

На правах рукописи



Халде Абдулрзак Ш.

**Управление моментом вентиляно-индукторного двигателя**

Специальность 05.09.03 – электротехнические комплексы и системы

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

Санкт-Петербург - 2003

Работа выполнена в Санкт – Петербургском государственном  
политехническом университете

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ: кандидат технических наук,  
профессор Семёнов И. М.  
ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ: доктор технических наук,  
профессор А. Е. Бор-Раменский,  
кандидат технических наук,  
доцент В. С. Томасов.

ВЕДУЩЕЕ ПРЕДПРИЯТИЕ – Санкт-Петербургский государственный  
электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина).

Защита диссертации состоится 30 октября 2003 г. в 16<sup>00</sup> часов на  
заседании диссертационного Совета Д 212.229.20 в Санкт-Петербургском  
государственном политехническом университете, по адресу: 195251, Санкт-  
Петербург, ул. Политехническая, д.29, главное здание, 151 ауд.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке Санкт-  
Петербургского государственного политехнического университета.

Автореферат разослан \_\_\_\_ октября 2003 г.

Отзывы на автореферат (в двух экземплярах, заверенных печатью) просим  
направлять по адресу: 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.29.

Ученый секретарь  
Диссертационного Совета, к.т.н., доцент  А. Д. Курмашев

#### Общая характеристика работы

**Актуальность темы.** Важное место в современных электротехнических системах занимает электроника (ЭП) с электронным управлением. В настоящее время доля их выпуска быстро возрастает. Их применение позволяет снизить потребление электроэнергии, увеличить производительность и расширить функциональные возможности производственного оборудования, а также, в ряде случаев, существенно повысить его надежность.

В 80-х годах в ряду приводов появился вентильно-индукторный двигатель (ВИД), который в зарубежной литературе он встречается с названием SRM (Switched Reluctance Motor).

Конструктивно ВИД аналогичен шаговому двигателю, питание обмоток от коммутатора с обратной связью по положению ротора обеспечивает высокие технико-экономические показатели ВИД и позволяет применять его в качестве управляемого электродвигателя в широком диапазоне мощностей. От традиционных конструкций электрических машин его отличает повышенная надежность, обусловленная отсутствием обмоток на роторе и применением для возбуждения полюсов статора простых и надежных сосредоточенных обмоток, не имеющих пересечений смежных катушек в полюсных частях. По простоте устройства и надежности ВИД превосходит асинхронный двигатель (АД), трудоемкость его изготовления в 1,5...2 раза меньше, чем у АД. При этом КПД у ВИД на 2-5% выше. В сравнении с синхронными ленточными двигателями с электромагнитным возбуждением или возбуждением от постоянных магнитов (ПМ) ВИД конструктивно проще и надежнее, стоимость его существенно ниже. Характеристики ВИД находятся на уровне характеристик вентильных двигателей с ПМ. Диапазон мощностей создаваемых ВИД сегодня достаточно широк: от единиц Вт до сотен кВт.

В связи с увеличением доли ЭП с ВИД, обладающих улучшенными технико-экономическими показателями и позволяющих создавать энергоэффективные технологии, является актуальной научно-технической задачей.

Интерес к реактивным индукторным двигателям в настоящее время вышел за рамки теоретических споров о месте ВИД среди регулируемых электрических машин. В настоящее время разработкой и внедрением их в новые сферы рынка занимаются практически все ведущие электротехнические компании - OULTON (Великобритания), EMERSON ELECTRIC, TRW, DANA, General Electric Company (США) и др. Над технологией проектирования и вопросами управления этих машин работают ученые ведущих университетов США, Великобритании, Германии и др. В России работы в этом направлении наиболее активно ведутся в Южно-Российском государственном техническом университете (ЮРГТУ), в Московском энергетическом институте (техническом университете), Всероссийском электровозостроительном научно-исследовательском и проектно-конструкторском институте (ОАО "ВЭИНИИ"), Ростовском государственном университете путей сообщения и др.

Есть основания полагать, что в ближайшее время вентиляно-индукторные приводы составят серьезную альтернативу имеющимся электродвиждам традиционных типов.

Однако, несмотря на простоту конструкции, проектирование ЭП с ВИД отличает-

ети спецификацией, обусловленной двухсторонней явно выраженной зубчатостью магнитной системы и значительным влиянием насыщения зубцового слоя на электромагнитные процессы. Несмотря на большое количество патентов и публикаций, посвященных ЭП с ВИД, вопросы компьютерного моделирования процессов в системе «реактивный индукторный двигатель-преобразователь-частоты-блок управления» (ВИД-ПЧ-БУ), выбора структуры и геометрии зубцового слоя РИД, а также оптимизационного проектирования, разработки алгоритмов питания обмоток и работы коммутатора, обеспечивающих высокие технико-экономические показатели и снижение пульсаций электромагнитного момента, не получили достаточного развития. Отсутствие методов проектирования и компьютерных моделей, позволяющих на уровне мгновенных значений электромагнитных величин с высокой точностью определить функциональные параметры ЭП с ВИД, и, как следствие, неразработанность указанных проблемных вопросов, в значительной степени сдерживают широкое внедрение этих двигателей в практику электромашиностроения и современных электротехнические комплексы.

**Цель диссертационной работы:** разработка методов снижения колебаний электромагнитного момента вентильно-индукторных электроприводов и создание системы управления ВИД, минимизирующей колебания электромагнитного момента двигателя.

