блок драйверов предназначен для гальванической развязки силовой части коммутатора ВИМ с системой управления и для формирования сигналов управления ключами коммутатора. Для управления ключами VT11-VT13 и VT21-VT23 используем драйвера верхнего и нижнего плеча IR2106. Один драйвер одновременно управляет одним транзистором верхнего плеча и одним транзистором нижнего плеча. На каждую фазу двигателя необходимо установить по одному драйверу.

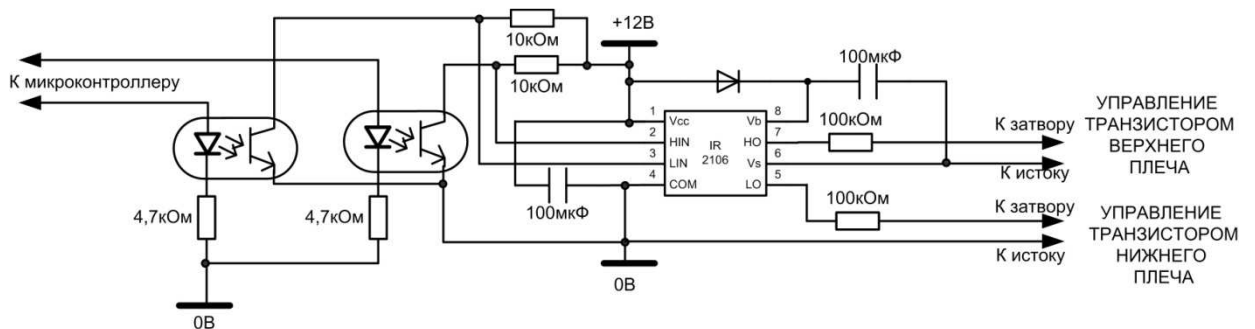


Рис. 3.32. Схема включения драйвера IR2106.



На рисунок 3.32. приведена схема включения драйвера. Данная схема составлена на основании рекомендаций фирмы производителя.

Для гальванической развязки силовой и слаботочной части системы управления использованы оптопары.

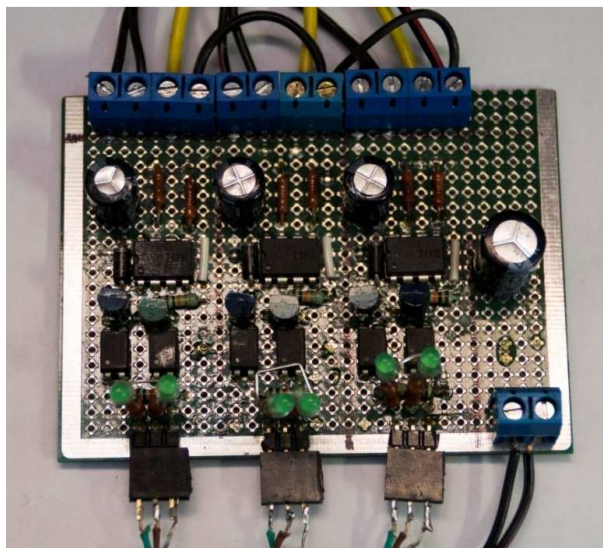
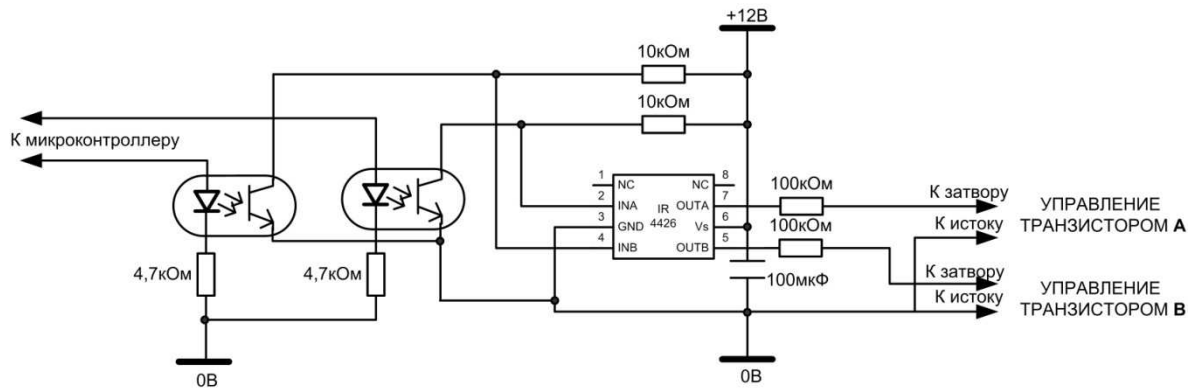


Рис. 3.33. Драйвер управления силовыми ключами.

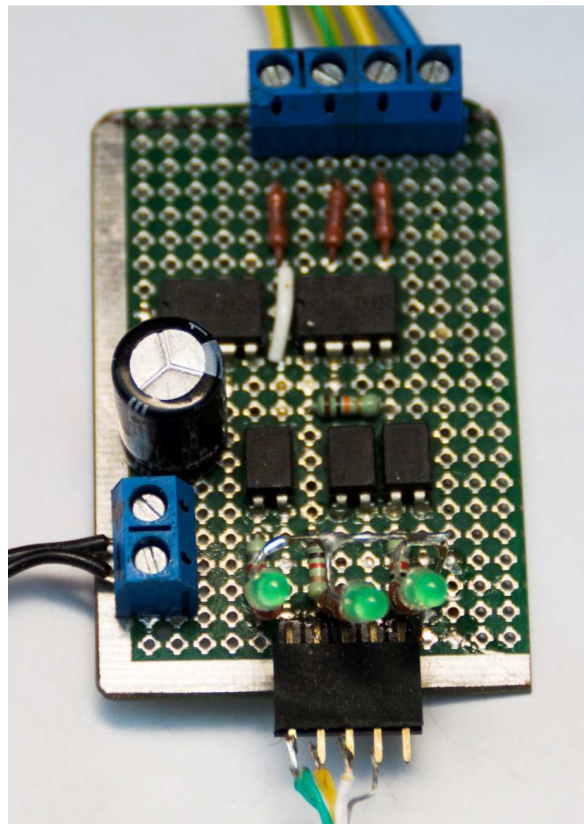
Для управления ключами VT31-VT33 и VT41-VT43 используем драйвера нижнего плеча IR4426. Данные драйвера одновременно управляют двумя полевыми транзисторами, расположенными в нижнем плече. Для исключения сквозных токов, питание драйверов, управляющих транзисторами VT31-VT33 и транзисторами VT41-VT43 осуществляется от двух гальванически развязанных источников.

Схема включения драйвера IR4426 представлена на рисунке 3.34. Данная схема составлена на основе рекомендаций фирмы производителя.

В системе управления установлено 4 драйвера IR4426. Один драйвер управляет транзисторами VT13, VT32; второй – транзистором VT33; третий – VT41 и VT42; четвертый – VT43.



**Рис. 3.34.** Схема включения драйвера управления измерительными ключами.



**Рис3.35.** Драйвер управления измерительными ключами



### 3.4. Описание макетного образца бездатчикового ВИП.

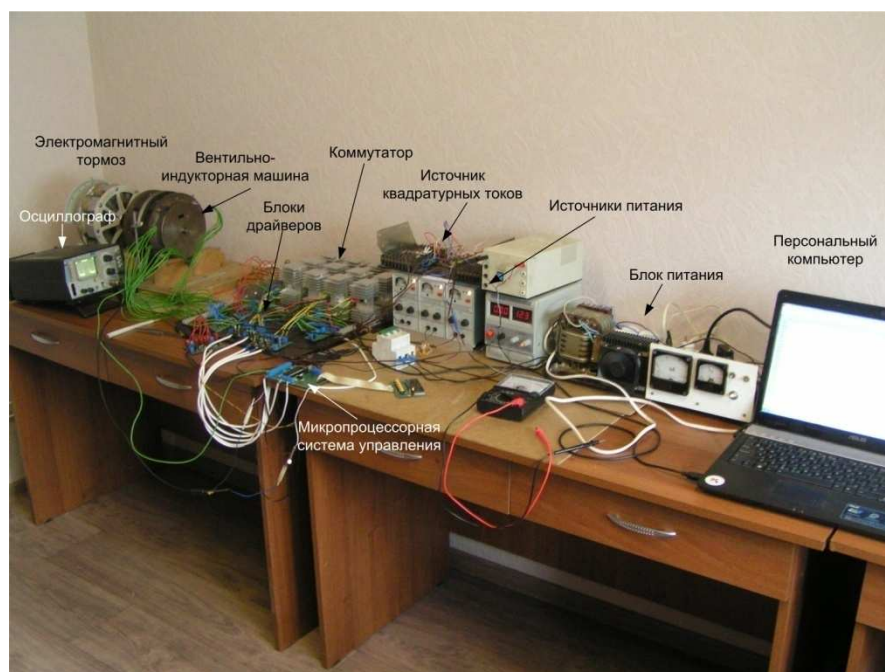


Рис. 3.36. Макетный образец бездатчикового ВИП.

Согласно рассмотренным выше схмотехническим решениям собран макетный образец бездатчикового ВИП, который представлен на рисунке 3.36. В макетный образец входят следующие функциональные блоки:

1. **Блок питания**, с регулируемым напряжением на выходе в диапазоне от 0 до 120 В. Данный блок питания предназначен для питания коммутатора обмоток ВИМ и формирования силового тока в обмотках.

2. **Источники питания** напряжением 12 В, предназначенные для питания элементов системы управления и источника квадратурных токов.

3. **Микропроцессорная система управления**, которая анализирует текущее угловое положение ротора (фазу измерительной ЭДС), формирует сигналы управления ключами коммутатора, производит регулирование скорости и тока в обмотках ВИМ.

4. **Блоки драйверов**, которые выполняют гальваническую развязку микропроцессорной системы управления с коммутатором и согласно сигналам

управления, идущим от системы управления, формирует напряжение на затворах ключей коммутатора.

5. **Коммутатор**, который управляет формированием силовых и измерительных токов в обмотках ВИМ.

6. **Ветильно-индукторная машина.**

7. **Электромагнитный тормоз** предназначен для нагрузки ВИМ.

8. **Персональный компьютер**, который используется для программирования микропроцессорной системы управления и отладки программного обеспечения.

Для реализации схемы предложенной схемы коммутатора и возможности реализовывать любые схемы соединений катушек ВИМ произведена модернизация ВИМ, заключающаяся в выводе из машины выводов всех 12 катушек. на рисунке 3.37. представлен статор ВИМ с смонтированными выводами.

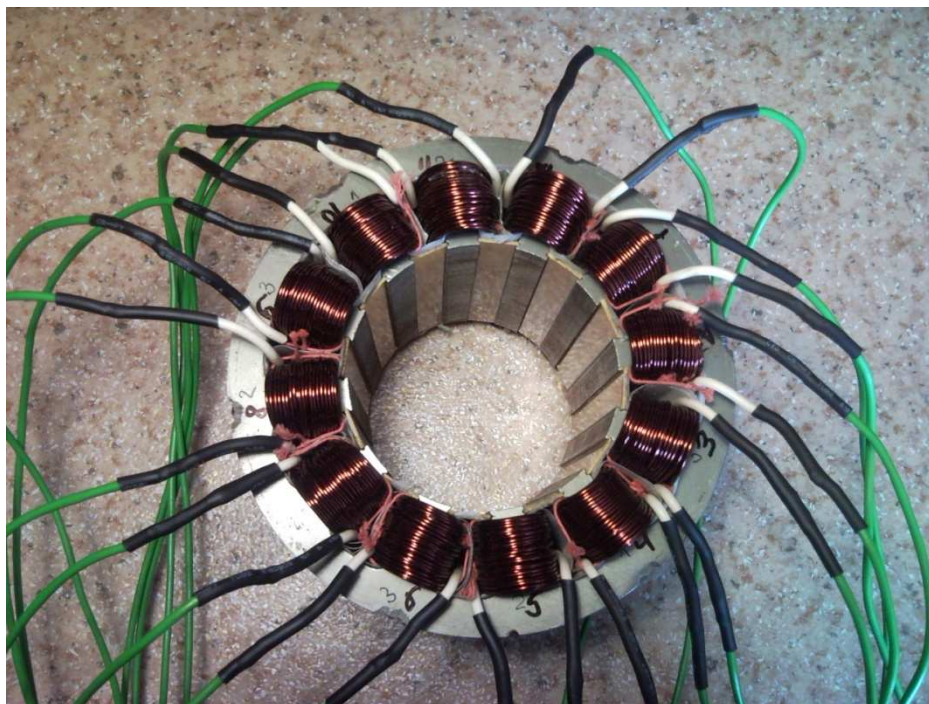


Рис. 3.37. Статор вентильно-индукторной машины.

Разработанный и собранный макетный образец бездатчикового ВИП имеет научную и практическую ценность, он позволяет произвести исследование предложенного метода идентификации углового положения ротора ВИМ, а

также позволяет произвести исследование замкнутых систем управления ВИМ до их внедрения.

Разработанный макетный образец используется в ООО «ИТЦ ПРОМИКС» в исследовательских целях.

### **Выводы по главе 3:**

В главе 3 разработана система бездатчикового управления ВИМ, описаны и реализованы алгоритмы управления. Составлена компьютерная модель системы управления. Разработана принципиальная схема.

В процессе работы на главой решены следующие задачи:

1. Разработана функциональная схема бездатчикового управления ВИМ;
2. Реализованы алгоритмы бездатчикового управления ВИМ.
3. Составлена компьютерная имитационная модель системы управления.
4. Разработана принципиальная схема системы бездатчикового управления ВИМ.

## ГЛАВА 4. ИССЛЕДОВАНИЕ БЕЗДАТЧИКОВОГО УПРАВЛЕНИЯ ВЕНТИЛЬНО-ИНДУКТОРНОЙ МАШИНОЙ.

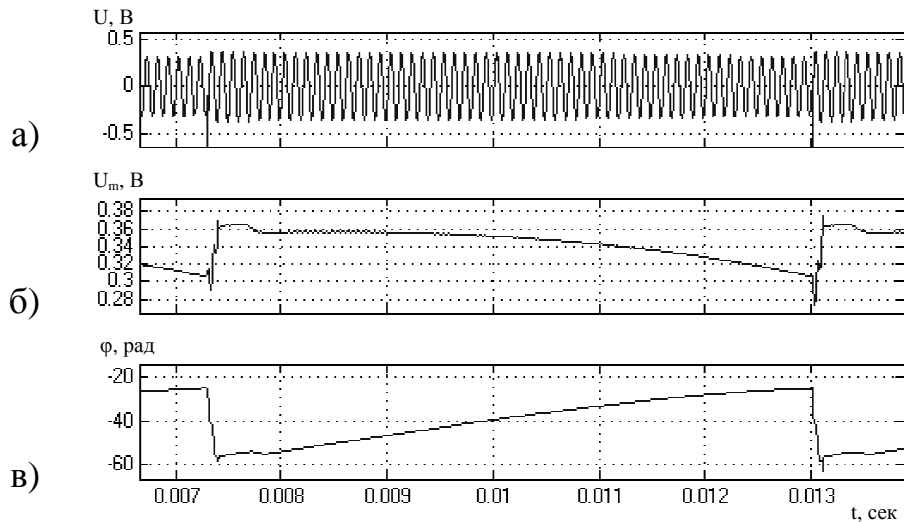
В главе 4 проанализированы результаты исследования и апробации метода бездатчикового определения углового положения ротора ВИМ. Представлены результаты исследования.

### **4.1. Исследование метода идентификации углового положения ротора ВИМ**

Главной задачей, после разработки метода бездатчиковой идентификации углового положения ротора, стала его апробация и исследование.

Для проверки работоспособности способа бездатчиковой идентификации углового положения ротора с компьютерной модели и макетного образца сняты и проанализированы зависимости фазы измерительной ЭДС от углового положения ротора ВИМ.

На компьютерной модели для выделения фазы измерительной ЭДС использовался блок преобразования Фурье, входящий в библиотеку PowerSystem пакета Matlab. На входе блока имеем амплитуда и фазовый сдвиг входного сигнала. На рисунке 4.1. приведены диаграммы сигналов на входах и выходах блока преобразования Фурье.

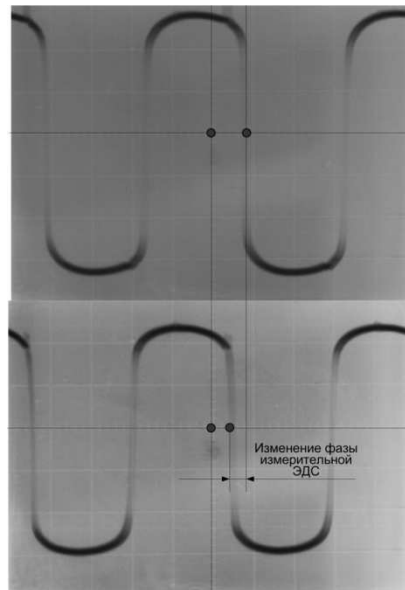


**Рис. 4.1.** Диаграммы мгновенного значения измерительной ЭДС (а), ее амплитуды (б) и фазы (в).

Для измерения фазы измерительной ЭДС на макетном образце бездатчикового ВИП на ВИМ нанесена измерительная шкала, по которой определяется текущее угловое положение ротора (рисунок 4.2.), для измерения фазы измерительной ЭДС используется однолучевой осциллограф, работающий в режиме внешней синхронизации. Осциллограф получает сигнал синхронизации от источников измерительных токов. На вход осциллографа подается сигнал с выхода компаратора напряжений, преобразующий сигнал первой гармоники измерительной ЭДС в последовательность импульсов. По фазовому сдвигу фронта импульса определяется фазовый сдвиг фазы измерительной ЭДС, как показано на рисунке 4.3.



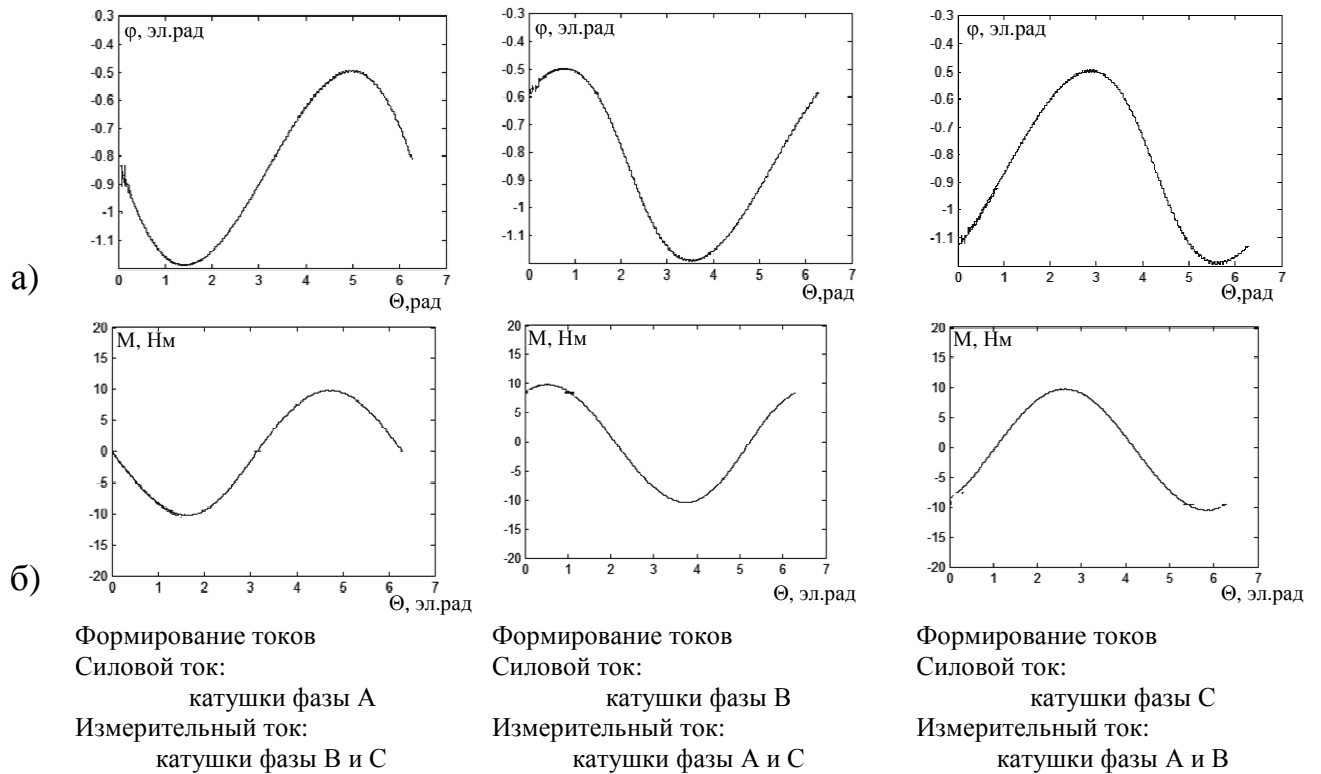
**Рис. 4.2.** Шкала измерения положения ротора.



