

Кузнецов Сергей Александрович

РАЗРАБОТКА РЕГУЛЯТОРА МОМЕНТА  
СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ВЕНТИЛЬНО-ИНДУКТОРНОГО ДВИГАТЕЛЯ

Специальность 05.13.05 – «Элементы и устройства  
вычислительной техники и систем управления»

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Работа выполнена в Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана (МГТУ им. Н.Э. Баумана).

Научный руководитель доктор технических наук, доцент  
**Красовский Александр Борисович**

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
**Бычков Михаил Григорьевич**

кандидат технических наук  
**Корпусов Дмитрий Евгеньевич**

Ведущая организация: ОАО АХК «ВНИИМЕТМАШ  
им. академика А.И. Целикова»

Защита состоится «19» октября 2010 г. в 14 час. 30 мин.

на заседании диссертационного совета Д.212.141.02 при Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана, по адресу: 107005, Москва 2-ая Бауманская, д. 5., ауд. М613.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Автореферат разослан «    » сентября 2010 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
кандидат технических наук, доцент

Иванов В.А.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность проблемы

Вентильно-индукторные электрические двигатели (ВИД) превосходят традиционные двигатели по ряду показателей. Среди них: меньшие габариты и масса; более высокий КПД; более низкие себестоимость и затраты при эксплуатации и т.д. Однако сложность физических процессов, обуславливающих их работу, нелинейность характеристик и дискретность в управлении затрудняют применение к ним традиционных методов и структур управления.

Как следствие, на сегодняшний день ВИД используются в основном в установках, не требующих высокого качества движения (насосы, вентиляторы, конвейеры, бытовая техника и т.п.). Тем не менее, многие исследователи отмечают перспективность применения ВИД и в других областях, в том числе в высокодинамичных безредукторных электроприводах, т.к. из-за особой конструкции ротора для них характерна, как правило, меньшая механическая инерционность по сравнению с другими типами машин. Однако главным условием, позволяющим повысить эксплуатационные характеристики и реализовать конкурентные преимущества ВИД, является разработка высокоэффективной системы управления, учитывающей специфические особенности двигателя.

Поскольку специфика ВИД в наибольшей степени заключается в принципе создания электромагнитного момента, эту специфику целесообразно максимально учесть в особым образом организованном внутреннем контуре регулирования момента со специализированным многофункциональным регулятором момента. Это дает возможность осуществлять синтез регуляторов внешних контуров (скорости, положения и т.д.) известными и хорошо зарекомендовавшими себя методами.

Таким образом, разработка новых регуляторов момента вентильно-индукторных двигателей является актуальной проблемой, что позволило сформулировать цель и задачи диссертационной работы.

**Цель диссертационной работы:** разработка регулятора момента, как функционально законченного элемента системы управления вентильно-индукторных двигателей для повышения их регулировочных и динамических показателей и расширения сферы применения.

Для достижения этой цели решены следующие задачи:

- исследование особенностей функционирования ВИД, анализ существующих методов учета их нелинейностей в системах управления;
- разработка имитационной модели ВИД с базовой системой управления, приспособленной для определения структуры и параметров её дополнительных элементов при максимальном учете особенностей двигателя, экспериментальная проверка адекватности модели реальным процессам в двигателе;
- разработка принципов построения и алгоритмов работы регуляторов среднего и мгновенного момента ВИД, учитывающих специфические особенности двигателя при максимальном использовании его регулировочных возможностей в широком диапазоне изменения скоростей и нагрузок;

- проверка работоспособности предлагаемых регуляторов момента с учетом особенностей практической реализации.

**Методы исследования.** При решении поставленных в диссертационной работе задач использованы базовые положения теории автоматического регулирования, электропривода, электрических машин, силовой и управляющей электроники, теоретические и практические аспекты компьютерного моделирования сложных динамических систем.

**Достоверность** научных положений и выводов подтверждена экспериментальными исследованиями, проводимыми на компьютеризированном лабораторном оборудовании кафедры автоматизированного электропривода МЭИ.

#### **Новые научные положения, выносимые на защиту:**

- принцип построения многоконтурной системы управления ВИД, основанный на максимальном учете специфических особенностей двигателя во внутреннем контуре регулирования момента со специализированным регулятором, позволяющий при синтезе регуляторов внешних контуров (скорости, положения и т.п.) использовать традиционные методики;
- принцип построения имитационной модели ВИД с использованием нормированных магнитных характеристик, наиболее полно приспособленной для синтеза его системы управления в широком диапазоне изменения параметров и режимов работы;
- структура и алгоритм работы регулятора среднего момента ВИД в зоне «высоких» и «низких» скоростей, обеспечивающие возможности гибкой настройки контура регулирования момента в зависимости от параметров и режимов работы двигателя;
- структура и алгоритм работы регулятора мгновенного момента ВИД с использованием дополнительных обратных связей и компенсацией ЭДС-движения, обеспечивающие требуемые характеристики замкнутого контура управления моментом на всех этапах цикла коммутации фаз;
- принцип построения и работы регулятора прямого управления моментом ВИД с максимальным использованием его регулировочных возможностей в широком диапазоне изменения скоростей и нагрузок с учетом особенностей практической реализации.