- Для достижения этой цели необходимо решить следующие задачи:
- Анализ процессов преобразования энергии в вентильно-индукторных двигателях.
  - Исследование причины возникновения колебаний электромагнитного момента.
  - Разработка способов минимизации колебаний электромагнитного момента.
  - Создание математической модели ВИД, позволяющей исследовать процессы электромеханического преобразования энергии в двигателе.
  - Исследование систем управления ВИД реализующих предложенные способы уменьшения колебаний электромагнитного момента, с учетом неидеальности магнитной системы и ошибок в измерении углового положения ротора.
  - Разработка структур систем управления, реализуемых разработанные методы.

**Методы исследования:** Для решения поставленных задач в работе использованы: численные методы решения нелинейных алгебраических уравнений; численные методы решения дифференциальных уравнений; методы аппроксимации с помощью В-сплайн функций; теория оптимизации; компьютерное моделирование.

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

1. Компьютерная модель электропривода с ВИД, позволяющая проводить исследование ВИД с учетом реальных характеристик магнитной системы.
2. Методика аппроксимации кривых произвольной формы с помощью В-сплайн функций.
3. Методика определения формы фазных токов, обеспечивающих минимальную амплитуду колебаний электромагнитного момента.
4. Структура системы управления ВИД, обеспечивающая заданное качество функционирования двигателя.
5. Рекомендации по выбору углов включения и отключения фазных обмоток двигателя, обеспечивающих наилучшие условия функционирования ВИД.

**Научная новизна.** Новизна результатов, полученных в диссертационной работе,

Общая характеристика работы

**Актуальность темы.** Важное место в современных электротехнических системах занимают электроприводы (ЭП) с электронным управлением. В настоящее время доля их выпуска быстро возрастает. Их применение позволяет снизить потребление электроэнергии, увеличить производительность и расширить функциональные возможности производственного оборудования, а также, в ряде случаев, существенно повысить его надежность.

В 80-х годах в ряду приводов появился вентильно-индукторный двигатель (ВИД), который в зарубежной литературе он встречается с названием SRM (Switched Reluctance Motor).

Конструктивно ВИД аналогичен шаговому двигателю, питание обмоток от коммутатора с обратной связью по положению ротора обеспечивает высокие технико-экономические показатели ВИД и позволяет применять его в качестве управляемого электродвигателя в широком диапазоне мощностей. От традиционных конструкций электрических машин его отличает повышенная надежность, обусловленная отсутствием обмоток на роторе и применением для возбуждения полюсов статора простых и надежных сосредоточенных обмоток, не имеющих пересечений смежных катушек в лобовых частях. По простоте устройства и надежности ВИД превосходит асинхронный двигатель (АД), трудоемкость его изготовления в 1,5...2 раза меньше, чем у АД. При этом КПД у ВИД на 2-5% выше. В сравнении с синхронными вентильными двигателями с электромагнитным возбуждением или возбуждением от постоянных магнитов (ПМ) ВИД конструктивно проще и надежнее, стоимость его существенно ниже. Характеристики ВИД находятся на уровне характеристик вентильных двигателей с ПМ. Диапазон мощностей создаваемых ВИД сегодня достаточно широк: от единиц Вт до сотен кВт.

В связи с вышеназванным создание ЭП с ВИД, обладающих улучшенными технико-экономическими показателями и позволяющих создавать энергоберегающие технологии, является актуальной научно-технической задачей.

Интерес к реактивным индукторным двигателям в настоящее время вышел за рамки теоретических споров о месте ВИД среди регулируемых электрических машин. В настоящее время разработкой и внедрением их в новые сферы рынка занимаются практически все ведущие электротехнические компании - OULTON (Великобритания), EMERSON ELECTRIC, TRW, DANA, General Electric Company (США) и др. Над технологией проектирования и вопросами управления этих машин работают ученые ведущих университетов США, Великобритании, Германии и др. В России работы в этом направлении наиболее активно ведутся в Южно-Российском государственном техническом университете (ЮРГТУ), в Московском энергетическом институте (технологическом университете), Всероссийском электромашинном научно-исследовательском и проектно-конструкторском институте (ОАО "ВЭИНИИ"), Ростовском государственном университете путей сообщения и др.

Есть основания полагать, что в ближайшее время вентильно-индукторные приводы составят серьезную альтернативу имеющимся электроприводам традиционных типов.

Однако, несмотря на простоту конструкции, проектирование ЭП с ВИД отлича-

ется специфика, обусловленной двухсторонней явно выраженной зубчатостью магнитной системы и значительным влиянием насыщения зубцового слоя на электромагнитные процессы. Несмотря на большое количество патентов и публикаций, посвященных ЭП с ВИД, вопросы компьютерного моделирования процессов в системе «реактивный индукторный двигатель-преобразователь частоты-блок управления» (ВИД-ПЧ-БУ), выбора структуры и геометрии зубцового слоя РИД, а также оптимизационного проектирования, разработок алгоритмов питания обмоток и работы коммутатора, обеспечивающих высокие технико-экономические показатели и снижение пульсаций электромагнитного момента, не получили достаточного развития. Отсутствие методов проектирования и компьютерных моделей, позволяющих на уровне мгновенных значений электромагнитных величин с высокой точностью определять функциональные параметры ЭП с ВИД и, как следствие, неразработанность указанных проблемных вопросов, в значительной степени сдерживают широкое внедрение этих двигателей в практику электромашиностроения и современные электротехнические комплексы.