**Рис 4.3.** Изменение фазы измерительной ЭДС при изменении углового положения ротора ВИМ

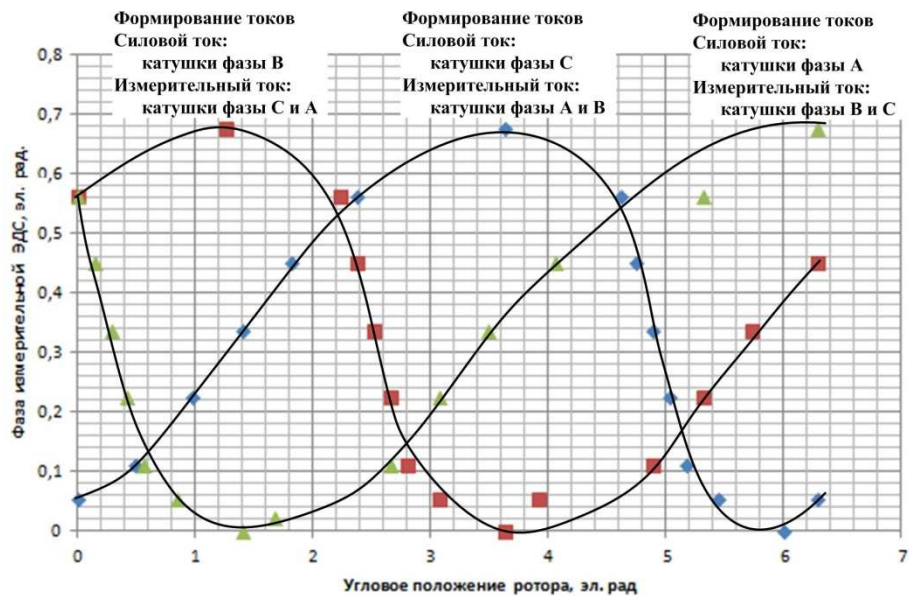
Результаты измерения фазы измерительной ЭДС от углового положения ротора представлены на рисунках 4.4. – 4.5.

На рисунке 4.4.а. приведены зависимости фазы измерительной ЭДС от углового положения ротора ВИМ при формировании измерительных потоков в различных катушках ВИМ. На рисунке 4.4.б. приведены мгновенные значения электромагнитных моментов при одиночной коммутации обмоток и фиксированном силовом токе в фазной обмотке ВИМ. При этом выбор катушек для формирования силовых и измерительных токов соответствует коммутационным диаграммам (см. приложение 2). Для каждого из 3 состояний коммутации сняты зависимости фазы измерительной ЭДС и электромагнитного момента ВИМ от углового положения ротора на диапазоне изменения углового положения ротора от  $0$  до  $2\pi$  эл.рад..



**Рис. 4.4.** Зависимости фазы измерительной ЭДС (а) и электромагнитного момента (б) от углового положения ротора ВИМ снятые с компьютерной модели.

Снятые на макетном образце бездатчикового ВИП зависимости фазы измерительной ЭДС от углового положения ротора при различных вариантах формирования измерительных потоков представлены на рисунке 4.5.



**Рис. 4.5.** Семейство экспериментальных зависимостей фазы измерительной ЭДС от углового положения ротора.



Снятые на макетном образце бездатчикового ВИП зависимости аналогичны зависимостям полученным в результате моделирования. Зависимости имеют одинаковый диапазон изменения фазы наведенной ЭДС ( $\approx 38.9$  эл.град,  $0,680$  эл.рад.). Но форма характеристик незначительно отличается, это связано с тем, что в компьютерной модели заложена синусоидальная зависимость магнитной проводимости от углового положения ротора. В реальной же ВИМ зависимость магнитной проводимости от углового положения отличается от синусоиды.

Стоит отметить, что снятые на макетном образце и компьютерной модели зависимости также имеют различное абсолютное значение фазы ЭДС, это отличие вызвано тем, что в модели и макетном образце использовались разные точки отчета. Точка отчета на макетном образце выбиралась исходя из удобства измерений, при минимальной фазе луч осциллографа останавливался таким образом, что бы фронт сигнала с выхода компаратора проходил через точку  $(0,0)$ , и при этом калибровалась измерительная шкала углового положения (значение текущего угла считалось нулевым) и далее начиналось измерение. Стоит отметить, что для измерения использовался однолучевой осциллограф, работающий в режиме внешней синхронизации.

На макетном образце бездатчикового ВИП была исследована зависимость фазы измерительной ЭДС от величины силового тока в рабочих обмотках. В процессе измерения вал двигателя жестко фиксировался в различных угловых положениях, и, при задании различной величины силового ток, отслеживалось изменение фазы измерительной ЭДС. При этом формирование силовых и измерительных токов было разнесено пространственно в катушки, принадлежащие разным фазным обмоткам. Исследования выявили, что связь между величиной силового тока и фазой измерительной ЭДС отсутствует во всем диапазоне рабочих токов. В связи с чем, можно сделать вывод, что данный метод идентификации углового положения не накладывает ограничения на работу силовой цепи питания ВИМ, и позволяет контролировать угловое



положение ротора с достаточной точностью при любых режимах работы ВИМ (двигательном, генераторном, торможении на выбеге).

#### 4.2. Исследование бездатчикового ВИП.

После разработки и исследования метода бездатчиковой идентификации углового положения ротора ВИМ, была поставлена задача апробации и исследования совмещение в пределах ВИМ режима датчика угловых положений и двигателя.

Исследование бездатчикового управления ВИМ производились на компьютерной модели и макетном образце бездатчикового ВИП в номинальном режиме работы ВИМ, при номинальных токах, оборотах и нагрузке. Произведено исследование работы коммутатора, системы управления и ВИМ.

На рисунке 4.6. представлены диаграммы формирования силовых токов в обмотке, полученные на компьютерной модели, на рисунке 4.7 представлены осциллограммы формирования силовых токов, снятые на макетном образце.

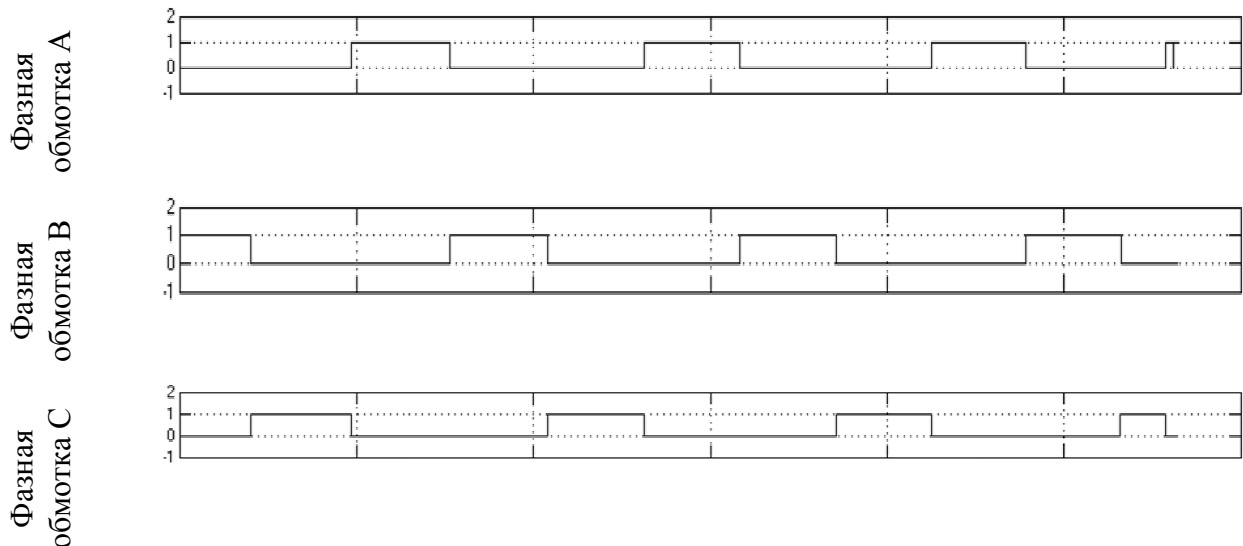
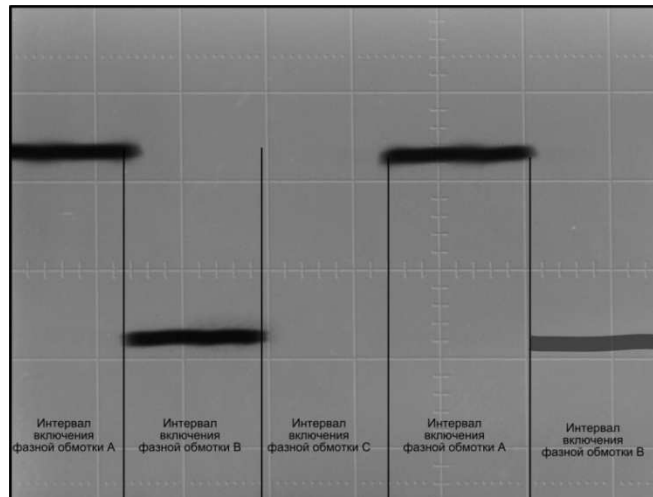


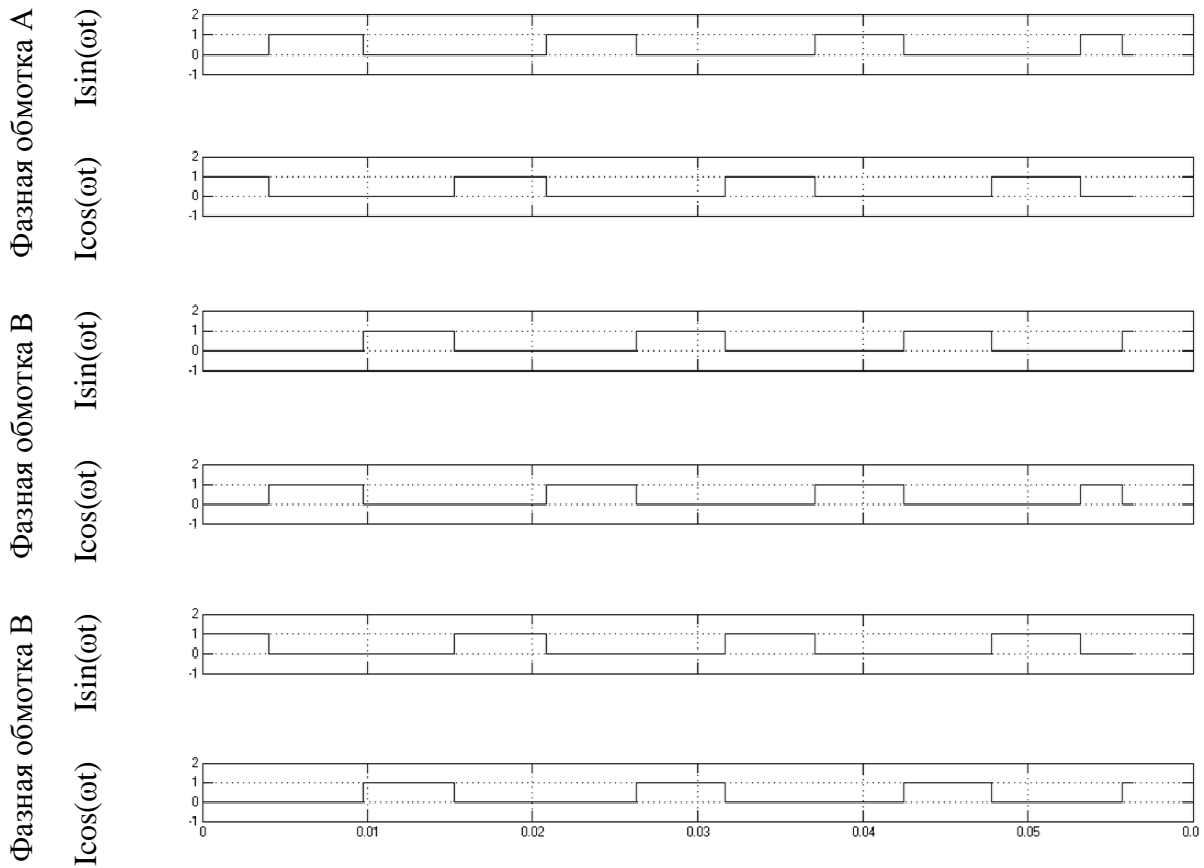
Рис. 4.6. Диаграмма формирования силовых токов в обмотках ВИМ.



**Рис.4.7.** Осциллограммы формирования силовых токов в обмотках ВИМ

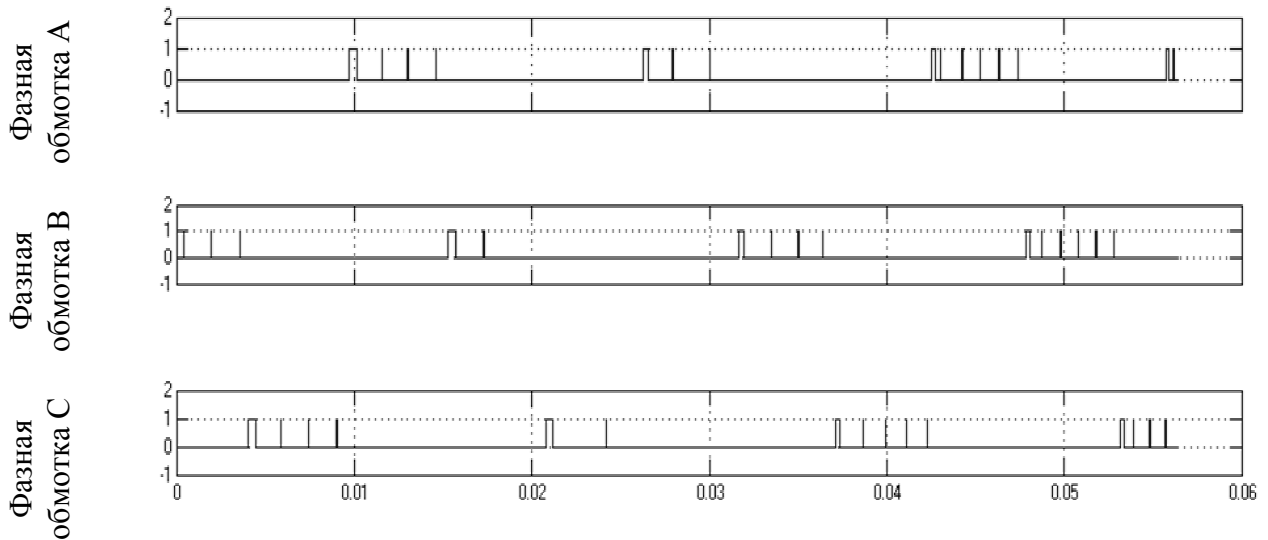
На рисунке 4.8. представлены диаграммы формирования измерительных токов.

Представленные диаграммы показывают соответствие предложенному варианту коммутации и коммутационным диаграммам алгоритмов управления, реализованных в компьютерной имитационной модели и на макетном образце бездатчикового ВИП, представленным в приложениях:  $1/3$  цикла коммутации фазная обмотка ВИМ задействована в формировании электромагнитного момента, через ее катушки протекают силовые токи;  $1/3$  цикла коммутации через катушки фазной обмотки протекает синусная составляющая квадратурного измерительного тока;  $1/3$  цикла коммутации через катушки фазной обмотки протекает косинусная составляющая квадратурного измерительного тока.



**Рис. 4.8.** Диаграмма формирования измерительных токов в обмотках ВИМ.

Так как, включением-отключением силовых ключей идет управление формированием силового тока, то в диаграммах управления силовыми ключами можно наблюдать ШИМ в рамках интервала включения силового ключа. При этом, ШИМ формируется только для нижних ключей, если отклонения тока от заданного составляет 4%, для верхних и нижних ключей, если силовой ток в фазной обмотке превышает на 20% заданный. Это позволяет исключить неконтролируемый рост тока в фазной обмотке и обеспечить рекуперацию энергии в сеть при переходе ВИМ в генераторный режим. Диаграммы формирования ШИМ представлены на рисунке 4.9.

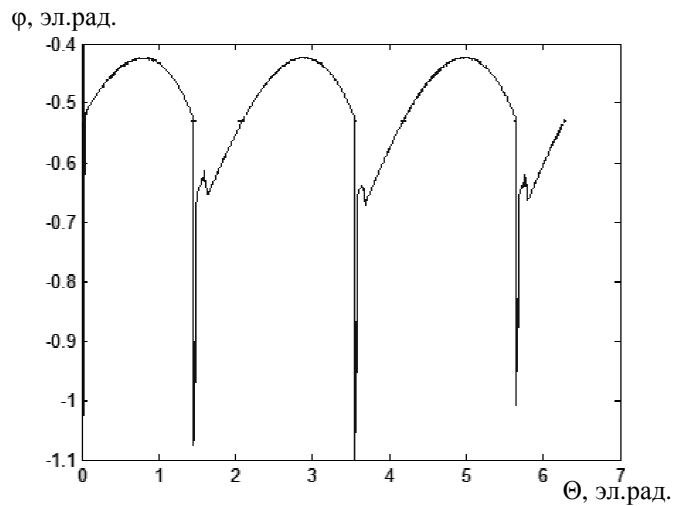


**Рис. 4.9.** Диаграммы формирования ШИМ управлением тока.

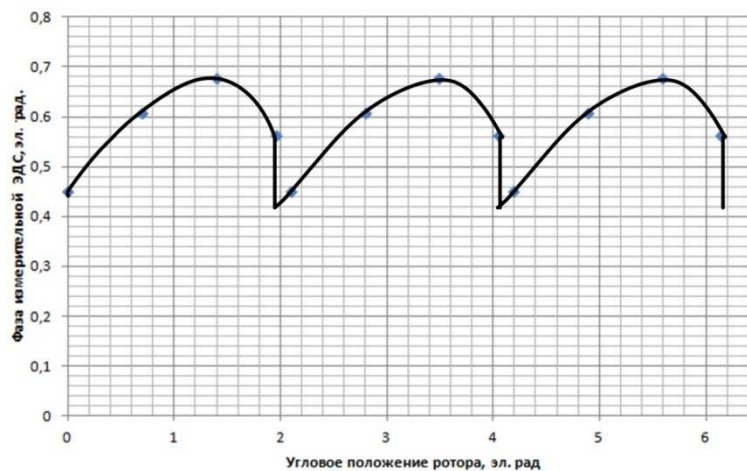
Одним из вариантов реализации бездатчиковой коммутации обмоток ВИМ является реализация согласно варианту, представленному на рисунке 2.9.б. В этом случае коммутацию обмоток необходимо проводить в моменты времени, когда  $M > 0$  и при фиксированном моменте  $M_A(\Theta) = M_B(\Theta)$  или  $M_B(\Theta) = M_C(\Theta)$ , или  $M_C(\Theta) = M_B(\Theta)$ . В этом случае пульсации момента будут минимальны. На рисунке 4.10. представлена зависимость фазы измерительной ЭДС от углового положения ротора полученная на компьютерной модели. При этом ротор изменяет свое угловое положение на  $2\pi$  эл.град. На данная характеристика имеет идентичный вид с характеристикой приведенной на рисунке 2.9.б. На характеристике после коммутации прослеживаются некоторые возмущения, которые связаны с переходными процессами, возникающими в результате переключения фазных обмоток. Данные возмущения обусловлены тем, что формирование силовых измерительных токов в одной из катушек начинается раньше затухания силовых токов.