#### **Практическая ценность**

- разработана имитационная модель ВИД, наиболее полно учитывающая его особенности и приспособленная для решения широкого круга задач при создании его систем управления;
- предложены регуляторы среднего момента и мгновенного момента ВИД в виде функционально законченных элементов системы управления, обеспечивающие повышение его точностных и динамических характеристик.

**Апробация работы.** Основные положения диссертации обсуждались на заседаниях кафедры «Электротехника и промышленная электроника» МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2006 – 2009 г.г., а также докладывались на конференции «Актуальные проблемы фундаментальных наук» (МГТУ им. Н.Э. Баумана) в 2008 и 2009 г.г., а также Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов в МЭИ в 2008 г.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 7 научных работ, из них в журналах по перечню ВАК – 3.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Количество страниц – 155, иллюстраций – 59, число наименований использованной литературы – 73.

### СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, ее научная и практическая значимость. Поставлены цели и задачи исследования.

**Первая глава** посвящена характеристике вентильно-индукторного двигателя, как объекта управления. Рассмотрен принцип его работы, достоинства и недостатки. Проведен обзор существующих методов и алгоритмов управления вентильно-индукторным двигателем.

ВИД по физическим принципам создания момента относится к типу реактивных двигателей. Статор и ротор имеют явнополюсную структуру (рис. 1). На полюсах статора размещены сосредоточенные фазные обмотки. Принцип его работы основан на притяжении ферромагнитных полюсов ротора к возбужденным полюсам статора. Последовательное переключение фазных катушек статора ВИД в определенных угловых положениях ротора обеспечивает его однонаправленное вращение.

Обычно ВИД работает в режиме локального насыщения зоны перекрытия взаимодействующих полюсов. Поэтому для него характерна зависимость электромагнитных параметров, как от углового положения ротора, так и от фазного тока. В качестве примера на рис. 2 показана типовая зависимость потокосцепления фазы  $\Psi$  от фазного тока  $I_\phi$  и угла рассогласования полюсов статора и ротора  $\Theta$ .

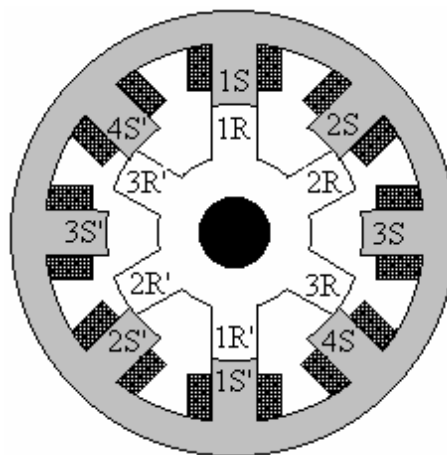


Рис. 1. К пояснению принципа работы ВИД

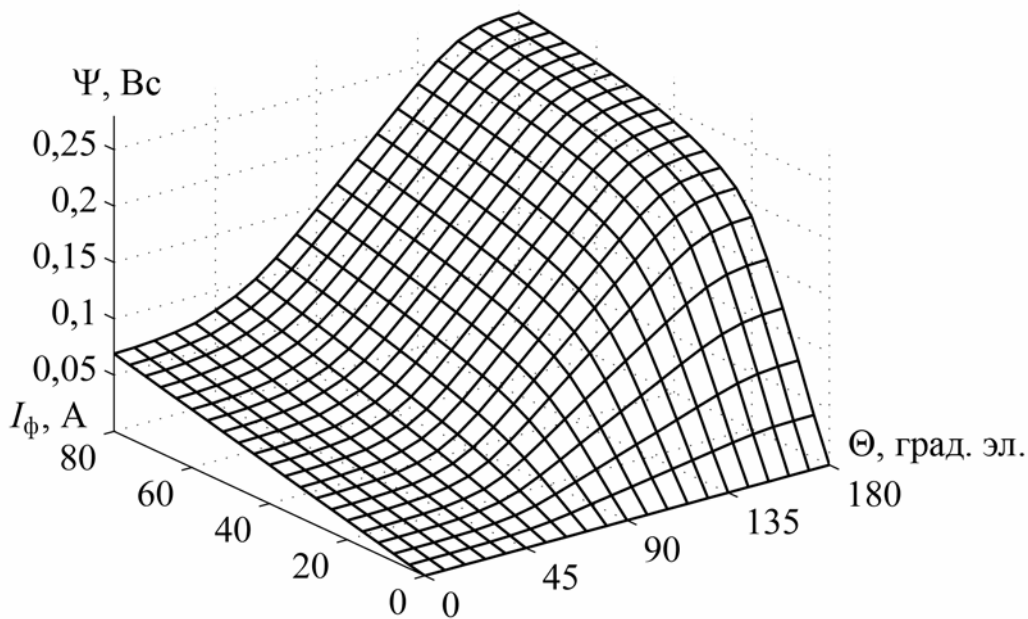


Рис. 2. Зависимость  $\Psi(I_\phi, \Theta)$

Изменение основных физических величин, характеризующих работу ВИД в цикле коммутации, показано на рис. 3.