**Цель диссертационной работы:** разработка методов снижения колебаний электромагнитного момента вентильно-индукторных электроприводов и создание системы управления ВИД, минимизирующей колебания электромагнитного момента двигателя.

Для достижения этой цели необходимо решить следующие задачи:

- Анализ процессов преобразования энергии в вентильно-индукторных двигателях.
- Исследование причины возникновения колебаний электромагнитного момента.
- Разработка способов минимизации колебаний электромагнитного момента.
- Создание математической модели ВИД, позволяющей исследовать процессы электромагнитического преобразования энергии в двигателе.
- Исследование систем управления ВИД реализующих предложенные способы уменьшения колебаний электромагнитного момента, с учетом нелинейности магнитной системы и ошибок в измерении углового положения ротора.
- Разработка структур систем управления, реализующих разработанные методы.

**Методы исследования.** Для решения поставленных задач в работе использованы: численные методы решения нелинейных алгебраических уравнений; численные методы решения дифференциальных уравнений; методы аппроксимации с помощью В-сплайн функций, теория оптимизации, компьютерное моделирование.

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

1. Компьютерная модель электропривода с ВИД, позволяющая проводить исследование ВИД с учетом реальных характеристик магнитной системы.
2. Методика аппроксимации кривых произвольной формы с помощью В-сплайн функций.
3. Методика определения формы фазных токов, обеспечивающих минимальную амплитуду колебаний электромагнитного момента.
4. Структура системы управления ВИД, обеспечивающая заданное качество функционирования двигателя.
5. Рекомендации по выбору углов включения и отключения фазных обмоток двигателя, обеспечивающих наилучшие условия функционирования ВИД.

**Научная новизна.** Новизна результатов, полученных в диссертационной работе,

заключается в следующем:

1. Создана компьютерная модель вентильно-индукторного электропривода, отличающаяся тем, что при заданном алгоритме работы коммутатора позволяет определять мгновенные значения токов и электромагнитного момента двигателя.
2. Предложен способ формирования формы токов и алгоритм их вычисления, обеспечивающие отсутствие колебаний электромагнитного момента ВИД.
3. Выполнен анализ зависимости электромагнитного момента, а также тока и напряжения, от углов включения и отключения фазных обмоток ВИД, что позволило разработать рекомендации по выбору этих углов при проектировании систем управления ВИД.
4. Разработана компьютерная модель электропривода с ВИД для оптимизационных расчетов, основанная на использовании фазных составляющих момента.

**Практическая ценность и значение работы**

1. Разработана компьютерная модель ЭП с ВИД, которая позволяет проводить исследование ВИД с улучшенными технико-экономическими показателями.
2. Выработаны рекомендации по выбору углов включения и отключения фазных обмоток двигателя, обеспечивающих максимальную эффективность электромагнитического преобразования энергии.
3. Предложен метод аппроксимации кривых тока произвольной формы с помощью В-сплайн функций.
4. Разработана методика снижения пульсаций электромагнитного момента и предложена структура систем управления ВИД, позволяющие создавать электроприводы с улучшенными техническими характеристиками.

**Апробация работы**

Основные положения и результаты работы доложены и обсуждены на:

- Шестой международной конференции "Расчет пульсаций момента вентильно-индукторного двигателя", Шестой международной конференции, Санкт-Петербург, 14-15 февраля 2002 г, с. 273.

**Публикации.**

По теме диссертации опубликованы 2 печатные работы.

**Структура и объем работы.**

Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы из 84 наименований, 136 страниц печатного текста, 4 таблиц и 72 рисунков.

**Основное содержание работы**

Во введении отражена актуальность темы исследования, определены цели и задачи диссертационной работы, представлено их научная новизна и практическая значимость. Сформулированы основные результаты, выносимые на защиту. Показаны перспективы развития исследований по теме диссертации.

В первой главе проанализировано современное состояние вопросов, связанных с проектированием ВИД, построением преобразователей частоты (коммутаторов), алгоритмов и схем управления ВИД, выполнен обзор научно-технической литературы.

Проведенный обзор публикаций показал, что модели, ориентированные на исследование влияния параметров управления ВИД на его характеристики

методом совместного расчета электрических процессов в коммутаторе и электромагнитных процессов в ВИД по мгновенным значениям с учетом кондуктивных и коммутационных процессов в силовых ключах, в настоящее время развиты недостаточно. Алгоритмы поиска совокупностей параметров управления и вопросы разработки стратегии управления также недостаточно проработаны и способ улучшения колебаний электромагнитного момента и влияния на работу двигателя. Это определяет актуальность данной диссертационной работы.

Рассмотрены основные принципы построения ВИД, устройство и принцип действия ВИД.

**Вторая глава** посвящена анализу процессов преобразования энергии в ВИД и выбору углов включения и отключения фаз обмотки, которые обеспечивают постоянство тока на рабочем этапе цикла коммутации в зависимости от напряжения и скорости. Исходными данными для такого анализа являются паспортные данные машины и ее геометрические размеры.

Основными параметрами, характеризующими геометрию зубчатого слоя вентиляционно-индукторной машины, являются:  $N_s$  - число зубцов статора;  $N_R$  - число зубцов ротора;  $R_\delta$  - радиус ротора;  $\delta$  - воздушный зазор;  $\beta_s$  - угловой размер зубца статора и,  $\beta_r$  - угловой размер зубца ротора по диаметру воздушного зазора рис. 1.