На рисунке 4.11. показана зависимость фазы измерительной ЭДС от углового положения ротора при выполнении коммутации, полученная на макетном образце бездатчикового ВИП. Данная зависимость аналогична зависимости полученной на компьютерной модели, что показывает соответствие параметров компьютерной имитационной модели ВИМ и модели системы

управления параметрам реальной ВИМ. Исходя из чего, можно сделать вывод о реализуемости и возможности практического использования варианта коммутации обмоток ВИМ, представленного на рисунке 2.9.б., в зависимости от фазы измерительной ЭДС.



**Рис. 4.10.** Снятая с компьютерной модели зависимость фазы измерительной ЭДС от углового положения ротора при выполнении коммутации.

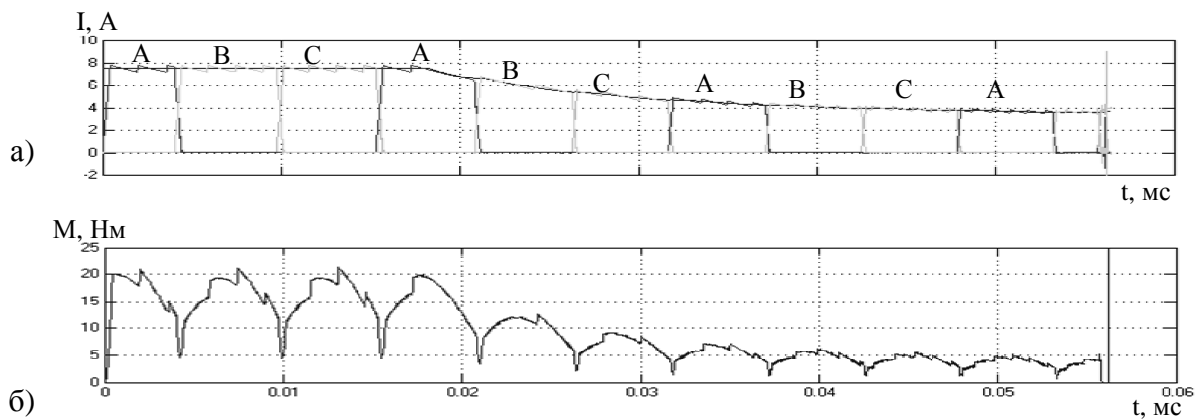


**Рис. 4.11.** Экспериментальная зависимость фазы измерительной ЭДС от углового положения ротора при выполнении коммутации обмоток ВИМ.

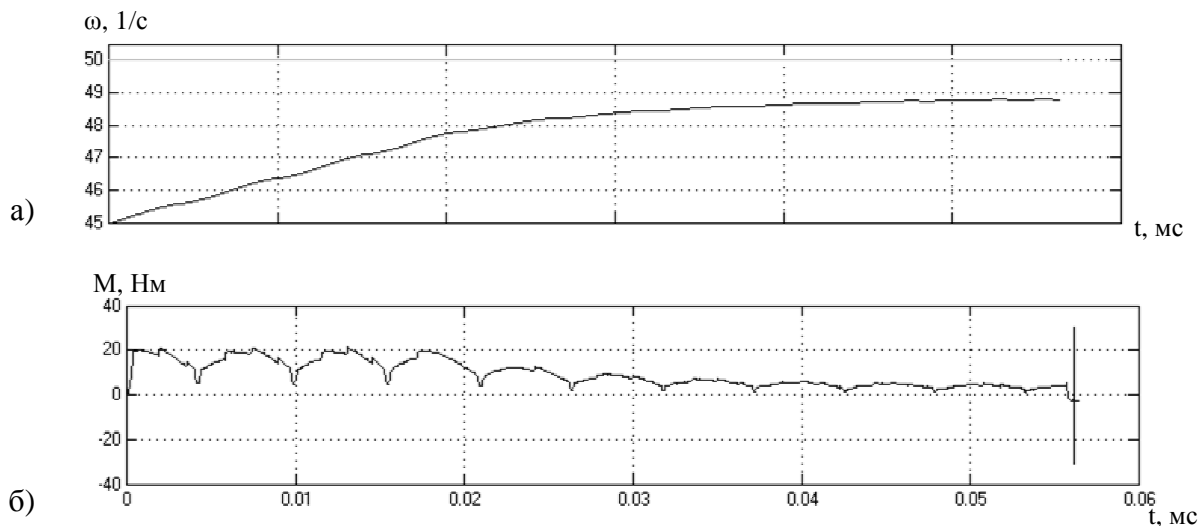
На рисунке 4.12. представлены мгновенные и заданные значения силовых токов в фазных обмотках ВИМ и мгновенное значение электромагнитного момента. Высокочастотные колебания момента обусловлены релейным регулированием силового тока в фазных обмотках ВИМ. Уменьшить пульсации момента можно уменьшением гистерезиса регулятора тока. В нашем случае

ошибка регулирования и, соответственно, гистерезис находятся в 4% зоне от заданного тока, при уменьшении гистерезиса увеличивается частота в ШИМ тока, уменьшается ошибка регулирования тока, уменьшаются высокочастотные пульсации электромагнитного момента ВИМ.

Низкочастотные колебания электромагнитного момента обусловлены конструкцией ВИМ. Данные пульсации определяются способом коммутации обмоток ВИМ, углами включения/отключения обмоток.



**Рис. 4.12.** Мгновенные значения силовых токов (а) в фазных обмотках ВИМ и электромагнитного момента (б).

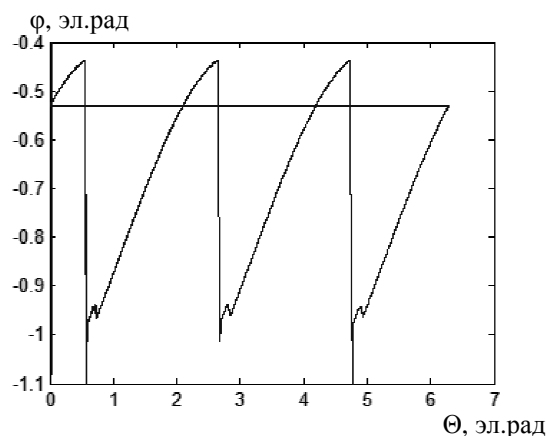


**Рис. 4.13.** Мгновенное значение скорости (а) и электромагнитного момента (б) ВИМ.

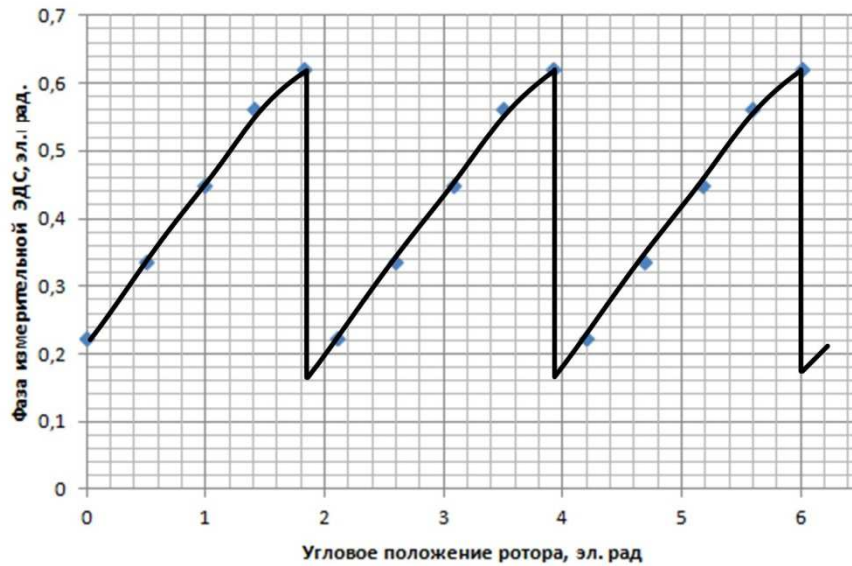
В варианте коммутации, представленном на рисунке 2.9.а, коммутация происходит при вхождении значения фазы измерительной ЭДС в 5% зону экстремума. На рисунке 4.14. представлена снятая на компьютерной модели

зависимость фазы измерительной ЭДС от углового положения ротора, при выполнении коммутации. При этом ротор изменяет свое угловое положение на  $2\pi$  эл.град. На данная характеристика имеет идентичный вид с характеристикой приведенной на рисунке 2.9.а. На характеристике после коммутации прослеживаются некоторые возмущения, которые связаны с переходными процессами, возникающими в результате переключения фазных обмоток. Данные возмущения обусловлены тем, что формирование силовых измерительных токов в одной из катушек начинается раньше затухания силовых токов.

На рисунке 4.15. показана зависимость фазы измерительной ЭДС от углового положения ротора при выполнении коммутации, полученная на макетном образце бездатчикового ВИП. Данная зависимость аналогична зависимости полученной на компьютерной модели, что показывает соответствие параметров компьютерной имитационной модели ВИМ и модели системы управления параметрам реальной ВИМ. Исходя из чего, можно сделать вывод о реализуемости и возможности практического использования варианта коммутации обмоток ВИМ, представленного на рисунке 2.9.б., в зависимости от фазы измерительной ЭДС

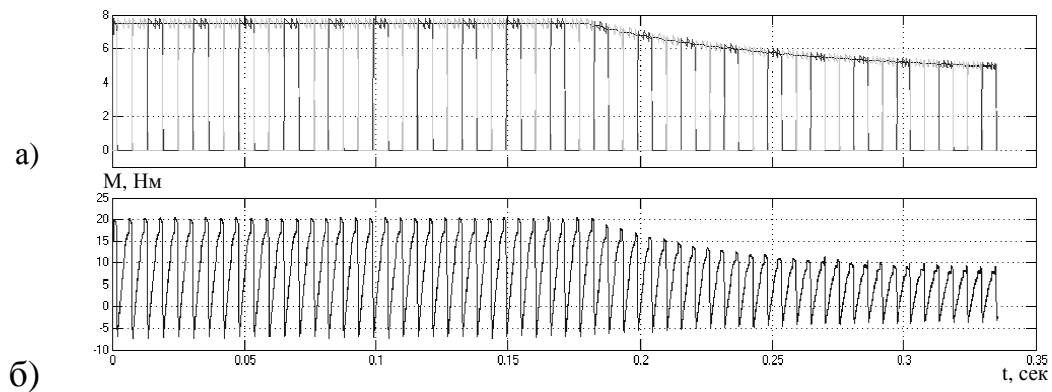


**Рис. 4.14.** Снятая с компьютерной модели зависимость фазы измерительной ЭДС от углового положения ротора при выполнении коммутации.



**Рис. 4.15.** Экспериментальная зависимость фазы измерительной ЭДС от углового положения ротора при выполнении коммутации обмоток ВИМ.

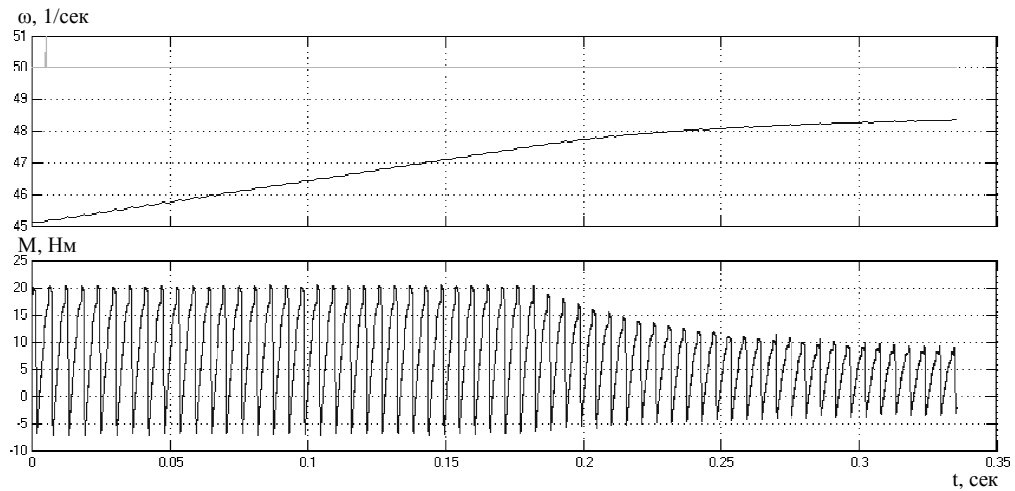
На рисунке 4.16 представлены мгновенные и заданные значения силовых токов в фазных обмотках ВИМ и мгновенное значение электромагнитного момента. Высокочастотные колебания момента обусловлены релейным регулированием силового тока в фазных обмотках ВИМ. Уменьшить пульсации момента можно уменьшением гистерезиса регулятора тока. В нашем случае ошибка регулирования и, соответственно, гистерезис находятся в 4% зоне от заданного тока, при уменьшении гистерезиса увеличивается частота в ШИМ тока, уменьшается ошибка регулирования тока, уменьшаются высокочастотные пульсации электромагнитного момента ВИМ.



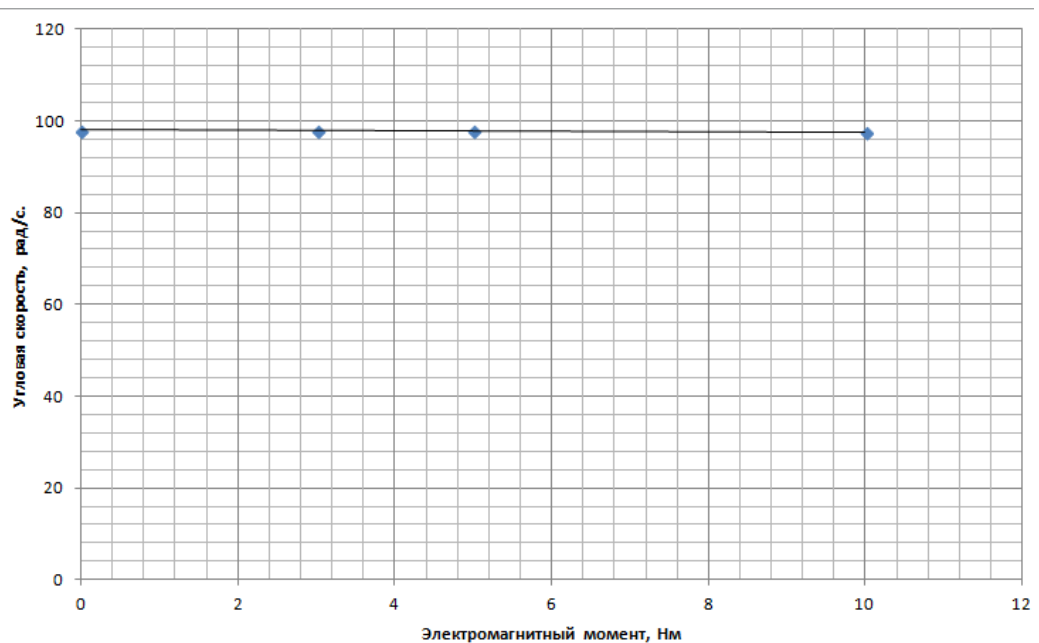
**Рис. 4.16.** Мгновенные значения силовых токов в фазных обмотках ВИМ (а) и электромагнитного момента (б).



Низкочастотные колебания электромагнитного момента обусловлены конструкцией ВИМ. Данные пульсации определяются способом коммутации обмоток ВИМ, углами включения/отключения обмоток.



**Рис. 4.17.** Мгновенное значение скорости и электромагнитного момента ВИМ.



**Рис.4.18.** Механическая характеристика ВИМ с бездатчиковым управлением.

На рисунке 4.18 представлена механическая характеристика ВИМ с бездатчиковым управлением, где реализована отрицательная обратная связь по скорости.

Исследования, проведенные на макетном образце бездатчикового ВИП и компьютерной модели, подтвердили как адекватность модели, так и ее полное соответствие реальному ВИП. Исследования показали работоспособность предлагаемого метода бездатчиковой идентификации углового положения ротора ВИМ в различных режимах работы машины и силовых цепей питания..

#### **Выводы по главе 4:**

В главе 4 произведены результаты исследований метода бездатчикового управления ВИМ, проведенных на разработанной в пакете Matlab компьютерной имитационной модели и на макетном образце бездатчикового ВИП. Результаты исследования показали работоспособность предложенного во 2 главе метода идентификации углового положения ротора ВИМ и возможность его практического применения. Проверены и проанализированы предложенные в главе 2 варианты бездатчиковой коммутации обмоток ВИМ в зависимости от фазы измерительной ЭДС. Проверена работа метода бездатчикового ВИП в замкнутой системе со стабилизацией скорости ВИМ.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе дано новое решение актуальной задачи, а именно, разработан и исследован и исследован ВИП с бездатчиковым управлением ВИМ.

В работе получены следующие результаты:

1. Предложен метод идентификации углового положения ротора ВИМ, основанного на изменении магнитных проводимостей полюсов в зависимости от углового положения ротора ВИМ. Где для идентификации углового положения ротора в магнитной системе ВИМ дополнительно формируются измерительные потоки, связанные квадратурными соотношениями, и измеряют фазу ЭДС, наведенную суммарным потоком. По фазе ЭДС определяют текущее угловое положение ротора ВИМ.

2. Предложены варианты бездатчиковой коммутации обмоток ВИМ в зависимости от фазы измерительной ЭДС, отличающиеся различным уровнем пульсации электромагнитного момента ВИМ.

3. В среде Matlab\simulink разработана математическая модель бездатчикового ВИП.

4. Разработана функциональная и принципиальная схемы системы бездатчикового управления ВИМ. На основе схемы реализован макетный образец бездатчикового ВИП, предназначенный для исследования метода бездатчиковой идентификации углового положения ротора ВИМ и режимов работы машины.

5. Реализована микропроцессорная система управления бездатчиковым ВИП, разработано программное обеспечение, выполняющее идентификацию углового положения ротора ВИМ и производящее управления ВИП.

6. На макетном образце бездатчикового ВИП и компьютерной имитационной модели произведено исследование разработанного метода идентификации углового положения ротора ВИМ и бездатчикового управления ВИМ.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Алямкин Д.И. Алгоритмы бездатчикового управления двухфазным вентильно-индукторным двигателем // Электричество – М.: ЗАО «Знак», 2011. – №8. С. 49 – 56.
2. Алямкин Д.И. Разработка и исследование двухфазного вентильно-индукторного электропривода насосов горячего водоснабжения : диссертация ... кандидата технических наук : 05.09.03
3. Аракелян А. К., Глухенький Т. Г. Определение положения ротора в высокоскоростных бездатчиковых вентильно-индукторных электроприводах. – Электричество, 2003, №4, с. 27 – 30.
4. Афанасьев А. А. Линейные преобразования переменных в теории вентильно-индукторного двигателя. – Электромеханика. Известия высших учебных заведений, 1998, №1.
5. Афанасьев А.А. и др. Вентильный двигатель для погружных насосов нефтяных скважин. – Электричество, 1998, №8.
6. Бут Д.А. Модификации вентильно-индукторных двигателей и особенности их расчетных моделей. – Электричество, 2000, №7.
7. Бычков М. Г. Анализ вентильно-индукторного электропривода с учётом локального насыщения магнитной системы. – Электричество, 1998, №6, с. 50 – 53.
8. Бычков М. Г., Дроздов П. А., Кисельникова А. В. Экспериментальное исследование особенностей управления вентильно-индукторным электродвигателем. – Вестник МЭИ, 2001, №2.
9. Бычков М.Г. Способ управления вентильно-индукторным электроприводом и устройство для его осуществления. Патент на изобретение №2182743
10. Бычков М.Г. Кузнецова В.Н. Фукалов Р.В. Вентильно-индукторный электропривод. Патент на изобретение №2265950

11. Бычков М.Г. Элементы теории вентильно-индукторного электропривода. – Электричество, 1997, №8.
12. Бычков М.Г., Фукалов Р.В. Универсальная модульная микропроцессорная система управления вентильно-индукторным двигателем. Электричество, 2004, №8, с. 23 – 31.
13. Волович Г. И Схемотехника аналоговых и аналого-цифровых электронных устройств. – М.: Издательский дом «Додэка-XXI», 2005. – 528 с.
14. Глухенький Т.Г. Разработка и исследование бездатчиковых систем управления вентильно-индукторными электродвигателями : диссертация ... кандидата технических наук : 05.09.03
15. Голландцев Ю.А. Вентильные индукторно-реактивные двигатели. СПб.: ГНЦ РФ – ЦНИИ «Электроприбор», 2003 – 148 с.
16. Джонсон Д. и др. Справочник по активным фильтрам. Пер с англ./ Д.Джонсон, Дж.Джонсон, Г. Мур. – М.: Энергоатомиздат. 1983.- 128 с. с ил.
17. Дискретный электропривод с шаговыми электродвигателями, Под общ. Ред. М. Г. Чиликина. – М.: Энергия, 1971, 624 с., ил.
18. Долмачев В.Г. Схемотехника цифровых преобразователей перемещения: Справочное пособие / В.Г. Долмачев, В.Р. Матвеевский, Ю.С. Смирнов. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 368с.
19. Дьяконов В. П. MATLAB 6/6.1/6.5 + Simulink 4/5 в математике и моделировании. Полное руководство пользователя. – М.: СОЛОН – Пресс. – 2003. – 576 с.
20. Дьяконов В.П. MATLAB 6/6.1/6.5 + SIMULINK 4/5 в математике и моделировании. М.: СОЛОН – Пресс. – 2003. – 576 с.
21. Дьяконов В.П. MATLAB. Обработка сигналов и изображений. Специальный справочник. – СПб.: Питер, 2002. – 608 с
22. Зиновьев Г. С. Основы силовой электроники: Учебное пособие. – Изд. 3-е. – Новосибирск: Издательство НГТУ, 2004. – 672 с.