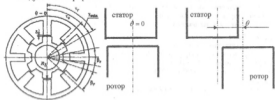


Рис. 1. Геометрические параметры зубчатого слоя ВИД

Полосные деления статора и ротора  $\tau_s = 2\pi/N_s$ ,  $\tau_r = 2\pi/N_r$  не равны, поскольку  $N_s \neq N_r$ , как правило,  $N_s \gg N_r$ . Для наиболее часто встречающихся комбинаций  $N_s/N_r = 8/6$  и  $N_s/N_r = 6/4$  число фаз двигателя  $m = N_r/2$ .

Максимальная проводимость  $\Lambda_{max}$  достигается при положении «зубец против зубца» ( $\theta = 0$ ) и определяется как

$$\Lambda_{max} = (\mu_0 S_{полоса}) / 2\delta \quad (1)$$

где  $S_{полоса}$  — площадь полюса;  $\mu_0$  — магнитная проницаемость воздуха.

Минимальная проводимость  $\Lambda_{min}$  имеет место в положении «зубец против впадины»  $\theta = \pm\tau_r/2$ . Для нахождения точного значения  $\Lambda_{min}$  требуется расчет

магнитного поля, учитывающий всю геометрию машины. Приближенно оценить  $\Lambda_{min}$  можно по коэффициенту отношения проводимостей  $K_A = \Lambda_{max}/\Lambda_{min}$ . По литературным источникам  $K_A = 7+10$ .

Процесс электромагнитического преобразования в ВИД описывается уравнениями баланса энергий и мощностей, которые выводятся из второго закона Кирхгофа для электрической цепи, образованной источником питания и фазной обмоткой.

Фазы ВИД обладает активным и изменяющимся в широком диапазоне индуктивным сопротивлением. Поэтому второй закон Кирхгофа для нее в общем случае имеет вид

$$U = E + iR, \quad (2)$$

$$u = iR + \frac{d\psi}{dt} \quad (3)$$

Так как потокоиндукция  $\psi$  является функцией двух переменных: тока  $i$  и угла поворота ротора, то

$$\frac{d\psi}{dt} = \frac{\partial\psi}{\partial i} \frac{di}{dt} + \frac{\partial\psi}{\partial\theta} \frac{d\theta}{dt} = L \frac{di}{dt} + \omega \frac{\partial\psi}{\partial\theta}, \quad (4)$$

где  $L = \frac{\partial\psi}{\partial i}$  - дифференциальная индуктивность фазы;  $\omega = \frac{d\theta}{dt}$  - угловая частота

вращения ротора;  $L \frac{di}{dt}$  - ЭДС, обусловленная изменением тока в фазе;  $\omega \frac{\partial\psi}{\partial\theta}$  - ЭДС вращения.

С учетом (4) уравнение (3) можно переписать так

$$U = iR + L \frac{di}{dt} + \omega \frac{\partial\psi}{\partial\theta} \quad (5)$$

Из этого уравнения с учетом зависимости  $\psi(i, \theta)$ , можно найти выражение для механической характеристики двигателя.

#### Анализ процессов изменения тока фазы в процессе коммутации

На рис. 2 показано изменение тока  $i$ , напряжения  $U$ , магнитной проводимости  $\Lambda$ , потока  $\Phi$  и момента  $M$ , электрической  $W_{эл}$ , магнитной  $W_{маг}$  и механической  $W_{мех}$  энергий в процессе одного цикла коммутации при следующих допущениях: магнитная цепь машины не насыщена; магнитная проводимость сердечников машины бесконечно велика, поэтому вся энергия магнитного поля сосредоточена в зазоре; активное сопротивление обмотки двигателя равно нулю (так называемая модель ИЛМ - идеальной линейной машины).

В цикле коммутации можно выделить три интервала:  $t_{вкл}$  - включения фазы;  $t_{рел}$  - работы фазы,  $t_{откл}$  - отключения фазы.

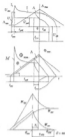


Рис. 2 Изменение переменных ВИД во время цикла коммутации

Анализ показывает, что, для получения оптимальной формы тока при работе в режиме ненасыщенной магнитной системы угол включения фазы  $\theta_{вкл} = \theta_0$  находится в точке пересечения линейного участка нарастающей магнитной проводимости с осью абсцисс. При этом установившееся значение тока пропорционально отношению  $U/\omega$ . При  $\omega < \omega_{ном}$  и  $U/\omega = const.$  формируется вертикальный участок механической характеристики с моментом  $M = const.$ , а при  $\omega > \omega_{ном}$  и  $U = const.$  - гиперболический участок с постоянной мощностью  $P = const.$  Для получения оптимальной формы тока при работе в режиме локального насыщения зубцового слоя к обмотке необходимо прикладывать напряжение  $U_{нас.}$ , соответствующее  $I_{ст.} = I_{нас.}$ , сохраняя соотношение  $U_{нас.}/\omega = const.$  При этом установившееся значение тока может быть сформировано на любом требуемом уровне  $i > I_{нас.}$  за счет опережающего включения фазы  $\theta_{вкл} < \theta_0$ .

Третья глава посвящена анализу колебаний электромагнитного момента ВИД, причин вызывающих колебание момента, исследованию влияния параметров управления на характеристики ВИД с помощью предлагаемого математического описания.

Анализ, проведенный во второй главе, позволяет разрабатывать стратегию управления ВИД, обеспечивающую лучшее энергетическое показатели, максимальный вращающий момент ВИД при минимальных пульсациях момента.

Мгновенный электромагнитный момент ВИД определяется суммой моментов отдельных фаз, находящихся одновременно под током. Как известно, момент каждой фазы ВИД в общем случае определяется из уравнения:

$$M = - \frac{\partial W_{\text{м}}}{\partial \theta} \Big|_{i=\text{const}} \quad (6)$$

Для линейного участка при пренебрежении падением МДС в стали уравнение может быть представлено в виде:

$$M = \frac{1}{2} (I_{\text{ст}})^2 \frac{d\Lambda(\theta)}{d\theta} \quad (7)$$

В режиме локального насыщения зоны перекрытия зубцов статора и ротора приобретает вид:

$$M = \left[ \frac{1}{2} (U_{\text{нас}} \omega)^2 + I_{\text{нас}} (I - I_{\text{нас}}) \omega^2 \right] \frac{d\Lambda(\theta)}{d\theta} \quad (8)$$

Анализ (7) и (8) показывает, что мгновенное значение момента, создаваемого каждой фазой зависит от мгновенного значения тока, а также от знака и значения производной функции  $d\Lambda(\theta)/d\theta$ . При взаимном перемещении полюсов ротора и статора для каждой фазы чередуются интервалы, когда она развивает движущий момент, тормозной момент или не развивает момента (в случае  $d\Lambda(\theta)/d\theta = 0$ ). Разное количество зубцов на роторе и статоре создает фазовый сдвиг кривой проводимости  $\Lambda(\theta)$  для двух соседних фаз. Для получения однонаправленного момента, создаваемого обмотками ВИД, необходимо чтобы включение обмотки фазы происходило при таком положении ротора, когда  $d\Lambda(\theta)/d\theta > 0$  или при опережающем угле.

Отсюда следует, что одна из причин колебаний электромагнитного момента состоит в неправильном выборе моментов включения и отключения обмоток ВИД. Дополнительным фактором является то, что при обычно используемом опережающем угле включения фазы проводимость магнитной цепи у включаемой фазы много меньше, чем у отключаемой. Это вызывает более быстрое нарастание тока при включении фазы, чем его уменьшение при ее отключении. Это может приводить к созданию тормозного момента отключаемой фазой на интервале  $d\Lambda(\theta)/d\theta < 0$ . Кроме того, на этапе включения значение  $d\Lambda(\theta)/d\theta = \text{var}$ , а этап отключения стремится закончить при  $d\Lambda(\theta)/d\theta = \text{const}$ . Указанное обстоятельство не позволяет обеспечить условие  $M_{\Sigma} = \text{const}$  за счет выполнения равенства

$$i_{\text{вкл}} + i_{\text{откл}} = i_{\text{зад}}$$

Наиболее просто процессы в ВИД, без учета насыщения можно исследовать используя систему управления (9):

$$\left. \begin{aligned} L_i &= L_1 - L_2 \cos(1 - \theta_i) \\ i_{\text{от}} &= \sqrt{\frac{2}{N_s L_2} \left[ \frac{M_{\text{зад}} \sin \theta_i S(M_{\text{зад}} \sin \theta_i)}{S_r} \right] + i_{\text{зад}}^2} \\ M &= \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} i^2 L_2 N_s \sin \theta_{\text{инверт}} \\ S(z) &= \begin{cases} 1 - e^{-\alpha z} & , z > 0, \\ 0 & , z \leq 0. \end{cases} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

$S(M_{\text{зад}} \sin \theta_i)$  функция зависимости от желаемого момента и углового положения ротора,  $\alpha$  - постоянная и положительная величина, определяющая шаг широк-

сигнала.  $S_T$  определяется как непрерывная функция угла. Недостаток линейной модели в рассмотренном виде и аналитических исследований, выполненных в указанных работах, состоит в том, что она не отражает возможного изменения параметров (за счет работы ключей коммутатора) конфигура тока при включении и отключении обмоток и должна быть уточнена.

С учетом схем замещения конфигура тока фазных обмоток ВИД уравнение ЭДС в двиневой математической модели ВИД приобретает вид:

$$\left. \begin{aligned} i &= \frac{U}{R_{c1}} (1 - e^{-\frac{\theta}{\tau_1}}) \dots \text{если } \theta_{y,0} \leq \theta \leq \theta_c \\ i &= \frac{U}{R_{c2}} e^{-\frac{\theta}{\tau_2}} \dots \text{если } \theta_c < \theta \leq \theta_{max} \\ i &= \frac{U}{R_{c3}} e^{-\frac{\theta}{\tau_3}} \dots \text{если } \theta_{max} < \theta \leq \theta_{min} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

где  $R_{c1} = R_{c2} + \frac{dL}{dt}$ ,  $R_{c2} = R_{c2} + \frac{dL}{dt}$ ,  $R_{c3} = R_{c4} + R_{c2}$ ,  $R_{c1}, R_{c2}$  - активные сопротивления обмоток двигателя с учетом сопротивлений коммутатора, зависящих от режима работы (вкл. или откл.),  $\theta_{max}, \theta_{min}$  - углы включения и отключения и  $\theta_c$  - угол, в котором  $i_{\phi} \neq 0$ ,  $\tau_1 = \frac{L(\theta)}{R_{c1}}$ ,  $\tau_2 = \frac{L(\theta)}{R_{c2}}$ ,  $\tau_3 = \frac{L(\theta)}{R_{c3}}$ . С использованием этой модели получена зависимость амплитуды колебаний момента от интервала включения фазных обмоток ( $\gamma$ ), как показано на рис. 3.