23. Иванов-Смоленский А. В. Электромагнитные силы и преобразование энергии в электрических машинах: Учеб. Пособие для вузов по спец. “Электромеханика”. – М.: Высш. шк., 1989. – 312 с.: ил.
24. Ильинский Н.Ф. Перспективы применения вентильно-индукторного электропривода в современных технологиях. – Электротехника, 1997, № 2.
25. Ильинский Н.Ф. Перспективы развития регулируемого электропривода. – Электричество, 2003, №2.
26. Ильинский. Н.Ф. Элементы теории эксперимента – М.: МЭИ, 1988. 3-е изд. – 100 с.
27. Каталог продукции INTERNATIONAL RECTIFIER – М.: ИП РадиоСофт, 2001. – 352 с.: ил.
28. Кенио Т. Шаговые двигатели и их микропроцессорные системы управления: Пер с англ.-М.: Энергоатомиздат, 1987.-200 с.
29. Ключев В.И. Теория электропривода: Учеб. для вузов.- 2-е изд. пер. и доп.- М.: Энергоатомиздат, 1998
30. Ключев В.И., Терехов В.М. Электропривод и автоматизация общепромышленных механизмов: Учеб. для вузов. - М.: Энергия, 1980.
31. Козаченко В.Ф., Анучин А.С., Обухов Н.А. Высокопроизводительный контроллер для управления двигателями на базе TMS320F241 для массовых применений. – Компоненты и технологии, 2000, №8.
32. Козаченко В.Ф., Ремизевич Т.В. Микроконтроллеры для встраиваемых систем управления электроприводом / Обзор спектра элементной базы. Восьмиразрядные «Motorola Control». – Электронные компоненты, 2002, №7.
33. Козаченко В.Ф., Темиров А.П., Обухов А.Н., Анучин А.С. и др. Контроллеры МК11.3 для высокопроизводительных систем прямого цифрового управления двигателями. – Инженерная микроэлектроника. CHIP NEWS, 2002, №4 (67).

34. Красовский А. Б. Применение имитационного моделирования для исследования вентильно-индукторного электропривода. *Электричество*, 2003, №3, с. 35 – 44.
35. Кузнецов В. А., Матвеев А. В. Дискретная математическая модель вентильно-индукторного двигателя. – *Электричество*, 2000, №8, с. 22 – 27.
36. Кузнецов В. А., Садовский Л. А., Виноградов В. Л. Особенности расчёта индукторных двигателей для вентильного электропривода. – *Электротехника*, 1998, №6, с. 35 – 43.
37. Кузнецов В.А., Кузьмичёв В.А. Вентильно-индукторные двигатели. М.: Издательство МЭИ. 2003. – 68 с.
38. Овчинников И.Е. Вентильные электрические двигатели и привод на их основе (Малая и средняя мощность): Курс лекций. – СПб.: КОРОНА-Век 2007-336 с.
39. Остриров В. Н., Уткин С. Ю. Силовой преобразователь для вентильно-индукторного электропривода массового применения. – *Вестник МЭИ*, 2000, №5, с. 8 – 13.
40. ПАТЕНТ - 2182743 РФ, МПК 6 H02P6/18, H02K29/06. Способ управления вентильно-индукторным электроприводом и устройство для его осуществления/ М.Г. Бычков; науч. Московский энергетический институт (технический университет).- N 2182743; заяв. 27.09.2000; опубл. 20.05.2002,
41. ПАТЕНТ - 26550 РФ, МПК 6 H02P6/18, H02K29/06. Вентильно-индукторный электропривод/ М.Г. Бычков, В.Н. Кузнецов, Р.В. Фукалов; науч. Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования Московский Энергетический институт (технический университет) (ГОУВПО "МЭИ (ТУ)") (RU).- N 2003116290; заяв. 03.06.2003; опубл. 27.11.2014.
42. Полющенко И.С. Разработка бездатчикового вентильно-индукторного электропривода с искусственной нейронной сетью : дис. ... кандидата технических наук : 05.09.03

43. Полющенко И.С., Льготчиков В.В. Бездатчиковый вентильно-индукторный электропривод с элементами искусственного интеллекта // Электричество – М.: ЗАО «Знак», – 2012. - №2. – с. 25 – 32.

44. Ремизевич Т.В. Микроконтроллеры для встраиваемых приложений: от общих подходов – к семействам HC05 и HC08 фирмы Motorola / Под ред. И.С. Кирюхина. – М.: ДОДЭКА, 2000.

45. Розанов Ю.К. Силовая электроника: учебник для вузов / Ю.К. Розанов, М.В.Рябчицкий, А.А. Кваснюк. – М.: Издательский дом МЭИ, 2007. – 632 с.: ил.

46. Садовский Л.А., Виноградов В.Л. Электродвигатели с переменным магнитным сопротивлением для современного регулируемого электропривода // Электротехника. 2000. №2. С. 54 – 59.

47. Семенчук В.А. Разработка высокоэффективных микроконтроллерных модульных систем управления вентильно-индукторными двигателями и базового комплекта программного обеспечения: Автореферат диссертации на соискание учёной степени кандидата технических наук. – Москва, МЭИ, 1998.

48. Семенчук В.А. Технико-экономические аспекты создания контроллеров для вентильно-индукторного электропривода на основе процессора Intel 8xС196МН. – Электричество, 2000, №5.

49. Сиротин А.А. Автоматизированное управление электроприводами, М., «Энергия», 1969, изд. 2-е, перераб. и дополнен. 560 с. с ил.

50. Терехов В. М. Системы управления электроприводов: учебник для студ. высш. учеб. заведений. Под ред. В.М.Терехова. — 2-е изд., стер. — М.: Издательский центр «Академия», 2006 - 304 с.

51. Тетельбаум И.М. Шнейдер Ю.Р. Практика аналогового моделирования динамических систем: Справочное пособие – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 384 с.

52. Титце У., Шенк К. Полупроводниковая схемотехника: Справочное руководство. Пер. с нем. – М.: Мир, 1982 – 512с. с ил.



53. Усынин Ю. С. Системы управления электроприводов: Учебное пособие для вузов. – 2-е издание. – Челябинск: Издательство ЮУрГУ, 2004. – 328 с.
54. Фулкаков. Р.В. Варианты реализации микропроцессорной ситемы бездатчикового управления вентильно-индукторным электроприводом. Вестник МЭИ, 2005, №1, с. 50 – 55.
55. Фулкаков. Р.В. Разработка универсальной модульной бездатчиковой системы управления вентильно-индукторного электропривода : диссертация ... кандидата технических наук : 05.09.03
56. Хрущев В.В. Электрические микромашины автоматических устройств. Учебное пособие. Л., «Энергия», 1976. 384 с. с ил.
57. Джонсон Д. и др. Справочник по активным фильтрам. Пер с англ./ Д.Джонсон, Дж.Джонсон, Г. Мур. – М.: Энергоатомиздат. 1983.- 128 с. с ил.
58. Arefeen M.S., DiRenco M., Bierke S. DSP for Switched Reluctance Drives. – PCIM Europe, 1998, No. 5.
59. Arumugam, R., D.A. Lowther, R. Krishnan, and J.F. Lindsay, Magnetic field ananlysis of a switched reluctance motor using a two-dimensional finite element model, *IEEE Trans. on Magnetics*, Vol. MAG-21, No. 5, 1883–1885, 1985.
60. Arumugam, R., Design and Finite Element Analysis of Switched Reluctance Motors, Ph.D. thesis, Concordia University, Montreal, Canada, December 1987.
61. Bae, H.K. and R. Krishnan, A novel approach to control of switched reluctance motors considering mutual inductance, *IEEE Ind. Electronics Conf.*, Oct. 2000, Nagoya, Japan, pp. 369–374.
62. Bae, H.K., Control of Switched Reluctance Motors Considering Mutual Inductance, Ph.D. thesis, The Bradley Department of Electrical and Computer Engineering, Virginia Tech., Blacksburg, VA, August 2000.
63. Bellini, A., F. Filippetti, G. Franceschini, C. Tassoni, and P. Vas. Position sensorless control of a SRM drive using ANN-techniques, *Conf. Rec. IEEE Ind. Appl. Soc.*, Oct., 709–714, 1998.

64. Bose, Bimal K. *Modern Power Electronics and AC Drivers*. Prentice Hall PTR, 2002. – 738 p.
65. Buja, G.S., R. Menis, and M.I. Valle, Variable structure control of an SRM drive, *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, 40(1), 56–63, 1993.
66. Corda, J. and M. Wilkinson, Prediction and measurement of magnetic parameters of cylindrical linear switched reluctance actuator, in *Proc. of Int. Conf. on Electrical Machines*, Vol. 3, Sept. 1994, Paris, France, pp. 479–484.
67. Deshpande, U.S., J.J. Cathey, and E. Richter, A high force density linear switched reluctance machine, in *Conf. Rec. of the 1993 IEEE IAS Ann. Mtg.*, Vol. 1, Oct. 1993, Toronto, Canada, pp. 251–257.
68. Egan, M.G., M.B. Harrington, and J.M.D. Murphy, PWM-based position sensorless control of variable reluctance motor drives, *Proc. Eur. Power Electronics Conf.*, 4, 24 – 29, 1991.
69. Ehsani, M., I. Husain, Rotor position sensing in switched reluctance motor drives by measuring mutually induced voltages, *Conf. Rec. IEEE Ind. Appl. Soc.*, Oct., 422–429, 1992.
70. Elmas, C. and H. Zelaya-De La Parra. Application of a full-order extended Luenberger observer for a position sensorless operation of switched reluctance motor drive, *IEEE Proc. On Control Theory Appl.*, 143(5), 401–408, 1996.
71. Esatham, A.R., H. Yuan, G.E. Dawson, P.C. Choudhury, and P.M. Cusack, A finite element evaluation of pole shaping in switched reluctance motors, *Electrosoft*, 1(1), 55–67, 1990.
72. Gallegos-Lopez, G., P.C. Kjaer, and T.J.E. Miller, A new sensorless method for switched reluctance motor drives, *IEEE Trans. On Ind. Appl.*, 34(4), 832–840, 1998.
73. Husain, I. and M. Ehsani, Torque ripple minimization in switched reluctance motor drives by PWM control, *IEEE Trans. on Power Electronics*, Vol. 11, No. 1, 1996, pp. 83–88.

74. Ilic-Spong, M., T.J.E. Miller, S.R. MacMinn, and J.S. Thorp, Instantaneous torque control of electric motor drives, *IEEE Trans. on Power Electronics*, 2(1), 55–61, 1987.
75. Jackson, T.W., Design and development of a low-cost controller for SRM drive, M.S. Thesis, The Bradley Department of Electrical and Computer Engineering, Virginia Tech., Blacksburg, VA, July 1996.
76. John, G. and A.R. Eastham, Speed control of SRM using slide mode control strategy, *Conf. Rec. IEEE IAS Ann. Mtg.*, Oct. 1995, pp. 263–270.
77. Kim, C.H. and I.J. Ha, A new approach to feedback-linearizing control of variable reluctance motors for direct-drive applications, *IEEE Trans. on Control Syst. Technol.*, 4(4), 348–362, 1996.
78. Kohonen, Teuvo. Self-organization maps – 3. ed. – Berlin: Springer, 2001. – 500 p.
79. Krishnan, R., *Electric Motor Drives*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 2001.
80. Krishnan, R., M. Abou-Zeid, and X. Mang, A design procedure for axial field switched reluctance motors, in *IEEE Ind. Appl. Soc. Ann. Mtg. Conf. Rec.*, Oct. 1990, Seattle, WA, pp. 241–246.
81. Krishnan, R., X. Mang, and A.S. Bharadwaj, A low-cost SRM analog controller, *Electronic Motortechinics*, Feb/March 1990, pp. 19–23.
82. Laurent, P., M. Gabsi, and B. Multon, Sensorless rotor position analysis using resonant method for switched reluctance motor, *Conf. Rec. IEEE Ind. Appl. Soc.*, Oct., 687–694, 1993.
83. Lee, B.-S., H.-K. Bae, P. Vijayraghavan, and R. Krishnan, Design of a linear switched reluctance machine, in *IEEE Ind. Appl. Soc. Conf. (IAS '99)*, Vol. 4, Oct. 3–7, 1999, Phoenix, AZ, pp. 2267–2274.
84. Lee, B.S., Linear Switched Reluctance Machine Drives with Electromagnetic Levitation and Guidance Systems, Ph.D. thesis, The Bradley Department of Electrical and Computer Engineering, Virginia Tech., Blacksburg, VA, Nov. 2000.

85. Le-Huy H., Viarouge Ph. A Novel Unipolar Converter for Switched Reluctance Motor // *IEEE transactions on power electronics*. October 1990. Vol. 5. №4.
86. Lindsay, J.F., R. Arumugam, and R. Krishnan, Finite element analysis characterization of a switched reluctance motor with multi-tooth per stator pole, *IEE Proc. B*, 133(6), 347–353, 1986.
87. Low T., Lin H., Chen S. An Approach to Design and Simulation of Fraction-Horse Power SRD. – Proc. ICEM – 94, D7 Machines, 4.
88. Lumsdaine, A. and J.H. Lang. State observers for variable-reluctance motors, *IEEE Trans. On Industrial Electronics*, 37(2), 133–142, 1990.
89. Materu, P. and R. Krishnan, Analytical prediction of SRM inductance profile and steady state average torque, in *IEEE Ind. Appl. Soc. Ann. Mtg. Conf. Rec.*, Oct. 1990, Seattle, WA, pp. 214–223.
90. Mese, E. And D.A. Torrey. Sensorless position estimation for variable-reluctance machines using artificial neural networks, *Conf. Rec. IEEE Ind. Appl. Soc.*, Oct., 540–547, 1997.
91. PIC12F6XX. Однокристалльные 8-разрядные FLASH CMOS микроконтроллеры компании Microchip Technology Incorporated. Перевод технической документации DS41190C
92. PIC18F2221/2321/4221/4321 Family Data Sheet Enhanced Flash Microcontrollers with
93. PIC18FXX2. Однокристалльные 8-разрядные FLASH CMOS микроконтроллеры с 10-разрядным АЦП компании Microchip Technology Incorporated. Перевод технической документации DS39564C.
94. Pillay, P., Y. Liu, W. Cai, and T. Sebastian, Multiphase operation of switched reluctance motor drives, *IEEE Ind. Appl. Soc. Ann. Mtg. Conf. Rec.*, 1997, pp. 310–317.
95. R. Krishnan. Switched reluctance motor drives: modeling, simulation, analysis, design and applications. The Bradley Department of Electrical and Computer

Engineering Fellow, Center for Organizational and Technological Advancement (COTA) Virginia Tech, Blacksburg. – 2001.

96. Radun, A., Analytical calculation of the switched reluctance motor's unaligned inductance, *IEEE Trans. on Magnetics*, 35(6), 4473–4481, 1999.

97. Rim, Guen-hie., Variable speed constant frequency power conversion with permanent magnet synchronous and switched reluctance generators, Ph.D. Thesis, The Bradley Department of Electrical and Computer Engineering, Virginia Tech., Blacksburg, VA, February 1992.

98. Roters, H.C., *Electromagnetic Devices*, Wiley, New York, 1941.

99. Schramm, D.S., B.W. Williams, and T.C. Green, Torque ripple reduction of switched reluctance motors by phase current optimal profiling, *IEEE Power Electronics Specialist Conf.*, 1992, pp. 857–860.

100. Stefenson J., El. Khazendar M. Saturation in doubly salient R.M. – *IEEE Proc.*, 1989. Vol. 136, № 1.

101. Stephenson, J.M. and J. Corda, Computation of torque and current in doubly salient reluctance motors from nonlinear magnetization data, *IEEE Proc.*, 127(5), 393–396, 1979.

102. Visinka R. Бездатчиковое управление вентильно-индукторным двигателем с использованием устройства DSP6F80x фирмы Motorola. – *Привод и управление*, 2001, №6.

103. Wallace, R.S. and D.G. Taylor, A balanced commutator for switched reluctance motors to reduce torque ripple, *IEEE Trans. on Power Electronics*, 7(4), 617–626, 1992.

104. AN957. Sensored BLDC Motor Control Using dsPIC30F2010 (Бездатчиковое управление безколлекторным двигателем постоянного при помощи контроллера dsPIC30F2010): [электронный ресурс]. – URL: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/BLDC%20MC%2000957a.pdf> (дата обращения 02.04.2015)

105. AN970. Using the PIC18F2431 for Sensorless BLDC Motor Control (Бездатчиковое управление безколлекторным двигателем постоянного

при помощи контроллера PIC18F2431): [электронный ресурс].– URL: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/00970A.pdf> ( дата обращения 02.04.2015)

106. AN1160. Sensorless BLDC Control with Back-EMF Filtering Using a Majority Function (Бездатчиковое управление безколлекторным двигателем постоянного с противо-ЭДС с использованием мажоритарных функций): [электронный ресурс]. –URL: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/01160b.pdf> (дата обращения 02.04.2015)

107. Microchip.com

108. Microchip.ru

109. Triton.ru

110. www.platan.ru

111. **Митрофаненков Ю.Н., Малиновский А.Е. Способ определения углового положения ротора вентильно-индукторной машины. «Вестник МЭИ» - 2014 №2 – с. 46-50.**

112. **Митрофаненков Ю.Н., Малиновский А.Е. Идентификация углового положения ротора вентильно-индукторной машины. «Научное обозрение»- 2014 №3. – с. 117-123.**

113. **Митрофаненков Ю.Н., Малиновский А.Е. Варианты бездатчиковой коммутации обмоток вентильно-индукторной машины. «Транспортное дело России» - 2014 №1.–с.81-83**

114. Митрофаненков Ю.Н. Бездатчиковый вентильно-индукторный электропривод. «ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ, ЭНЕРГЕТИКА И ЭКОНОМИКА» Сб. трудов 7-ой Межрег. (межд.) науч.-техн. конф. студентов и аспирантов. В 3 т. Т1. – 2010.- с. 50-53.

115. Митрофаненков Ю.Н. Определение углового положения ротора двигателя в бездатчиковом вентильно-индукторном электроприводе. «Автоматизированный электропривод и промышленная электроника» Труды Четвертой Всероссийской научно-практической конференции / Под общей редакцией В.Ю. Островляничка. – Новокузнецк изд-во СибГИУ, 2010 г.- с.250-256.

116. Митрофаненков Ю.Н. Бездатчиковый вентильно-индукторный электропривод. «РАДИОЭЛЕКТРОНИКА, ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭНЕРГЕТИКА» семнадцатая научно-техническая конференция студентов и аспирантов: тез. докл. М: Издательский дом МЭИ, 2011. с. 159-160.

117. Митрофаненков Ю.Н. Бездатчиковый вентильно-индукторный электропривод «Сборник материалов областного конкурса студенческих научных работ». – Смоленск: ВА ВПВО ВС РФ издательство «Смоленская городская типография», 2011. с. 194-200.

118. Малиновский А.Е., Митрофаненков Ю.Н. Бездатчиковый вентильно-индукторный электропривод. «ЭНЕРГЕТИКА, ИНФОРМАТИКА, ИННОВАЦИИ-2011» – ЭИИ-2011: сб. трудов Международной науч.-техн. конф. В 2 т. Т. 1. Секции 1,2,6. Смоленск: РИО филиала ГОУВПО МЭИ (ТУ) в г. Смоленске, 2011. с.44-47.

119. Митрофаненков Ю.Н. Исследование информационной системы бездатчикового вентильно-индукторного электропривода. «ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ, ЭНЕРГТИКА И ЭКОНОМИКА» Сб. трудов 9-ой Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов В 3 т. Т2.-2012. - с. 66-70.

120. Митрофаненков Ю.Н., Малиновский А.Е. Коммутатор для бездатчикового вентильно-индукторного электропривода. «ЭНЕРГЕТИКА, ИНФОРМАТИКА, ИННОВАЦИИ-2012» – ЭИИ-2012: сб. трудов Международной науч.-техн. конф. В 2 т. Т. 1. Секции 1,2,3,4. Смоленск: филиал МЭИ в г. Смоленске, 2012. - стр.115-118.

121. Митрофаненков Ю.Н. Способ определения углового положения ротора вентильно-индукторной машины. «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика». Девятнадцатая международная научнотехническая конференция студентов и аспирантов : Тез. докл. В 4 т. Т. 2. М.: Издательский дом МЭИ, 2013 - с. 266.

122. Митрофаненков Ю.Н., Исаев Д.С. Микропроцессорная система управления бездатчиковым вентильно-индукторным электроприводом.

«Информационные технологии, энергетика и экономика». Сборник трудов 10-й международной научно технической конференции студентов и аспирантов Т 1. – «Универсум», Смоленск. 2013. - с.51 -54.

123. Митрофаненков Ю.Н., Исаев Д.С. Микропроцессорная система управления бездатчиковым вентильно-индукторным электроприводом. «ВЕСТНИК Российского национального комитета СИГРЭ». Специальный выпуск № 1. Материалы Молодежной секции РНК СИГРЭ: сборник конкурсных докладов по электроэнергетической и электротехнической тематикам по направлениям исследований СИГРЭ «Энергия-2013». – Иваново: ФГБОУ ВПО Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина, 2013. - стр. 423-427.

124. Митрофаненков Ю.Н. Бездатчиковое управление вентильно-индукторной машиной. «Материалы областного конкурса молодых ученых 2013 года» - Смоленск: ОГБУ СПО СПЭК, 2013. – с.223-228.

125. Исаев Д.С., Митрофаненков Ю.Н. Бездатчиковое определение углового положения ротора вентильно-индукторной машины. «Информационные технологии, энергетика и экономика». Сборник трудов 11-й международной научно технической конференции студентов и аспирантов Т 1. – «Универсум», Смоленск. 2014. - с.45-49.

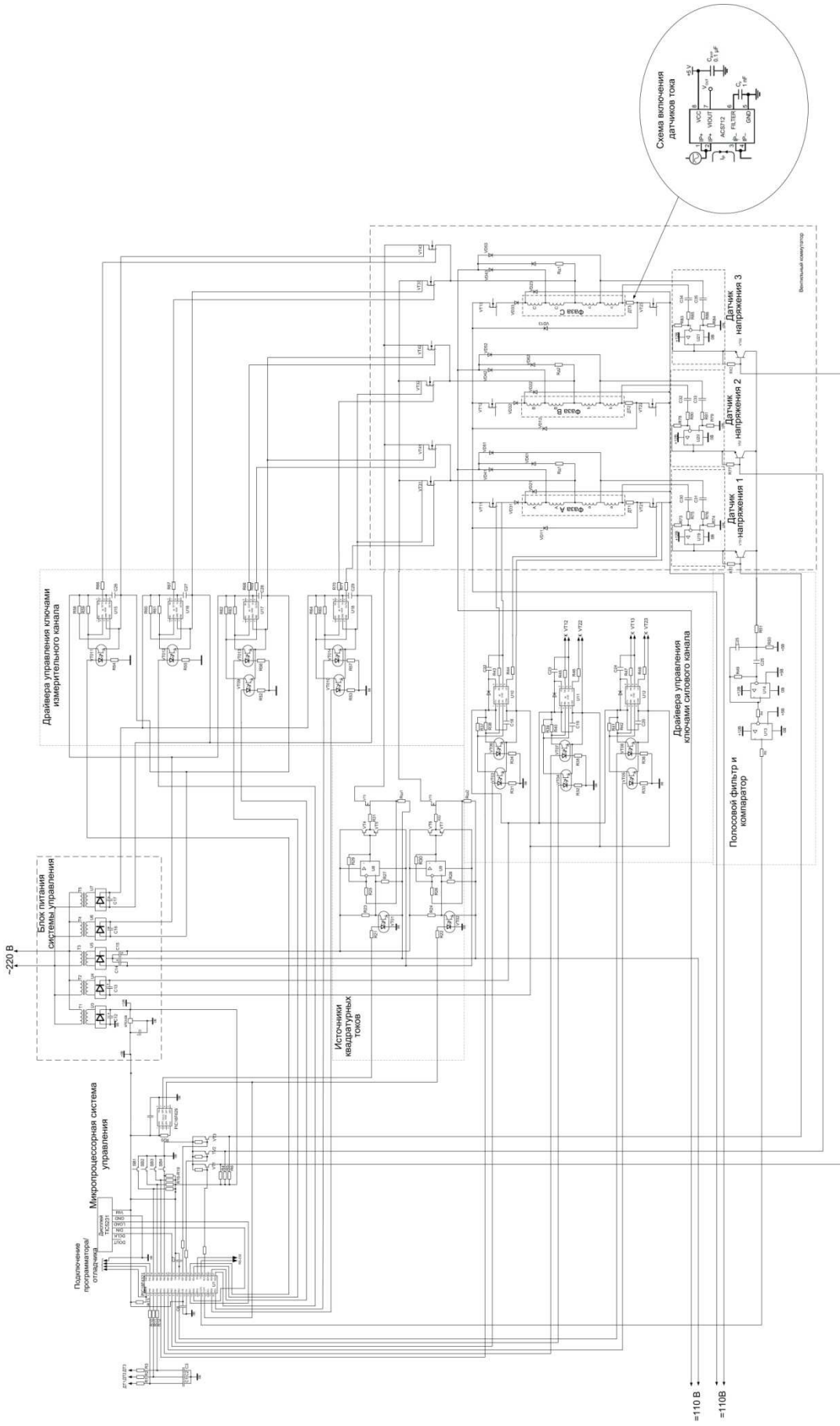
126. Митрофаненков Ю.Н., Исаев Д.С. Лабораторный стенд для исследования бездатчикового вентильно-индукторного электропривода. «Информационные технологии, энергетика и экономика». Сборник трудов 11-й международной научно технической конференции студентов и аспирантов Т 1. – «Универсум», Смоленск. 2014. - с.64-67.



## **ПРИЛОЖЕНИЯ**

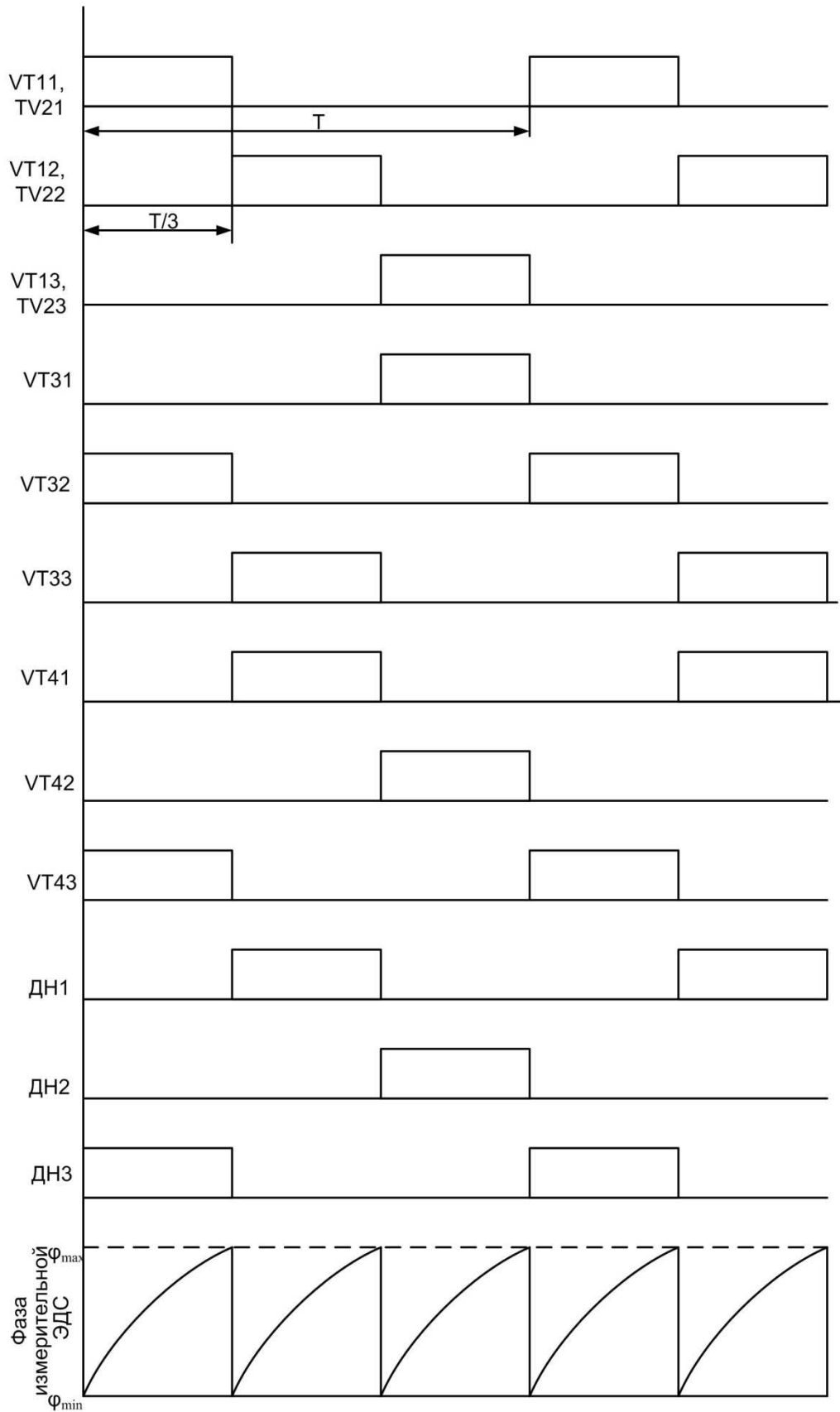
**ПРИЛОЖЕНИЕ 1.**

**Принципиальная схема системы бездатчикового управления ВИМ.**

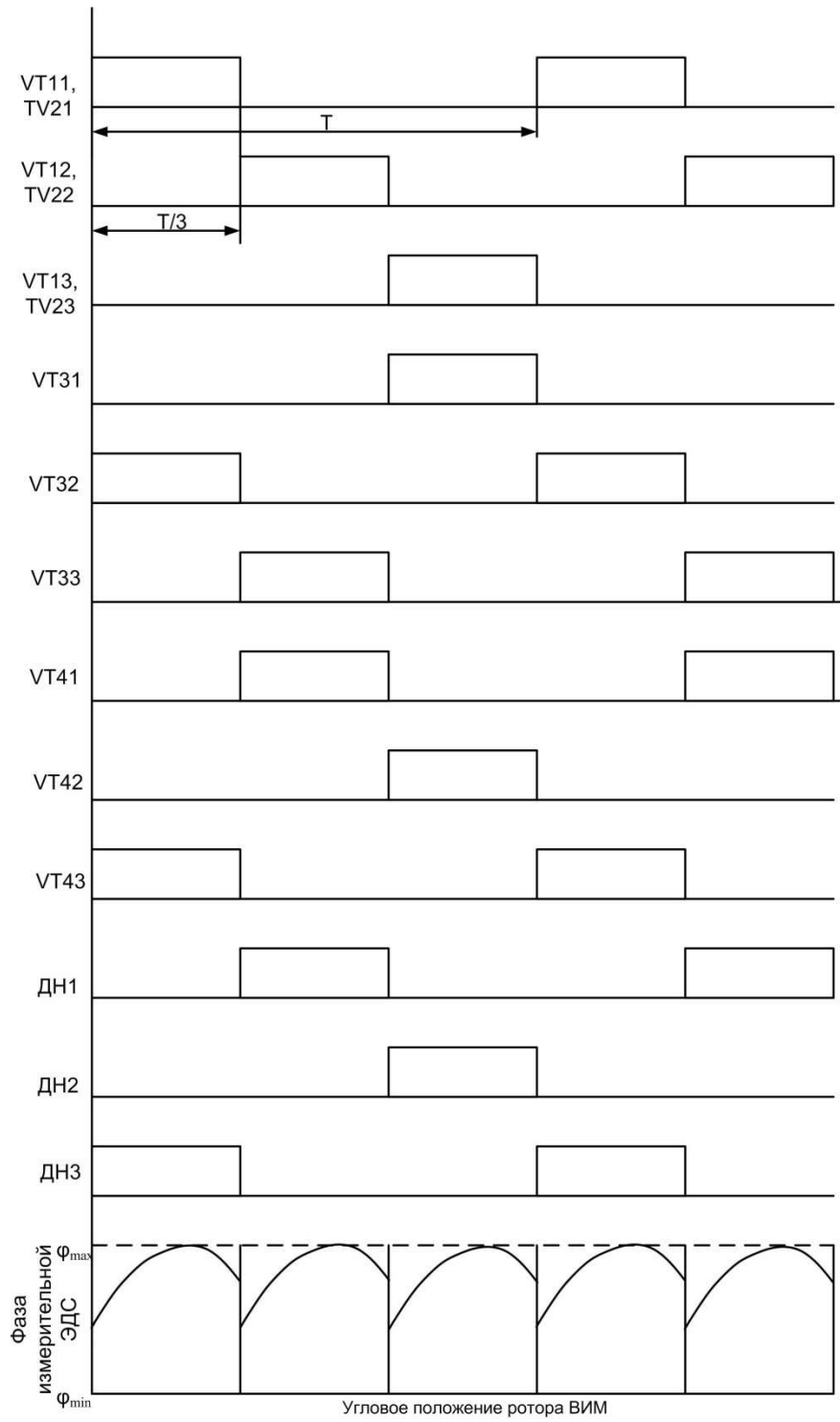


**ПРИЛОЖЕНИЕ 2.**

**Коммутационные диаграммы.**

**Коммутационные диаграммы. Вариант коммутации №1.**

### Коммутационные диаграммы. Вариант коммутации №2.

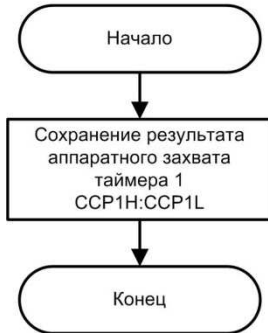


**ПРИЛОЖЕНИЕ 3.**

**Блок схемы программных модулей.**

## Алгоритм расчета фазы измерительной ЭДС

Обработка прерывания от модуля CCP1



Обработка прерывания от модуля CCP2

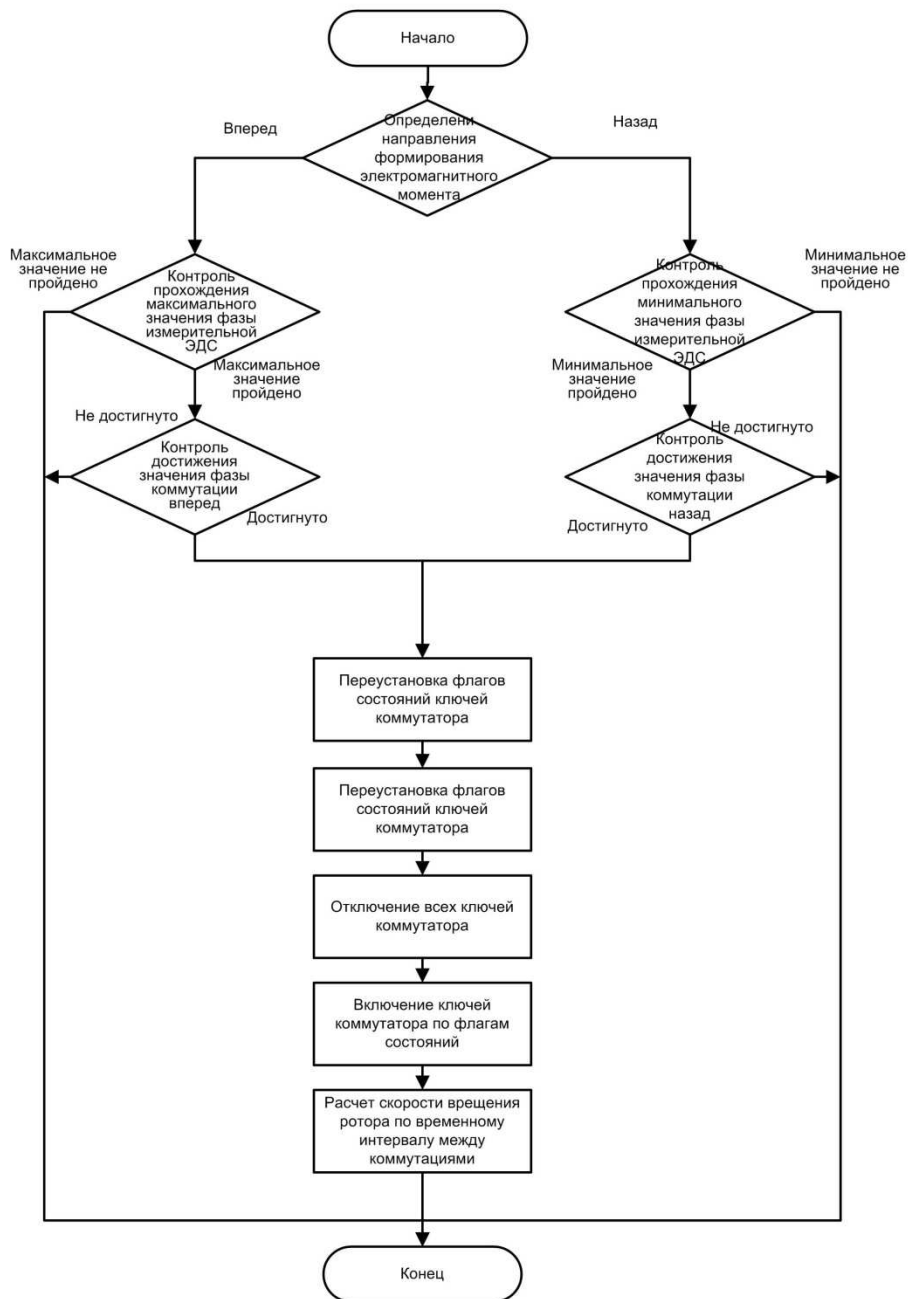


## Регулирование силового тока





Алгоритм определения моментов коммутации о значению фазы измерительной ЭДС



Алгоритм регулирования скорости



**ПРИЛОЖЕНИЕ 4.**

**Программное обеспечение макетного образца бездатчикового ВИП.**

```

list          p=18f4321    ; list directive to define processor
#include <p18f4321.inc> ; processor specific variable definitions

__CONFIG __CONFIG1H,_OSC_INTIO2_1H&_FCMEN_ON_1H&_IESO_ON_1H
__CONFIG __CONFIG2L,_PWRT_OFF_2L&_BOR_OFF_2L&_BORV_2_2L
__CONFIG __CONFIG2H,_WDT_OFF_2H
__CONFIG
__CONFIG3H,_CCP2MX_RC1_3H&_PBADEN_DIG_3H&_LPT1OSC_OFF_3H&_MCLRE_ON_3H
__CONFIG
__CONFIG4L,_STVREN_ON_4L&_LVP_OFF_4L&_BBSIZ_BB256_4L&_XINST_OFF_4L&_DEBUG_ON_4L;?
__CONFIG __CONFIG5L,_CP0_OFF_5L&_CP1_OFF_5L
__CONFIG __CONFIG5H,_CPB_OFF_5H&_CPD_OFF_5H
__CONFIG __CONFIG6L,_WRT0_OFF_6L&_WRT1_OFF_6L
__CONFIG __CONFIG6H,_WRTC_OFF_6H&_WRTB_OFF_6H&_WRTB_OFF_6H&_WRTRD_OFF_6H
__CONFIG __CONFIG7L,_EBTR0_OFF_7L&_EBTR1_OFF_7L
__CONFIG __CONFIG7H,_EBTRB_OFF_7H

;***** Инициализация памяти данных *****
;-----  Общая для всех банков область памяти (0x000 - 0x07f) -----
cblock 0x00

;-----  регистры скорости -----
w_zadL    ;заданная скорость
w_zadH    ;
w_tekL    ;(значение обратное скорости 50000/w)
w_tekH    ;
w_deltaL  ;ошибка регулирования
w_deltaH  ;
w_delta   ;
speed_cL  ;младший байт счетчика расчета скорости (значение равное 50e3/w)
speed_cH  ;старший байт счетчика расчета скорости

;-----  регистры хранения тока -----
I         ;текущее значение тока в катушке
Izad      ;заданное значение тока
I_krit    ;критический ток, при котором нужно отключить оба силовых ключа в фазе (определен
как константа)

;-----  Регистры хранения данных для определения углового положения -----
Sost1L    ;
Sost1H    ;
Sost2L    ;
Sost2H    ;
FazaL     ;младший байст хранения фазы измерительной ЭДС
FazaH     ;старший байт сохранения фазы измерительной ЭДС
Faza      ;нормированное значение фазы ЭДС
FazaSumL  ;
FazaSumH  ;
FazaSum1L ;
FazaSum1H ;
FazaSum2L ;
FazaSum2H ;
FazaSum3L ;
FazaSum3H ;
FazaSum4L ;
FazaSum4H ;