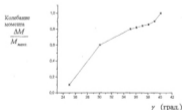


Рис.3 Амплитуда колебаний момента в зависимости от угла включения обмоток.

Анализ результатов показывает, что при управлении только углами включения и отключения фазных обмоток невозможно полностью устранить колебания электромагнитного момента. Однако, правильный выбор этих углов позволяет свести эти колебания к минимуму.

Четвертая глава посвящена построению алгоритмов управления ВИД и проектированию систем управления на базе метода фазных составляющих

момента. Такой подход позволяет улучшить качество систем привода с ВИД за счет уменьшения колебаний электромагнитного момента. Для аппроксимации фазных токов применен метод В-сплайн функций. Сплайн - функции широко используются в инженерной практике для моделирования сложных геометрических объектов, т.к. позволяют за счет варьирования коэффициентов в уравнении сплайнов получить высокую точность аппроксимации геометрических объектов. По сравнению с другими видами сплайн-функций В-сплайны имеют то преимущество, что для своей реализации требуют меньшее количество данных, т.е. занимают меньше места в памяти процессора, что ведет к увеличению скорости вычисления заданного значения тока.

В данной работе используется сплайн-функция второго порядка "к" рис. 4, проходящая через 4 узла управления. В этом случае замещающая функция будет представлять тремя криволинейными отрезками ( $n-K+2$  - число отрезков, где  $K$  -  $k$  +1).

Кривая фазного тока аппроксимируется основной функцией В - сплайна на интервале существования тока  $\theta_{y,0} < \theta < \theta_{max}$ . Она может быть представлена как:

$$i(\theta, M_{ж}) = \sum_{j=1}^n a_j(M_{ж}) b_j(\theta) \quad (11)$$

где -  $b_j(\theta) = B(\frac{\theta - (j-1)\Delta\gamma}{n\Delta\gamma})$ ,  $\theta$  - угловая продолжительность существования фазного тока,  $\Delta\gamma$  - угловой сдвиг двух соседних В - сплайн функций,  $n, N > j > 1$ ,  $M_{ж}$  - желаемое значение момента,  $n$  - число замещающих кривых на интервале  $\theta_1 + \theta_{y,0}$ ,  $a_j$  - заданные коэффициенты,  $j$  - число замещающих кривых на интервале существования В-сплайн функции.

Так как фазные токи, обеспечивающие отсутствие пульсаций электромагнитного момента ВИД, изменяются по сложным законам в зависимости от величины  $M_{ж}$ , формы кривой магнитной проводимости, углов включения и отключения и т.д., то в общем случае можно считать, что они для каждой реализации могут изменяться по произвольному закону. Покажем, как такая произвольная форма тока может быть представлена с помощью В-сплайна, рис.6.

Произвольная форма тока может быть изображена применением цепи В - сплайн функции, как показано на рис. 4. При условии, что В-сплайн определяется на интервале углов от  $\theta_{y,0}$  до  $\theta_{max}$  и является нормированной функцией, при  $n=4$  и узлах управления  $[0 \ 0 \ 0 \ 1/3 \ 2/3 \ 1 \ 1]$ ,  $k=2$ , и её основание можно написать так:

$$b_j(\theta) = \begin{cases} 0 & \text{при } \theta < 0 \text{ или } \theta > 1 \\ 9\theta^2/2 & \text{при } \theta \in [0, 1/3] \\ (-18\theta^2 + 18\theta - 3)/2 & \text{при } \theta \in [1/3, 2/3] \\ (3-3\theta)^2/2 & \text{при } \theta \in [2/3, 1] \end{cases} \quad (12)$$

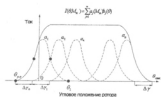


Рис. 4 Аппроксимация кривой фазного тока

Рис. 5 иллюстрирует фазные составляющие момента в положительной и отрицательной областях, где  $h_1(\theta, M_m)$ ,  $h_2(\theta + \pi/2, M_m)$  и  $h_3(\theta, M_m)$  представляют моменты в области нарастания фазы А при  $\theta \in [0, \pi/2]$ , в области спада момента при  $\theta \in [\pi/2, \pi]$  и в области отрицательного момента при  $\theta \in [-\pi/2, 0]$  соответственно.

Функции  $h_1, h_2, h_3$  должны удовлетворять следующему условию для генерации постоянного момента:

$$h_1(\theta, M_m) + h_2(\theta + \pi/2, M_m) + h_3(\theta - \pi/2, M_m) = M_m \quad (13)$$

и физические условия, ограничивающие ток фазы имеют следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} 0 \leq h_1(\theta, M_m) \leq M(\theta, i_{\max}) & \quad \forall \theta \in [0, \pi/2] \\ 0 \leq h_2(\theta + \pi/2, M_m) \leq M(\theta, i_{\max}) & \quad \forall \theta \in [\pi/2, \pi] \\ M(\theta, i_{\max}) \leq h_3(\theta, M_m) \leq 0 & \quad \forall \theta \in [-\pi/2, 0] \\ 0 \leq i_{\max}(\theta, M_m) \leq i_{\max} & \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

Поскольку момент  $M(\theta, i_{\max})$  симметричен относительно точки 0 и  $\pi$ , его полярность положительна при  $\theta \in [-\pi/2, 0]$  и  $\theta \in [\pi/2, \pi/2]$ .