```

```

FazaSum5L      ;
FazaSum5H      ;
FazaSum6L      ;
FazaSum6H      ;
FazaSum7L      ;
FazaSum7H      ;

;----- регистры счетчиков -----
count_ind      ;счетчик пропуска идентификации углового положения послИ выполнения
коммутации
C_pusk         ;счетчик состояний запуска (предзагрузка 2)
TL_pusk        ;счетчики времени запуска (перзагрузка 0x20)
TH_pusk        ;                (перзагрузка 0x4e)

;----- флажковые регистры -----

F_komb         ;флаги выбора комбинаци включения ключей
F_idnt         ;флаги идентификации скорости,
F_sys         ;регистр системных флагов
Flag           ;дополнительные флажковые регистры

temp_intL      ;временный регистр хранения данных при работе в прерывании низкого
приоритета

;----- регистры сохранения контекста -----
W_temp_intL    ;регистр сохранения рабочего регистра при входе в прерывание низкого
приоритета
S_temp_intL    ;регистр сохранения статуса при входе в прерывание низкого приоритета
B_temp_intL    ;регистр сохранения текущего банка при входе в прерывания низкого
приоритета

W_temp_intH    ;регистр сохранения рабочего регистра при входе в прерывание высокого
приоритета
S_temp_intH    ;регистр сохранения статуса при входе в прерывание высокого приоритета
B_temp_intH    ;регистр сохранения текущего банка при входе в прерывания высокого
приоритета

cTime         ;
endc          ;
cblock 0x50   ;

;===== буфер символов отображаемой информации =====
Bled_4 ;буфер символа 0-го знакоместа,
Bled_3 ;буфер символа 1-го знакоместа,
Bled_2 ;буфер символа 2-го знакоместа,
Bled_1 ;буфер символа 3-го знакоместа,
Bled_0 ;буфер символа 4-го знакоместа,
;===== буфер значений отображаемой информации =====
B_4     ;буфер значения 0-го знакоместа,
B_3     ;буфер значения 1-го знакоместа,
B_2     ;буфер значения 2-го знакоместа,
B_1     ;буфер значения 3-го знакоместа,
B_0     ;буфер значения 4-го знакоместа,
;===== промежуточные буферные регистры =====
Bled_   ;буфер знакоместа точки,
Bdis1   ;буфер места точек,
Bled_zn ;буфер знакоместа спец. знаков,
Bdis2   ;буфер места спец знаков,

```

```

Bdis    ;буфер дисплея,

RON0   ;
RON1   ;
RON2   ;

D0     ;единицы числа
D1     ;десятки числа
D2     ;сотни числа
D3     ;тысячи
D4     ;десятки тысяч

;----   регистры для двубайтного вычитания -----
sub1L  ;младший байт уменьшаемого
sub1H  ;старший байт уменьшаемого

sub2L  ;младший байт вычитаемого
sub2H  ;старший байт вычитаемого

razL   ;младший байт разности
razH   ;старший байт разности
subtemp ;временный регистр

endc           ;0x7f
;-----   банк 0 (0x080 - 0x0ff) -----
cblock 0x080 ;

endc           ;0xff

;-----   банк 1 (0x100 - 0x1ff) -----
cblock 0x100 ;
;-----   буфер USART передатчика -----
Ubuf0   ;
Ubuf1   ;
Ubuf2   ;
Ubuf3   ;
Ubuf4   ;
Ubuf_count      ;счетчик буфера
FSR_buf         ;указатель буфера

endc           ;0x1ff
;-----

;-----   Определение портов -----
#define I1      PORTA,0      ;измерение тока в первой фазной обмотке
#define I2      PORTA,1      ;измерение тока во второй фазной обмотке
#define I3      PORTA,2      ;измерение тока в третий фазной обмотке
#define VT11    LATA,3 ;управление верхним ключем обмотки 1
#define VT12    LATA,4 ;управление верхним ключем обмотки 2
#define VT13    LATA,5 ;управление верхним ключем обмотки 3
#define load    LATA,6;
#define din     LATA,7;

```

```

#define clk LATB,0;
#define knop1 PORTB,1 ;кнопка 1
#define knop2 PORTB,2 ;кнопка 2
#define knop3 PORTB,3 ;кнопка 3
#define knop4 PORTB,4 ;кнопка 4
#define knop5 PORTB,5 ;кнопка 5

#define VT21 LATE,0 ;управление нижним ключем обмотки 1
#define VT22 LATE,1 ;управление нижним ключем обмотки 2
#define VT23 LATE,2 ;управление нижним ключем обмотки 3

#define VTs1 LATD,0;управление формированием син. состав. в обмотке 1
#define VTs2 LATD,1 ;управление формированием син. состав. в обмотке 2
#define VTs3 LATD,2;управление формированием син. состав. в обмотке 3

#define VTc1 LATD,3;управление формированием кос. состав. в обмотке 1
#define VTc2 LATD,4;управление формированием кос. состав. в обмотке 2
#define VTc3 LATD,5;управление формированием кос. состав. в обмотке 3

#define VTu1 LATC,5;управление измерением ЭДС на обмотке 1
#define VTu2 LATD,6;управление измерением ЭДС на обмотке 2
#define VTu3 LATD,7;управление измерением ЭДС на обмотке 3

;***** Блок флагов *****
;----- флаги состояний комбинаций ключей при вращении вперед -----
#define k1_v F_komb,0 ;
#define k2_v F_komb,1 ;
#define k3_v F_komb,2 ;

;----- флаги комбинаций при вращении назад -----
#define k1_n F_komb,3 ;
#define k2_n F_komb,4 ;
#define k3_n F_komb,5 ;
;----- системные флаги -----
#define F_bra_int F_sys,0 ;флаг пропуска системных прерывания при идентификации углового
положения
#define F_nap F_sys,1 ;флаг направления вращения 1 - вперед, 0 - назад
#define F_nap_m F_sys,2 ;флаг направления формирования момента 1 - вперед, 0 - назад
#define F_pusk F_sys,3 ;флаг запуска двигателя 1 - пуск выполнен, 0 - пуск не выполнен
#define F_com F_sys,4 ;флаг коммутации (используется для определения скорости вращения) 1 -
выполнено переключение фазной обмотки (шаг вперед/назад)
#define F_on F_sys,5 ;флаг
;----- Флаги состояния идентификации -----

#define F_rab_v1 F_ident,0 ;флаг вхождение в рабочую зону при движении вперед
#define F_rab_n1 F_ident,1 ;флаг вхождения в рабочую зону при движении назад

;-----
#define F_Ubuf Flag,0 ;флаг загрузки дополнительного буфера передатчика
#define F_speed_zero Flag,1 ;флаг нулевой скорости (переполнения счетчика расчета скорости)
#define bit Flag,2 ;
#define Fc Flag,3 ;

;***** Определение констант *****
Faza_rab_vpered equ .160 ;.149 ;.130 ;вхождение в рабочую зону фаз при коммутации вперед
Faza_rab_nazad equ .180 ;.149 ;.130 ;вхождение в рабочую зону при движении назад

```

```

Faza_com_vpered equ   .165   ;,139   ;,125   ;значение фазы при которой производится коммутация
вперед
Faza_com_nazad  equ   .175   ;,139   ;,125   ;значение фазы при котором производится коммутация
назад
C_INT           equ   .15     ;
               ;счетчик пропуска прерываний
;I_krit         equ           ;установить критический ток, при котором нужно отключить оба
силовых ключа в фазе
I_max          equ   .127   ;максимальный ток на выходе регулятора
K_w            equ   .1     ;коэффициент усиления по скорости

```

```

;*****
;***** Блок макросов *****
;*****

```

```

;Макрос сохранения контекста при входе в прерывание низкого приоритета

```

```

push_intL macro
    movwf   W_temp_intL,A ;сохранение рабочего регистра
    movff  STATUS,S_temp_intL ;сохранение статуса
    movff  BSR,B_temp_intL ;сохранение рабочего регистра
; movff   FSR1,FSR1_temp_intL ;
; movff   F
    endm

```

```

;Восстановление контекста при выходе из прерывания низкого приоритета

```

```

pop_intL macro
    movff  B_temp_intL,BSR ;восстановление текущего банка
    movf   W_temp_intL,w,A ;восстановление рабочего регистра
    movff  S_temp_intL,STATUS ;восстановление статуса
    endm

```

```

;Макрос сохранения контекста при входе в прерывание высокого приоритета

```

```

push_intH macro
    movwf   W_temp_intH,A ;сохранение рабочего регистра
    movff  STATUS,S_temp_intH ;сохранение статуса
    movff  BSR,B_temp_intH ;сохранение рабочего регистра
    endm

```

```

;Восстановление контекста при выходе из прерывания высокого приоритета

```

```

pop_intH macro
    movff  B_temp_intH,BSR ;восстановление текущего банка
    movf   W_temp_intH,w,A ;восстановление рабочего регистра
    movff  S_temp_intH,STATUS ;восстановление статуса
    endm

```

```

;*****
;*****
;*****
;*****
;*****
;*****
;*****
;*****
;*****

```

```

;*****
;***** вектор сброса *****
    org    0x0000
    goto   main ;переход в основную программу

```

```

;*****
;***** Вектор прерывания высокого приоритета *****
    org    0x0008 ;
    push_intH ;сохранить контекст
    goto   intH ;переход в обработку прерываний высокого приоритета

```

```

;*****          Вектор прерываний низкого приоритета *****
org    0x0018 ;
push_intL          ;сохранить контекст
goto    intL      ;переход в обработку прерываний низкого приоритета

org    0x0030 ;
;*****
;          Таблица символов
;*****
TableS
addwf  PCL,f      ;задать смещение
;
;          1234567
retlw  B'01011111' ;0 символ "0"
retlw  B'01010000' ;1 символ "1"
retlw  B'01101101' ;2 символ "2"
retlw  B'01111001' ;3 символ "3" B'01101101'
retlw  B'01110010' ;4 символ "4" B'00110110'
retlw  B'00111011' ;5 символ "5"
retlw  B'00111111' ;6 символ "6"   a 7
retlw  B'01010001' ;7 символ "7"   _____
retlw  B'01111111' ;8 символ "8"   | f | b
retlw  B'01111011' ;9 символ "9"   | 6 g2 | 1
retlw  B'01110111' ;A символ "A"   _____
retlw  B'00111110' ;B символ "b"   | e | c
retlw  B'00001111' ;C символ "C"   | 5 d4 | 3
retlw  B'01111100' ;D символ "d"   _____ + h
retlw  B'00101111' ;E символ "E"
retlw  B'00100111' ;F символ "F"
;
;          1234567
retlw  B'00001110' ;10 символ "L"
retlw  B'01100111' ;11 символ "P"
retlw  B'00111011' ;12 символ "S"
retlw  B'00000111' ;13 символ "J"
retlw  B'01111010' ;14 символ "Y"
retlw  B'01110110' ;15 символ "H"
retlw  B'01101101' ;16 символ "Z"
retlw  B'01011110' ;17 символ "U"   bcdef
retlw  B'00101100' ;18 символ "c"
retlw  B'00000111' ;19 символ "i"
retlw  B'00000111' ;1A символ "I"
retlw  B'00110100' ;1B символ "п"
retlw  B'00111100' ;1C символ "о"
retlw  B'00100100' ;1D символ "Г"
retlw  B'00101110' ;1E символ "т"
retlw  B'00011100' ;1F символ "u"
;
;          egfabcd
retlw  B'00000111' ;20 символ "Г"
retlw  B'01010111' ;21 символ "П"
retlw  B'00111110' ;22 символ "Ъ"
retlw  B'01110010' ;23 символ "Ч"
retlw  B'00001000' ;24 символ "_"
retlw  B'00101000' ;25 символ "="
retlw  B'00100000' ;26 символ "-"
retlw  B'00000000' ;27 символ " "

;*****
; Программа обработки прерываний высокого приорита
;*****
;1. обработка прерывания от таймера 2 (системное прерывание)
;2. Обработка прерывания от АЦП (измерение тока)

```



```

; org      0x0070 ;
intH
;***** Поиск источника прерывания *****
movlb     .0      ;
btfsc    PIR1,TMR2IF,A ;проверка системного прерывания от таймера 2
bra      SYSint  ;переход в обработку системного прерывания
btfsc    PIR1,ADIF,A  ;проверка прерывания от ацп (завершено измерение тока)
bra      IZMER_I    ;переход в программу измерения тока
reset     ;если источник прерывания не найдет, то перезагрузка
bra      intH_exit  ;переход в программу выхода из прерывания высокого приоритета
;***** обработка системного прерывания (прерывания от таймера 2) *****
;НАСТРОЙКА ТАЙМЕРА:
;пределитель таймера 2 = 4
;PR2 = 200
;постделитель = 1
;при частоте в Fosc=32 МГц таймер генерирует прерывание с частотой 10 кГц
;ОПЕРАЦИИ:
;1. Определение необходимости переключения фазных обмоток и выполнение переключения
;2. Запуск измерения тока
;3. Расчет скорости
;4. Расчет выходного сигнала регулятора скорости (сигнала задания тока)

SYSint
btfss    F_pusk,A    ;проверить запуск привода и выполнить запуск если требуется
call     PUSK        ;программа запуска привода
call     REGULATOR  ;переход в программу регулирования скорости и тока
btfsc    F_pusk,A    ;проверить флаг запуска привода и выполнить если запуск выполнен
call     OPR_kom     ;вызов программы определения необходимости коммутации обмоток и
выполнения коммутации
Call     Speed_opr   ;вызов программы расчета скорости;
call     IZMER_I_START ;запуск измерения тока
bcf      PIR1,TMR2IF,A ;сброс флага прерывания

bra      intH_exit  ;выход из прерывания
;***** Программа регулирования скорости/тока *****
REGULATOR
;----- Расчет ошибки регулирования -----
;заданная и текущая скорости в обратном формате 50e3/w
;ошибка в прямом формате
movf     w_tekL,w,A   ;загрузить текущую скорость
subwf    w_zadL,w,A   ;вычесть из заданной текущую скорость
movwf    w_deltaL,A   ;сохранить результат вычитания
movf     w_tekH,w,A   ;
subwfb   w_zadH,w,A   ;
movwf    w_deltaH,A   ;
;переход от обратного значения дельта к нормальному
comf     w_deltaL,f,A ;
comf     w_deltaH,f,A ;
incf     w_deltaL,f,A ;
btfsc    STATUS,C    ;
incf     w_deltaH,f,A ;

movff    w_deltaH,w_delta ;

;----- установить флаг направления формирования момента вращения -----
bcf      F_nap_m     ;предварительный сброс флага
btfss    w_delta,7,A ;проверка знака ошибки регулирования
bsf      F_nap_m     ;установка флага если ошибка положительная (момент вращения вперед)
;----- Расчет сигнала задания тока -----
;аппаратное умножение 8x8 с учетом знака (алгоритм взят и ds p18f452 на русском языке стр. 65)
movlw    K_w         ;загрузить коэффициент
mulwf    w_delta,A   ;умножить на ошибку регулирования

```

```

btfsc w_delta,7,A ;проверить знак ошибки регулирования
subwf PRODH,f,A ;выполнить корректировку значения если знак ошибки отрицательный
;проверку знака коэффициента не выполняем
;так как знак всегда положительный

;----- Проверить вхождения результата умножения (сигнала задания тока) в зону 0 - I_max
;----- Проверить знак результата умножения -----
btfsc F_nap,A; проверить текущее направление вращения
bra REG_1 ;переход если направление вращения вперед
;если направления вращения назад меняем знак результата умножения
comf PRODH,f,A ;инверсия старшего байта
negf PRODL,A ;найти негативное значение младшего байта
btfsc STATUS,C,A ;корректировка старшего байта
incf PRODH,f,A ;

REG_1 btfsc PRODH,7,A ;
bra REG_2 ;переход если знак отрицательный (не вошли в диапазон)
movf PRODH,f ;проверить старший байт результата умножения на 0
btfss STATUS,Z,A ;
bra REG_3 ;переход если старший байт не 0 (не вошли в диапазон)
movlw I_max ;сравнение результата с I_max
cpfslt PRODL,A ;
bra REG_3 ;переход если значение превысило I_max
movff PRODL,Izad ;сохранить результат рассчитаного тока
bra REG_4 ;
;----- задание нижней границы тока -----
REG_2 movlw .0 ;
movwf Izad ;
bra REG_4 ;
;----- задание верхней границы тока -----
REG_3 movlw I_max ;
movwf Izad ;
;----- нормировать результат задания тока -----
REG_4 movlw .127 ;
addwf Izad,f,A ;
return ;
;***** Программа расчета скорости *****
;1. при каждом прерывание от таймера 2, интервал прерываний равен  $t=5*10^{-5}$  (при  $f=10$  кГц) сек
; происходит увеличение счетчика прерываний
;2. При выполнении коммутации выполняются расчет скорости  $n=60/(24*Тсч*C)=50\ 000/C$  (n [об/мин])
Speed_opr
incfsz speed_cL,f,A ;увеличить счетчик
bra s_o1 ;
incfsz speed_cH,f,A ;
bra s_o1 ;
bsf F_speed_zero ;если переполнение счетчиков, то устанавливаем флаг нулевой скорости
;---- определение скорости-----
s_o1 ;
btfss F_com ;проверка флага выполнения коммутации
return ;выход если коммутации не выполнялось
bcf F_com ;сброс флага выполнения коммутации
btfss F_speed_zero,A ;проверить переполнения счетчика скорости
bra s_o2 ;переход если нет переполнения
movlw 0xff ;
movwf w_tekL,A ;
movwf w_tekH,A ;
bra s_o3
;----- загрузить вычисленную текущую скорость -----
s_o2 movff speed_cH,w_tekH ;
movff speed_cL,w_tekL ;

```

```

s_o3    bcf    F_speed_zero,A ;сбросить флаг переполнения счетчика скорости
clrf    speed_cH,A           ;сбросить счетчики расчета скорости
clrf    speed_cL,A           ;
return  ;
;***** Программа запуска измерения тока *****
IZMER_I_START
;выбор обмотки для измерения тока
btfsc   k1_v,A              ;
bra     Iz1                  ;
btfsc   k2_v,A              ;
bra     Iz2                  ;
btfsc   k3_v,A              ;
bra     Iz3                  ;
btfsc   k1_n,A              ;
bra     Iz1                  ;
btfsc   k2_n,A              ;
bra     Iz2                  ;
btfsc   k3_n,A              ;
bra     Iz3                  ;
reset   ;
;-----
Iz1     movlw b'00000001'      ;
movwf   ADCON0                ;
bra     Iz                     ;
Iz2     movlw b'00000101'      ;
movwf   ADCON0                ;
bra     Iz                     ;
Iz3     movlw b'00001001'      ;
movwf   ADCON0                ;
bra     Iz                     ;
nop     ;
Iz      bsf    ADCON0,GO       ;
return  ;

;***** Определение необходимости переключения фаз *****
OPR_kombtfsc F_bra_int,A ;проверить флаг пропуска определения угл. положения
bra     sys1 ;переход если пропуска нет
decfsz count_ind,f,A ;уменьшить счетчик
return ;выход из программы
movlw   C_INT ;перезагрузка счетчика
movwf   count_ind,A ;
bsf     F_bra_int,A ;установка флага завершения пропуска прерываний
;----- пропуск прерываний завершен -----
sys1    btfss  F_nap_m,A ;определить направление формирования момента
bra     sys2 ;переход если назад
;----- анализ формирования момента вперед -----
btfsc   F_rab_v1,A ;проверка вхождения в рабочую зону при движении вперед
bra     sys1_1 ;переход если вошли
movff   Faza,temp_intL ;
movlw   Faza_rab_vpered ;определить вхождение в рабочую зону
cpfsgt  temp_intL,A ;
return  ;переход если невошли
bra     kom ;
bsf     F_rab_v1,A ;установить флаг вхождения в рабочую зону
return  ;

```

```

;----- определение необходимости коммутации -----
sys1_1 movff Faza,temp_intL ;
movlw Faza_com_vpered
cpfslt temp_intL,A ;
return ;
bra kom ;переход в программу коммутации

;----- анализ формирования момента назад -----
sys2 btfsc F_rab_n1,A ;проверка вхождения в рабочую зону при движении вперед
bra sys2_1 ;переход если вошли
movff Faza,temp_intL ;
movlw Faza_rab_nazad ;определить вхождение в рабочую зоне
cpfslt temp_intL,A ;
return ;переход если невошли
bsf F_rab_n1,A ;установить флаг вхождения в рабочую зону
return ;
;----- определение необходимости коммутации -----
sys2_1 movff Faza,temp_intL ;
movlw Faza_com_nazad
cpfsgt temp_intL,A ;
return ;
bra kom ;переход в программу коммутации
nop ;
;***** программа коммутации обмоток *****
kom bsf F_com,A ;установка флага коммутации
bcf F_bra_int,A ;сброс флага пропуска прерываний для определения углового положения
bcf F_rab_v1,A ;сброс флагов вхождения в рабочую зону
bcf F_rab_n1,A ;

bcf VT21,A ;отключить нижние силовые ключи
bcf VT22,A ;
bcf VT23,A ;

bcf VT11,A ;отключить нижние силовые ключи
bcf VT12,A ;
bcf VT13,A ;

bsf VTu1,A ;отключить ключи выбора измерения ЭДС
bsf VTu2,A ;
bsf VTu3,A ;

bcf VTs1,A ;отключить ключи выбора источника тока
bcf VTs2,A ;
bcf VTs3,A ;
bcf VTc1,A ;
bcf VTc2,A ;
bcf VTc3,A ;

btfsc F_nar,A;определить направление вращения
bra kom_vpered ;выполнит коммутацию вперед
bra kom_nazad ;выполнит коммутацию назад
;----- программа коммутации обмоток вперед -----
kom_vpered
btfsc k1_v,A ;поиск предыдущей комбинации включенных ключей
bra set_k2v ;
btfsc k2_v,A ;
bra set_k3v ;
btfsc k3_v,A ;
bra set_k1v ;
btfsc k1_n,A ;поиск предыдущей комбинации включенных ключей

```

```

bra    set_k2v ;
btfsc  k2_n,A ;
bra    set_k3v ;
btfsc  k3_n,A ;
bra    set_k1v ;
reset  ;
;----- коммутация обмоток назад -----
kom_nazad    btfsc    k1_n,A ;поиск предыдущей комбинации включенных ключей
bra    set_k3n ;
btfsc  k2_n,A ;
bra    set_k1n ;
btfsc  k3_n,A ;
bra    set_k2n ;
btfsc  k1_v,A ;поиск предыдущей комбинации включенных ключей
bra    set_k3n ;
btfsc  k2_v,A ;
bra    set_k1n ;
btfsc  k3_v,A ;
bra    set_k2n ;
reset  ;
;----- установка комбинаций -----
;происходит переустановка комбинации и коммутация инзмрительных ключей
;включение силовых ключей произойдет после измерения тока

;----- комбинация 1, вращение вперед ---
set_k1v  clrf    F_komb,A      ;установить новую комбинацию
bsf     k1_v,A ;

bsf     VTs2,A ;коммутировать ключи информационные ключи
bsf     VTc3,A ;
bcf     VTu2,A ;
return  ;
;---- комбинация 2, вращение вперед -----
set_k2v  clrf    F_komb,A      ;установить новую комбинацию
bsf     k2_v,A ;

;коммутировать информационные ключи
bsf     VTs3,A ;
bsf     VTc1,A ;
bcf     VTu3,A ;
return  ;
;---- комбинация 3, вращение вперед -----
set_k3v  clrf    F_komb,A      ;установить новую комбинацию
bsf     k3_v,A ;

;коммутировать информационные ключи
bsf     VTs1,A ;
bsf     VTc2,A ;
bcf     VTu1,A ;
return  ;
;---- комбинация 1, вращение назад -----
set_k1n  clrf    F_komb,A      ;установить новую комбинацию
bsf     k1_n,A ;

;коммутировать информационные ключи
bsf     VTs2,A ;
bsf     VTc3,A ;
bcf     VTu3,A ;
return  ;
;---- комбинация 2, вращение назад -----
set_k2n  clrf    F_komb,A      ;установить новую комбинацию
bsf     k2_n,A ;

;коммутировать информационные ключи
bsf     VTs3,A ;
bsf     VTc1,A ;

```

```

    bcf    VTu1,A ;
    return ;
;---- комбинация 3, вращение назад -----
set_k3n  clrf   F_komb,A      ;установить новую комбинацию
    bsf    k3_n,A ;
                ;коммутировать ключи
    bsf    VTs1,A ;
    bsf    VTc2,A ;
    bcf    VTu2,A ;
    return ;

;***** Обработка прерывания от АЦП (сохранения результата измерения тока) *****
IZMER_I  bra    kat_on      ;
    btfss  F_on          ;проверить флаг включения двигателя
    bra    Dvig_off      ;если флаг включения двигателя сброшен, то отключить силовой ток в
обмотках
    movff  ADRESH,temp_intL ;сохранить промежуточное значение тока
    movlw  0x7f          ;нормировать результат измерения тока
    subwf  temp_intL,w,A ;
    movwf  I,A          ;сохранить результат измерения тока
;----- Сравнить текущее значение тока с заданным и выполнить коммутацию ключей -----
    movf  I,w,A        ;
    cpfslt Izad,A      ;сравнить текущий ток с заданным
    bra   kat_off      ;отключить обмотку если ток больше заданного
    bra   kat_on       ;обеспечить включение фазной обмотки если ток меньше заданного
    nop                ;
;----- отключение обмотки -----
kat_off  bcf    VT11,A    ;
    bcf    VT12,A    ;
    bcf    VT13,A    ;
;----- проверка критического тока для отключения нижних ключей
    movf  I,w,A        ;
    cpfsgt I_krit,A    ;сравнить текущий ток с критическим
    bra   kat_off1     ;перейти если текущий ток меньше
                ;если больше, то отключить нижние силовые ключи
    bcf    VT21,A    ;
    bcf    VT22,A    ;
    bcf    VT23,A    ;
kat_off1 bcf    PIR1,ADIF,A ;сброс флага прерывани
    bra   intH_exit   ;выход из прерывания

;----- включение обмотки -----
kat_on  btfsc  k1_v,A    ;
    bra   VTo1        ;
    btfsc  k2_v,A    ;
    bra   VTo2        ;
    btfsc  k3_v,A    ;
    bra   VTo3        ;
    btfsc  k1_n,A    ;
    bra   VTo1        ;
    btfsc  k2_n,A    ;
    bra   VTo2        ;
    btfsc  k3_n,A    ;
    bra   VTo3        ;
    reset            ;
;----- включение в первой фазе силовых ключей -----
VTo1   bsf    VT11,A    ;
    bsf    VT21,A    ;
    bra   kat_on_ex    ;
;----- включение во второй фазе силовых ключей ----
VTo2   bsf    VT12,A    ;

```

```

bsf    VT22,A      ;
bra    kat_on_ex  ;
;---- включение в третьей фазе силовых ключей ----
VTo3   bsf    VT13,A      ;
bsf    VT23,A      ;
bra    kat_on_ex  ;
;-----
nop    ;
kat_on_ex bcf    PIR1,ADIF,A      ;сброс флага прерывания
bra    intH_exit ;выход из прерывания
nop    ;
;***** Программа выхода из прерываний высокого приоритета *****
intH_exit
pop_intH      ;восстановление контекста
retfie      ;выход и прерывания
;***** Программа отключения ключей, если сброшен флаг включения двигателя
Dvig_off bcf    VT21,A ;отключить нижние силовые ключи
bcf    VT22,A ;
bcf    VT23,A ;

bcf    VT11,A ;отключить нижние силовые ключи
bcf    VT12,A ;
bcf    VT13,A ;

bcf    PIR1,ADIF,A      ;сброс флага прерывания
bra    intH_exit      ;выход из прерывания

;*****
; Программа обработки прерываний низкого приоритета
;*****
;1. Прерывание от CCP1(синхронизация с источником тока)
;2. Прерывание от CCP2(расчет фазы)
;3. Прерывание от последовательных интерфейсов (будет сделана в фоновой задаче)
;4. Прерывание от таймера 3 загрузка буфера USART данными (будет сделана в фоновой задаче)

intL
;***** поиск источника прерываний
btfsc  PIR1,CCP1IF,A ;проверка прерывания от CCP1
bra    intCCP1 ;переход если прерывание от CCP1
btfsc  PIR2,CCP2IF,A ;проверка прерывания от CCP2
bra    intCCP2 ;переход если прерывание от CCP2
btfsc  PIR1,TXIF      ;проверка прерываний от USART передатчика
bra    IntTX      ;переход если прерывание от USART передатчика
reset  ;

;***** Обработка прерывания от CCP1 *****
intCCP1 movff  CCPR1L,Sost1L ;сохранить результат захвата
movff  CCPR1H,Sost1H;
bcf    PIR1,CCP1IF,A ;сброс флага прерывания
bra    intL_exit      ;выход из прерывания низкого уровня
;***** Обработка прерывания от CCP2 *****
intCCP2 movff  CCPR2L,Sost2L ;сохранить результат захвата
movff  CCPR2H,Sost2H;
;расчитать фазу измерительной ЭДС
movf   Sost1L,w,A      ;выполнить вычитание младших байт
subwfb Sost2L,w,A      ;
movwfb FazaL,A      ;сохранить младший байт измерительной ЭДС
movf   Sost1H,w,A      ;выполнить вычитание старших байт
subwfb Sost2H,w,A      ;

```

```

movwf FazaH          ;сохранить старший байт измерительной ЭДС
;НОРМИРОВАТЬ ЗНАЧЕНИЕ ФАЗЫ
bcf STATUS,C,A      ;
rrcf FazaH,f,A      ;
rrcf FazaL,f,A      ;
movff FazaL,Faza    ;
call FazaSum        ;усреднение значения фазы

```

```

bcf PIR2,CCP2IF,A ;сбросить флаг прерывания
bra intL_exit      ;

```

```

;*****
;

```

```

; Программа суммирования (усреднения значения фазы)
;*****
;

```

```

FazaSum

```

```

clrf FazaSumL,A    ;
clrf FazaSumH,A    ;

```

```

movff Faza,FazaSumL ;
movf FazaSum1L,W,A;
addwf FazaSumL,f,A ;
btfsc STATUS,C,A ;
incf FazaSumH,f,A ;

```

```

movf FazaSum2L,W,A;
addwf FazaSumL,f,A ;
btfsc STATUS,C,A ;
incf FazaSumH,f,A ;

```

```

movf FazaSum3L,W,A;
addwf FazaSumL,f,A ;
btfsc STATUS,C,A ;
incf FazaSumH,f,A ;

```

```

movf FazaSum4L,W,A;
addwf FazaSumL,f,A ;
btfsc STATUS,C,A ;
incf FazaSumH,f,A ;

```

```

movf FazaSum4L,W,A;
addwf FazaSumL,f,A ;
btfsc STATUS,C,A ;
incf FazaSumH,f,A ;

```

```

movf FazaSum5L,W,A;
addwf FazaSumL,f,A ;
btfsc STATUS,C,A ;
incf FazaSumH,f,A ;

```

```

movf FazaSum6L,W,A;
addwf FazaSumL,f,A ;
btfsc STATUS,C,A ;
incf FazaSumH,f,A ;

```

```

movf FazaSum7L,W,A;

```



```

addwf FazaSumL,f,A ;
btfsc STATUS,C,A ;
incf FazaSumH,f,A ;

```

```

rrcf FazaSumH,f,A ; делим на 8
rrcf FazaSumL,f,A ;
rrcf FazaSumH,f,A ;
rrcf FazaSumL,f,A ;
rrcf FazaSumH,f,A ;
rrcf FazaSumL,f,A ;

```

```

movff FazaSum6L,FazaSum7L ;
movff FazaSum5L,FazaSum6L ;
movff FazaSum4L,FazaSum5L ;
movff FazaSum3L,FazaSum4L ;
movff FazaSum2L,FazaSum3L ;
movff FazaSum1L,FazaSum2L ;
movff Faza,FazaSum1L;

```

```

movff FazaSumL,Faza ;
return ;

```

```

;*****
; Программа обработки прерываний от передатчика UART
;*****
IntTX
movlb .1 ;установить банк 1
movlw high Ubuf0 ;установить адрес для текущего буфера с данными
movwf FSR2H,A ;
movff FSR_buf,FSR2L ;установить адрес для текущего буфера с данными

movf INDF2,w,A ;передать следующий байт данных
movwf TXREG,A ;

incf FSR_buf,f,BANKED ;увеличить указатель
decfsz Ubuf_count,f,BANKED ;уменьшить счетчик передаваемых байт
bra int_uart1 ;переход если загружен не последний элемент буфера
;----- если загружен последний элемент буфера (завершения передачи) -----
bcf PIE1,TXIE,A ;запрет прерываний от передатчика
bcf F_Ubuf ;сбросить флаг загрузки буфера
;----- выход из подпрограммы -----
int_uart1
movlb .0 ;установить банк 0

;***** программа выхода из прерывания низкого приоритета *****
intL_exit
pop_intL ;восстановить контекст
retfie ;выход с разрешение прерывания

;*****
; Программа запуска привода
;*****
PUSK

```

```

movlw .2          ;проверка первого интвала запуска
subwf C_pusk,w,A  ;
bnz   puskl      ;
;----- если первый интервал запуска -----
decfsz TL_pusk,f,A ;уменьшить младший байт счетчика времени
bra   set_k1v    ;
decfsz TH_pusk,f,A ;уменьшить старший байт счетчика времени
bra   set_k1v    ;
movlw 0x20       ;перезагрузить счетчик времени
movwf TL_pusk,A  ;
movlw 0x4e       ;
movwf TH_pusk,A  ;
decf  C_pusk,f,A ;уменьшить интервальный счетчик
;----- проверка второго интервала -----
puskl  movlw .1   ;
subwf C_pusk,w,A ;
bnz   puskl2     ;
;----- если второй интервал запуска -----
decfsz TL_pusk,f,A ;уменьшить младший байт счетчика времени
bra   set_k2v    ;
decfsz TH_pusk,f,A ;уменьшить старший байт счетчика времени
bra   set_k2v    ;
movlw 0x20       ;перезагрузить счетчик времени
movwf TL_pusk,A  ;
movlw 0x4e       ;
movwf TH_pusk,A  ;
decf  C_pusk,f,A ;уменьшить интервальный счетчик
;-----
puskl2
bsf   F_pusk,A   ;установить флаг запуска
bra   set_k2v    ;
return ;
;*****
;
;*****
;
; Фоновая программа
;*****
main ;
call Init ;инициализировать контроллер
movlb .0 ;выбрать банк 0
clrf F_komb,BANKED ;сброс флагов
clrf F_ident,BANKED ;
clrf F_sys,BANKED ;
clrf Flag,BANKED ;
;----- предварительная установка флагов
bsf k1_v,BANKED ;
bcf F_nap,A ;

clrf TMR2 ;
bsf T2CON,TMR2ON,A ;включение таймера 2
bcf PIR1,TMR2,A ;сброс флага прерывания от таймера 2
bcf PIR1,ADIF,A ;Сброс флага прерывания АЦП
bcf PIR1,CCP1IF,A ;
bcf PIR2,CCP2IF,A ;
bcf PIR1,TXIF,A ;
bsf INTCON,GIE,A ;глобальное разрешение прерываний
bcf INTCON,GIEL,A ;

```

```

; bra    s2
bra     test_com          ;

;-----  включение/отключение двигателя -----
s1      btfss   knop1      ;
        bsf     F_on,A     ;
        btfss   knop2      ;
        bcf     F_on,A     ;
        call    TX_UART    ;
        bra     s1         ;

s2      bsf     VT11,A ;отключить нижние силовые ключи
        bsf     VT12,A ;
        bsf     VT13,A ;

        bsf     VT21,A ;отключить нижние силовые ключи
        bsf     VT22,A ;
        bsf     VT23,A ;

        bsf     VT11,A ;отключить нижние силовые ключи
        bsf     VT12,A ;
        bsf     VT13,A ;

        bsf     VTu1,A ;отключить ключи выбора измерения ЭДС
        bsf     VTu2,A ;
        bsf     VTu3,A ;

        bsf     VTs1,A ;отключить ключи выбора источника тока
        bsf     VTs2,A ;
        bsf     VTs3,A ;
        bsf     VTc1,A ;
        bsf     VTc2,A ;
        bsf     VTc3,A ;

;*****
; набор тестовых программ
;*****
test_com
        movlw  .128      ;
        call   Time      ;
        call   Disp      ;

        btfsc  knop3     ;
        bra   test_com   ;
        call   kom       ;
        movlw  0xff      ;
        call   Time      ;
        movlw  0xff      ;
        call   Time      ;
        movlw  0xff      ;
        call   Time      ;
        movlw  0xff      ;
        call   Time      ;
        bra   test_com   ;

```

```

;*****
; Передача данных по USART (Значение фазы)
;*****
;Минимальное количество передаваемых байт = 2
;1. Проверить загрузку буфера данными
;2. Если буфер не загружен и данные не передаются, то
;3. Загрузить в буфер значение фазы
;4. инициализировать передачу
TX_UART
;----- проверка загрузки буфера -----
    btfsc    F_Ubuf,A        ;проверить заполнение буфера
    return   ;выйти если буфер заполнен
    btfss    PIR1,TXIF,A     ;проверить заполнение аппаратного буфера передатчика
    return   ;выйти если буфер заполнен
;----- загрузить буфер данными -----
    movlb    .1              ;установить банк 1
    movff    FazaL,Ubuf0     ;
    movff    FazaH,Ubuf1     ;
    movff    Faza,Ubuf2      ;
    movlw    0x5a            ;
    movwf    Ubuf3,BANKED    ;

;----- установить указатель буфера -----
    movlw    low Ubuf0       ;
    movwf    FSR_buf,BANKED  ;

    movlw    0x04            ;загрузить счетчик количества передаваемых байт
    movwf    Ubuf_count,BANKED ;
    bsf     F_Ubuf,A         ;установить флаг заполнения буфера

;----- инициализация передачи данных-----
    bsf     TXSTA,TXEN,A     ;включение передатчика
    movff   Ubuf0,TXREG      ;начало передачи
    decf    Ubuf_count,BANKED ;уменьшить счетчик байт
    incf    FSR_buf,BANKED   ;увеличить указатель байт
    movlb   .0              ;выбрать банк 0
    bsf     PIE1,TXIE,A     ;разрешить прерывание от передатчика
    return ;
;*****
; Программа временной задержки
;*****
Time    movwf    cTime      ;

T2      movlw    0xff        ;
T1      addlw    0xff        ;
    nop          ;
    nop          ;
    nop          ;
    nop          ;
    btfss    STATUS,Z,A     ;
    bra     T1              ;
    decfsz  cTime,f         ;
    bra     T2              ;
    return ;
;*****