Рис. 5 Фазные составляющие момента ВИД

Рассматриваемая задача может решаться без учета ограничений на величину тока обмоток, а также с учетом этих ограничений, алгоритм показан на рис. 6.

Полученные результаты показаны на рис. 7. Они свидетельствуют о том, что для нахождения реальных законов управления необходимо ввести ограничения на величину напряжения источника питания и фазных токов. Кроме того, одновременное протекание тока в нескольких обмотках двигателя не всегда благоприятно сказывается на эффективности электрохимического преобразования.

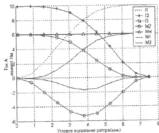


Рис. 7 Кривые тока и момента в зависимости от углового положения ротора без ограничения тока.

### Оптимизация закона управления из условия минимума потерь

Если предположить, что форма тока во всех фазах двигателя идентична, то условие оптимизации может быть записано в виде:

$$J = \min \int_{-\pi}^{\pi} i(\theta, M_m)^2 d\theta$$

В работе моделирование проводилось с помощью системы программирования МАТЛАБ. При этом были использованы функции:

```
options=optimset('LargeScale','off','Display','iter','maxFunEvals',1000,...
'TolX',0.001,'TolFun',0.001,'MaxIter',10)
a=fseminf(@myfunm2,a0,2,@mycon)
```

Результаты моделирования показан на рис. 8.



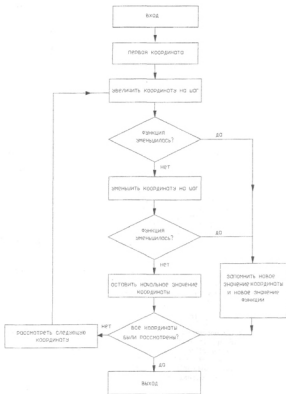


Рис.6

Если допустить большее колебание момента, то потери уменьшаются (см. таблицу.1) для разных желаемых моментов (2, 6, 10)Нм.

Табл. 1 Потери в зависимости от амплитуды колебаний момента.

Колебание момента	Момент		
	2Нм	6Нм	10Нм
0.25%	27.7Вт	149Вт	250Вт
2%	26.3	141	243
10%	23.2	121	215

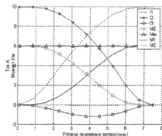


Рис.8 Кривые тока и момента в зависимости от углового положения ротора при ограничении амплитуды фазы тока.

#### Оптимизация закона управления при ограничении напряжения питания

Напряжение должно следовать задаваемому току и меняется из - за изменения проводимости в воздушном зазоре. Критерий оптимизации может быть записан в виде:

$$J2 = \min \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} U^2 d\theta,$$

$$\text{где } U = \omega \left( \frac{\partial \psi}{\partial t} \frac{d}{d\theta} + \frac{\partial \psi}{\partial \theta} \right) + Ri.$$

Результаты моделирования показан на рис.9.

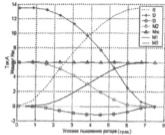


Рис.9 Кривые тока и момента в зависимости от углового положения ротора при ограничении напряжения.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о работоспособности метода. Во всех рассмотренных случаях получены положительные результаты, показывающие что постоянство результирующего электромагнитного момента может быть достигнуто для различных типов ВИД и вариациях рабочих интервалов включения обмоток. Метод пригоден и для управления двигателем на высоких скоростях, поскольку углы включения и отключения могут регулироваться.

Вариант функциональной схемы управления ВИД, реализующей рассмотренные методики, показана на рис. 10. Система включает в себя замкнутые контуры тока (блок регулятора тока одной фазы показан на рис. 11), реализующие заданные законы изменения фазных токов  $i_1, i_2, i_3, \dots, i_n$ , необходимые для формирования момента двигателя.

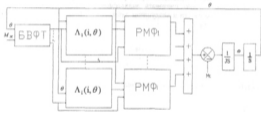


Рис. 10 Функциональная схема ВИД

где БВФТ (на рис. 10) – блок вычисления заданных значений фазных токов, РМФ<sub>i</sub> – блоки вычисления фазных составляющих момента.

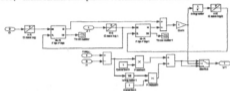


Рис. 11. Блок регулятора фазного тока.

## Заключение

Проведенные в данной диссертации исследования показали, что за счёт применения более совершенных систем управления может быть устранен или значительно уменьшен один из основных недостатков ВИД – пульсации электромагнитного момента. Несомненно, что решение проблемы пульсаций расширит область применения таких двигателей и приводов на их основе.

Можно выделить следующие основные результаты, полученные в ходе работы под диссертацией.

1. Проведенный анализ показывает, что в ближайшие годы среди регулируемых ЭП значительную часть будут продолжать составлять ЭП с ВИД. Для высокودинамических ЭП широким регулированием скорости потребуются применение ВИД специальной конструкции со встроенными датчиками углового положения ротора или без них; улучшенными энергетическими показателями и снижением колебания момента. Дальнейшее развитие систем управления приведет к широкому использованию ВИД в составе микроэлектронных моделей, где до настоящего момента преобладали двигатели постоянного тока.
2. При построении систем управления ЭП целесообразно электродвигатель рассматривать как источник момента. При таком подходе синтез внешних контуров регулирования может осуществляться типовыми методами не зависящими от типа электродвигателя и силового преобразователя. Поэтому, разработка алгоритма управления электродвигателем любого типа должна сводиться к поиску алгоритма регулирования его моментом.
3. С использованием В-сплайн функций разработана методика расчета сигналов задания системы управления фазными токами ВИД, обеспечивающая отсутствие или снижение колебаний электромагнитного момента. Точность расчета в значительной мере определяется точностью паспортных данных ВИД, приводимых заводами – изготовителями.
4. Разработаны два алгоритма нахождения формы тока при управлении из условия минимума потерь и при ограничении напряжения источника питания

ВИД. Их применение позволяет существенно улучшить энергетические характеристики ЭП и снизить колебания момента.

5. Разработаны математические модели ВИД, позволяющие исследовать как статические так и динамические характеристики двигателя с учетом и без учета насыщения. В работе также показано как могут быть уточнены параметры модели ВИД, если имеются экспериментальные данные по характеристикам его магнитной системы.

6. Результаты теоретических исследований подтверждаются компьютерным моделированием при помощи пакета SIMULINK MATLAB. Предложен вариант реализации системы управления ВИД, которая обеспечивает постоянство момента.

#### Основные работы, опубликованные по теме диссертации

1. Семёнов И. М.; Хадиев Абдулрахман Ш., Расчет пульсации момента вентиляционно-индукторного двигателя // Шестой международный конференция, Санкт-Петербург, 14-15 февраля 2002 г., с. 273.
2. Семёнов И. М.; Хадиев Абдулрахман Ш., Динамическая модель вентиляционно-индукторного двигателя // Межкузовский сборник научных трудов, Санкт-Петербург, 2002 г., с. 204-209.

где БВФТ (на рис. 13) – блок вычисления заданных значения фазных токов.

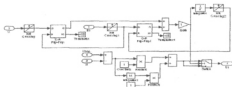


Рис. 14. Блок регулятора фазного тока.

#### Заключение

Проведенные в данной диссертации исследования показали, что за счёт применения более совершенных систем управления может быть устранен или значительно уменьшен один из основных недостатков ВИД – пульсация электромагнитного момента. Несомненно, что решение проблемы пульсаций расширит область применения таких двигателей и приводов на их основе.

Можно выделить следующие основные результаты, полученные в ходе работы под диссертацией.

1. Проведенный анализ показывает, что в ближайшие годы среди регулируемых ЭП значительную часть будут продолжать составлять ЭП с ВИД. Для высокодинамичных ЭП широким регулированием скорости потребуются применение ВИД специальной конструкции со встроенными датчиками углового положения ротора или без них; улучшенными энергетическими показателями и снижением колебания момента. Дальнейшее развитие систем управления приведет к широкому использованию ВИД в составе мехатронных моделей, где до настоящего момента преобладали двигатели постоянного тока.
2. При построении систем управления ЭП целесообразно электродвигатель рассматривать как источник момента. При таком подходе синтез внешних контуров регулирования может осуществляться типовыми методами независимо от типа электродвигателя и силового преобразователя. Поэтому, разработка алгоритма управления электродвигателем любого типа должна сводиться к поиску алгоритма регулирования его моментом.
3. С использованием В-сплайн функций разработана методика расчета сигналов задания системы управления фазными токами ВИД, обеспечивающая отсутствие или снижение колебаний электромагнитного момента. Точность расчета в значительной мере определяется точностью паспортных данных ВИД, приводимых заводами – изготовителями.
4. Разработаны два алгоритма нахождения формы тока при управлении из условия минимума потерь и при ограничении напряжения источника питания ВИД. Их применение позволяет существенно улучшить энергетические характеристики ЭП и снизить колебания момента.

5. Разработаны математические модели ВВД, позволяющие исследовать как статические так и динамические характеристики двигателя с учетом и без учета насыщения. В работе также показано как могут быть уточнены параметры модели ВВД, если имеются экспериментальные данные по характеристикам его магнитной системы.
6. Результаты теоретических исследований подтверждены компьютерным моделированием при помощи пакета SIMULINK MATLAB. Предложен вариант реализации системы управления ВВД, которая обеспечивает постоянство момента.

**Основные работы, опубликованные по теме диссертации**

1. Семёнов И. М.; Хадде Абдулрак Ш., Расчет пульсации момента вентильно-индукторного двигателя // Шестой международной конференции, Санкт-Петербурге, 14-15 февраля 2002 г, с. 273.
2. Семёнов И. М.; Хадде Абдулрак Ш., Динамическая модель вентильно-индукторного двигателя // Межвузовский сборник научных трудов, Санкт-Петербург, 2002 г, с. 204-209.

Лицензия ЛР №020593 от 07.08.97.

Подписано в печать 09.10.2003  
Тираж 100.

Объем в п.л. 1.  
Заказ 494.

Отпечатано с готового оригинал-макета,  
предоставленного автором,  
в типографии Издательства СПбГПУ  
195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.

Отпечатано на ризографе RN-2000 EP  
Поставщик оборудования — фирма "Р-ПРИНТ"  
Телефон: (812) 310-65-69 Факс: (812) 315-23-04