```

; Программа вывода информации на дисплей

;\*\*\*\*\*

Disp

;----- вывод на дисплей состояние -----

call bd ;сформировать двоично десятичный код состояния счетчика

;загрузка буфера

movff D0,B\_0 ;

movff D1,B\_1 ;

movff D2,B\_2 ;

movff D3,B\_3 ;

movff D4,B\_4 ;

call LoadB ;зугрузить буфертотображаемой информацией

call LoadDis ;вывести ниформацию на дисплей

return ;

;\*\*\*\*\*

;\*\*\* Подпрограммы вывода информации на дисплей ТИС 5231

;\*\*\*\*\*

;\*\*\* Подпрограмма вывода 5-ти символов на дисплей ТИС 5231

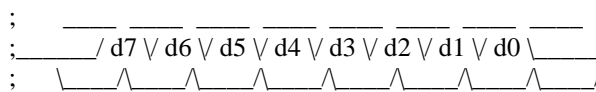
;\*\*\*\*\*

; диаграмма сигналов обслуживания дисплея

; dclk



; din



; load



LoadDis

;===== вывод на дисплей буфера отображаемой информации =====

;----- вывод на дисплей спец. символов -----

movlw 0x03 ;загрузить счетчик спец. символов,

movwf RON2,A ;

ld3 bcf STATUS,C,A ;обнуление флага переноса,

rrcf Bdis2,f,A ;проверить текущий спец. символ,

bsf bit ;

btsss STATUS,C,A ;

bcf bit ;

call LoadBit ;

decfsz RON2,f,A ;проверить окончание спец. символов,

bra ld3 ;перейти, если вывод спец. символов не завершен,

;-----

movlw .5 ;загрузка счетчика отображаемых символов,

movwf RON0,A ;

clrf FSR1H,A ;

movlw 0x50 ;загрузка начального (старшего байта) адреса

movwf FSR1L,A ;буфера отображаемой информации,

;----- загрузка текущего символа -----

ld2 movf INDF1,w,A ;загрузить буфер отображаемой информации

movwf Bdis ;текущим символом,

movlw 0x07 ;загрузить счетчик элементов символа,

movwf RON2 ;

;----- вывод точек на дисплей -----

```

;точки две (см даташит на тик) 15 и 30 биты (пары символов четные),
btfss FSR1L,0,A ;проверить пару введенных символов,
bra ld1 ;
bcf STATUS,C,A ;обнуление флага переноса,
rrcf Bdis1,f,A ;проверить текущую точку,
bsf bit,A ;
btfss STATUS,C,A;
bcf bit,A ;
call LoadBit ;
;----- вывод на дисплей текущего символа -----
ld1 bcf STATUS,C,A ;обнуление флага переноса,
rrcf Bdis,f,A ;проверить текущий бит,
bsf bit,A ;
btfss STATUS,C,A ;
bcf bit,A ;
call LoadBit ;
decfsz RON2,f,A ;проверить окончание элементов символа,
bra ld1 ;перейти, если вывод символа не завершен,
;-----
incf FSR1L,f,A ;сформировать адрес следующего символа,
decfsz RON0,f,A ;проверить окон. буфера отображаемых символов,
bra ld2 ;перейти, если объем буфера не завершен,
;-----
call del1 ;сформировать строб загрузки параллельного
bsf load,A ;буфера дисплея,
call del1 ;
bcf load,A ;
return ;
;*****
;* Подпрограмма загрузки бита в буфер дисплея *
;*****
LoadBit
bsf din,A ;установить 1 на шине данных,
btfss bit,A ;
bcf din,A ;установить 0 на шине данных,
nop ;сделать задержку,
call del1 ;
bsf clk,A ;установить 1 на шине такт,
call del1 ;
call del1 ;
bcf clk,A ;установить 0 на шине такт,
call del1 ;
return ;
;*****
;* Подпрограмма загрузки буфера отображаемой информации *
;*****
LoadB
movlw .5 ;загрузка счетчика отображаемых байт,
movwf RON0,A ;
movlw 0x50 ;загрузка начального адреса
movwf RON1,A ;буфера символов отображаемой информации,
movlw 0x55 ;загрузка начального адреса
movwf RON2,A ;бинарного буфера отображаемой информации,
;-----
LB
movff RON2,FSR1L ;буфера символов отображаемой информации,
bcf STATUS,C,A ;
rlcf INDF1,w,A ;загрузить буфер отображаемой информация
call TableS ;
movwf Bdis,A ;
movf RON1,w,A ;создать текущий адрес
movwf FSR1L ;бинарного буфера отображаемой информации,

```

```

movf   Bdis,w,A      ;
movwf  INDF1,A      ;
;-----
incf   RON1,f,A     ;
incf   RON2,f,A     ;
decfsz RON0,f,A     ;
bra    LB           ;
;буфер знакоместа точки,
movff  Bled_,Bdis1  ;буфер места точек,
;буфер знакоместа спец. знаков,
movff  Bled_zn,Bdis2 ;буфер места спец знаков,
return ;
;*****
;* Подпрограмма очистки дисплея
;*****
clrD
movlw  0x27 ;
movwf  B_0,A ;
movwf  B_1,A ;
movwf  B_2,A ;
movwf  B_3,A ;
movwf  B_4,A ;
clrf   Bled_zn ;
clrf   Bled_ ;
call   LoadB ;
call   LoadDis ;
return ;
;*****
;* Подпрограммы временной задержки *
;*****
del1
movlw  0xff ;
del11  addlw 0xff ;
btfss  STATUS,C,A ;
bra    del1 ;
return ;
;*****
;***** программа представления числа в двоично-десятичном формате
;*****
bd     clrf   D4 ;очисть буфера хранения двоичнодесятичного кода
clrf   D3 ;
clrf   D2 ;
clrf   D1 ;
clrf   D0 ;
;----- расчет 10 000=0x2710 -----
movlw  0x10 ;формирование вычитаемого
movwf  sub2L ;
movlw  0x27 ;
movwf  sub2H ;

bcf    INTCON,GIEL,A
;формирование уменьшаемого
movff  Faza,sub1L ;
clrf   sub1H,A ;
bsf    INTCON,GIEL,A ;

bd1    call   SUB ;выполнить вычитание

btfsc  Fc,A ;проверить флаг заема
bra    bd2 ;переход в расчет 1000 если был заем

;формирование нового уменьшаемого

```

```

movff  razL,sub1L    ;
movff  razH,sub1H    ;

incf   D4,f,A    ;
bra    bd1        ;
;-----  формирование 1000=0x03e8 -----
bd2    movlw 0xe8    ;формирование вычитаемого
movwf  sub2L,A;
movlw  0x03    ;
movwf  sub2H,A    ;

bd2_1  call   SUB    ;выполнить вычитание

btfsc  Fc,A    ;проверить флаг заема
bra    bd3     ;переход в расчет 1000 если был заем

;формирование нового уменьшаемого
movff  razL,sub1L    ;
movff  razH,sub1H    ;

incf   D3,f,A    ;
bra    bd2_1      ;
;-----  формирование 100=0x0064 =====
bd3    movlw 0x64    ;формирование вычитаемого
movwf  sub2L,A;
movlw  0x00    ;
movwf  sub2H,A    ;

bd3_1  call   SUB    ;

btfsc  Fc,A    ;проверить флаг заема
bra    bd4     ;переход в расчет 1000 если был заем

;формирование нового уменьшаемого
movff  razL,sub1L    ;
movff  razH,sub1H    ;

incf   D2,f,A    ;
bra    bd3_1      ;
;-----  формирование 10=0x000a -----
bd4    movlw 0x0a    ;формирование вычитаемого
movwf  sub2L,A;
movlw  0x00    ;
movwf  sub2H,A    ;

bd4_1  call   SUB    ;

btfsc  Fc,A    ;проверить флаг заема
bra    bd5     ;переход в расчет 1000 если был заем

;формирование нового уменьшаемого
movff  razL,sub1L    ;
movff  razH,sub1H    ;

incf   D1,f,A    ;
bra    bd4_1      ;
;-----  формирование 1 -----
bd5    movlw 0x01    ;
movwf  sub2L,A;
movlw  0x00    ;
movwf  sub2H,A    ;

```



```

bd5_1    call    SUB    ;

        btfs    Fc,A    ;проверить флаг заема
        bra     bd5_2   ;переход в расчет 1000 если был заем

                        ;формирование нового уменьшаемого
        movff   razL,sub1L ;
        movff   razH,sub1H ;

        incf    D0,f,A  ;
        bra     bd5_1   ;

bd5_2    return        ;
;*****
; Программа двубайтного вычитания
;*****
;----    регистры для двубайтного вычитания -----
; sub1L   ;младший байт уменьшаемого
; sub1H   ;старший байт уменьшаемого
;
; sub2L   ;младший байт вычитаемого
; sub2H   ;старший байт вычитаемого
;
; razL    ;младший байт разности
; razH    ;старший байт разности
; subtemp ;временный регистр
; Fc      - флаг заема 1 - был заем, 0 - небыло заема

SUB      bcf     Fc,A    ;сброс флага заема

        movff   sub1H,subtemp ;

        movf    sub2L,w,A    ;произвести вычитание младшего байта
        subwf   sub1L,w,A    ;
        movwf   razL,A      ;сохранить результат
        btfs    STATUS,C,A  ;
        bra     sub1        ;переход если нет заема
        movlw   .1         ;
        subwf   subtemp,f,A ;
        btfs    STATUS,C,A  ;
        bsf     Fc,A        ;установка флага заема

sub1     movf    sub2H,w,A    ;произвести вычитание старшего байта
        subwf   subtemp,w    ;
        movwf   razH,A      ;сохранить результат
        btfs    STATUS,C    ;
        bsf     Fc,A        ;
        return              ;

;*****
; Программа инициализации микроконтроллера
;*****
Init
;-----    Настройка осцилятора -----
        movlw   b'01000000' ;
        movwf   OSCTUNE,A   ;

        movlw   b'01110000' ;
        movwf   OSCCON,A    ;
        movlw   b'01000000' ;
        movwf   OSCTUNE,A   ;

```

```

;----- инициализация прерываний -----
BSF   RCON,IPEN,A   ;включение приоритетной системы прерываний

movlw b'00000000'   ;
movwf INTCON,A     ;

clrf   INTCON2,A    ;
clrf   INTCON3,A    ;

movlw b'01010110'   ;
movwf PIE1,A       ;

movlw b'00000001' ;
movwf PIE2,A       ;

movlw b'01000010'   ;
movwf IPR1,A       ;

movlw 0x00          ;
movwf IPR2,A       ;

clrf   PIR1,A      ;
clrf   PIR2,A      ;

;----- Настройка таймера 0 -----
clrf   T0CON,A      ;отключить таймер 0

;----- Настройка таймера 1 -----
; (таймер отчета фазы измерительной ЭДС)

movlw b'10000001'   ;
movwf T1CON,A       ;

;----- Настройка таймера 2 -----
; (системный таймер)
movlw b'00000001'   ;
movwf T2CON ;
clrf   TMR2 ;
movlw .200          ;
movwf PR2           ;

;----- настройка таймера 3 -----
clrf   T3CON,A      ;отключить таймер 3

;----- Настройка CCP1/2 -----
movlw b'00000101' ;
movwf CCP1CON,A   ;
movwf CCP2CON,A   ;

;-----Настройка SSP1 -----
clrf   SSPCON1     ;отключить модуль

;----- настройка USART -----
movlw b'10000000'   ;
movwf RCSTA,A      ;

movlw b'00100000' ;
movwf TXSTA,A      ;

movlw b'00000010' ;
movwf BAUDCON,A    ;

movlw .52          ;
movwf SPBRG ;

;----- Настройка АЦП -----

```

```

movlw 0x01 ;
movwf ADCON0,A ;

movlw b'00001100' ;
movwf ADCON1,A ;

movlw b'00001110' ;
movwf ADCON2,A ;

;----- отключение компаратора -----
movlw b'00000111' ;
movwf CMCON,A ;

clrf CVRCON,A ;
CLRF HLVDCON,A ;
;----- инициализация портов ввода-вывода -----
movlw b'00000111' ;
movwf TRISA,A ;

movlw b'11111110' ;
movwf TRISB,A ;

movlw b'11011111' ;
movwf TRISC,A ;

movlw 0x00 ;
movwf TRISD,A ;

movlw b'00000000' ;
movwf TRISE,A ;

clrf LATA,A ;
clrf LATB,A ;
clrf LATC,A ;
clrf LATD,A ;
clrf LATE,A;

return ;

end ;

```

**ПРИЛОЖЕНИЕ 5.**

**Программное обеспечение генератора квадратурных сигналов.**

```

LIST P=12F629
;
ERRORLEVEL -302
;
include <p12f629.INC>
;

__config
_CPD_OFF&_CP_OFF&_BODEN_OFF&_MCLRE_ON&_PWRTE_OFF&_WDT_OFF&_INTRC
_OSC_NOCLKOUT

;
cblock 0x20
temp    ;регистр временного хранения информации
count   ; счетчик состояний ключей

endc

#define     Isin    GPIO,0    ;
#define     Icos    GPIO,5    ;

;===== Блок макросов =====
bank0 macro          ;
    bcf     STATUS,RP0 ;выбрать банк 0,
    endm          ;
;-----
bank1 macro          ;
    bsf     STATUS,RP0 ;выбрать банк 1,
    endm          ;
;===== ПРОГРАММА =====
    org    0x00
    b      Start      ;
;***** вектор прерываний
    org    0x04

;***** ОСНОВНАЯ ПРОГРАММА *****
    org    0x50

;***** таблица выбора состояний ключей *****
ind_k    addwf PCL,f ;
        b    sost1 ;
        b    sost2 ;
        b    sost3 ;

```

```

        b      sost4  ;

;***** основная программа *****
Start
  call  Init      ;вызов программы инициализации контроллера

sys     nop          ;1 программная задержка
  nop          ;2
  nop          ;3
  nop          ;4
  nop          ;5
  nop          ;6
  nop          ;7
  nop          ;8
  nop          ;9
  nop          ;10
  incf  count,f; изменение счетчика состояний ключей
  movlw b'0000011' ; маскирование счетчика состояний
  andwf count,f;
  movfw count     ; чтение счетчика состояний
  nop            ;15
  b      ind_k    ; переход в таблицу выбора состояний ключей

; программа изменения состояний ключей
sost1  bsf  Isin  ;
  bsf  Icos  ;
  b    sys  ;
sost2  bcf  Icos  ;
  bsf  Isin  ;
  b    sys  ;
sost3  bcf  Isin  ;
  bcf  Icos  ;
  b    sys
sost4  bsf  Icos  ;
  bcf  Isin  ;
  b    sys
;***** программа инициализации микроконтроллера *****

Init
;----- инициализация источников прерываний (PIR1) -----
; PIR1          EQU  H'000C'
; EEIF(7)=0 - сбросить флаг прерывания от EEPROM,
; ADIF(6)=0 - сбросить флаг прерывания от АЦП,
; CMIF(3)=0 - сбросить флаг прерывания от компаратора,
; TMR1IF(0)=0 - сбросить флаг прерывания от TMR1,

```

```

;-----
bank0      ;
clrf  PIR1 ;

;----- INTCON Bits -----

; GIE =0      -глобальный заперд прерываний
; PEIE =0     -переферийные прерывания запрещены
; TOIE =0     -прерывание от TMR0 запрещено
; INTE =0     -внешнее прерывание запрещено
; GPIE =0     -прерывание по изменению уровня на входах запрещено
; T0IF =0     -сброс флагов прерывания
; INTF =0
; GPIF =0
movlw b'00000000' ;
movwf INTCON      ;

;----- инсталлировать модуль таймера T1CON -----
; T1CON      EQU  H'0010'
; TMR1GE(6)=0 - откл. управления по внешнему входу,
; T1CKPS1:0=11 - коэф. деления предделителя = 8,
; T1OSCEN(3)=0 - тактовый генератор TMR1 откл.,
; NOT_T1SYNC(2)=0 - нет синхронизации,
; TMR1CS(1)=0 - внутренний тактовый сигнал,
; TMR1ON(0)=0 - откл. TMR1,
; слово управления T1CON - 0001 0010

;-----
movlw b'00110000' ;
movwf T1CON      ;

;----- инициализация компаратора COMCON -----
; CMCON      EQU  H'0019'
; COUT(6)=0 - выход 1 при входе + > чем на входе - ,
; CINV(4)=0 - выход не инвертировать,
; CIS(3) =0 - мультиплексер входов,
; CM2:0 =111 - режим работы компаратора
; слово упр. CMCON - 0000 0111 - 07h,

;-----
movlw b'00000100' ;
movwf CMCON      ;
bank1      ;

;----- OPTION Bits -----
; OPTION_REG      EQU  H'0081'
; NOT_GPPU(7)=1 - откл. подтягивающие резисторы,
; INTEDG(6) =1 - внешнее прерывание по переднему фронту,

```

```

; TOCS(5) =0 - внутренний тактовый сигнал для TMR0,
; TOSE(4) =0 - прерывание TMR0 по переднему фронту,
; PSA(3) =1 - предделитель вкл. перед WDT,
; PS2-0 =111 - коэф. деления предделителя = 128,
; слово управления 11001111
;-----
bank1      ;
movlw b'11001111' ;
movwf OPTION_REG ;
;---- PIE1 Bits -----
; PIE1 EQU H'008C'
; EEIE(7) =0 - прерывание по EEPROM запрещено,
; ADIE(6) =0 - прерывание от АЦП запрещено,
; CMIE(3) =1 - прерывание от компаратора разрешено,
; TMR1IE(0)=0 - прерывание от TMR1 запрещено, в основной программе разрешается
програмно
; при включении таймера
; слово управления PIE1 0000 0000 - 00h,
;-----
movlw b'00000000' ;
movwf PIE1 ;
;---- PCON Bits -----
; PCON EQU H'008E'
; NOT_POR(1)=1 - сбросить флаг сброса по вкл. питания,
; NOT_BOD(0)=1 - сбросить флаг сброса по снижению напр. питания,
;-----
movlw 0x03 ;
movwf PCON ;
;---- калибровка внутреннего генератора OSCCAL -----
call 0x3ff ;загрузить калибровочную константу,
movwf OSCCAL ;
;----- подтягивающие резисторы включить -----
movlw 0x00 ;
movwf WPU ;
;---- прерывания по изменению уровня сигналов вкл. -----
; IOCB EQU H'0096'
; IOCB0=0 - прерывание по изменению сигнала на GP0 откл.,
; IOCB1=0 - прерывание по изменению сигнала на GP1 откл.,
; IOCB2=0 - прерывание по изменению сигнала на GP2 откл.,
; IOCB4=0 - прерывание по изменению сигнала на GP4 откл.,
; IOCB5=0 - прерывание по изменению сигнала на GP5 откл.,
; слово упр. IOCB - 0000 0000 - 00h,
;-----
movlw 0x00 ;
movwf IOCB ;

```



```

;----- инициализировать источник опорного напряжения VRCON -----
; VRCON          EQU  H'0099'
; VREN(7)=0 - откл. источник опорного напр.,
; VRR(5)=1 - нижний диапазон опорн. напр.,
; VR3:0=0000 -
;   слово упр. VRCON - 0010 1001 - 29h,
;-----
    movlw b'10100010' ;
    movwf VRCON      ;
;----- инициализация направления обмена портов -----
;   установить порт А:
;   - TRISIO0=1 - GP0 - на ввод, загрузка кода,
;   - TRISIO1=1 - GP1 - на ввод, тип завка,
;   - TRISIO4=0 - GP2 - на вывод, звук,
;   - TRISIO3=1 - GP3 - на ввод, MCLR, (Vpp),
;   - TRISIO2=0 - GP4 - на вывод, управление замком,
;   - TRISIO5=1 - GP5 - на ввод, вход сигнала,
;   слово управления 0010 1011 - 2bH
;-----

bank0      ;выбрать банк 0,
clrf  PIR1 ;сбросить флаги периферийных прерываний

clrf  GPIO ;
bank1      ;выбрать банк 1,
movlw b'11011110' ;задать режимы работы
movwf TRISIO      ;портов,
bank0      ;
clrf  GPIO ;
return     ;

end        ;

```