В цикле коммутации принято выделять угловые интервалы включения  $\gamma_{\text{вкл}}$ , работы  $\gamma_{\text{раб}}$  и отключения  $\gamma_{\text{откл}}$  фазы. На рис. 3 включение фазы происходит при угловом положении  $\Theta_{\text{вкл}}$ , начало отключения – при  $\Theta_{\text{ком}}$ , при  $\Theta_{\text{откл}}$  ток в фазе снижается до нуля,  $\Theta_{\text{рас}}$  соответствует началу перекрытия полюсов. Поскольку индуктивность фазы  $L$  нелинейно изменяется в значительных пределах в функции положения ротора и фазного тока, это обуславливает сложно определяемые аналитически законы изменения фазного тока  $I_{\phi}$  и момента  $M_{\phi}$ .

В сумме фазные моменты отдельных фаз определяют результирующий или суммарный момент  $M_{\Sigma}$ , который в общем случае пульсирует с достаточно большой амплитудой относительно своего среднего значения  $M_{\text{ср}}$  (рис. 3).

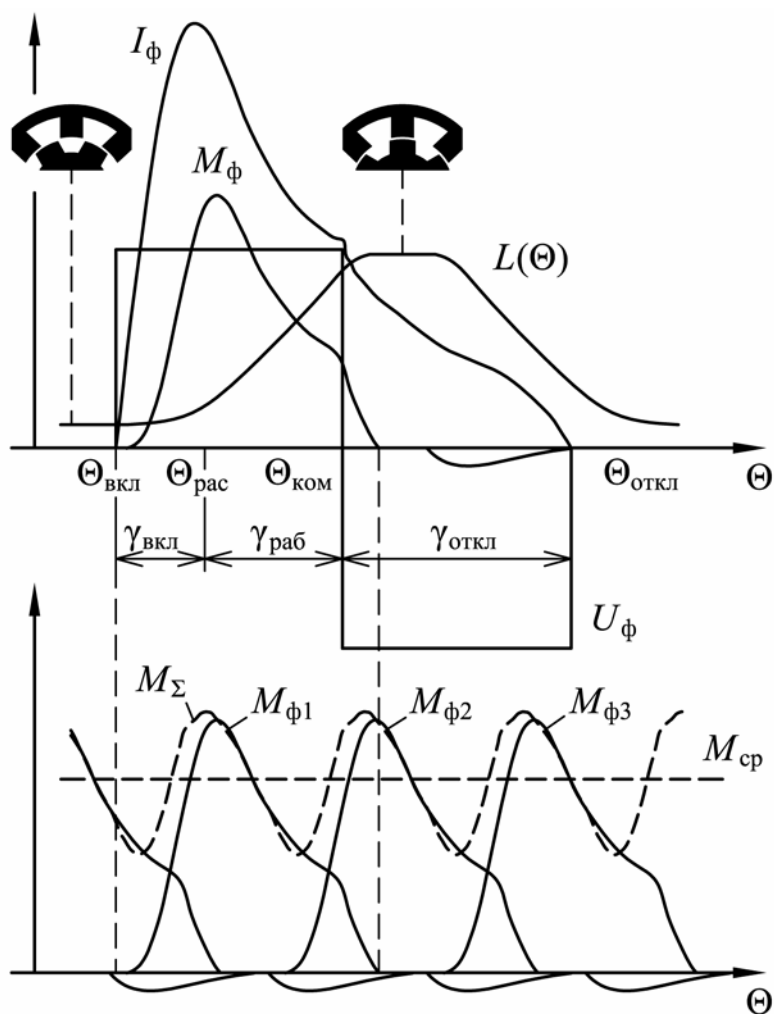


Рис. 3. Изменение основных физических величин при работе ВИД

Таким образом, принципиальная особенность ВИД – относительно небольшое число фаз в условиях несогласованных между собой законов изменения фазных моментов приводит к значительным пульсациям суммарного мгновенного момента. При этом решение проблемы взаимного согласования законов изменения моментов смежных фаз чрезвычайно осложняется нелинейностью магнитной системы двигателя (рис. 2).

Все известные структуры управления моментом ВИД можно принципиально разделить на два типа: регулирования среднего значения момента  $M_{\text{ср}}$  и регулирования мгновенного значения момента  $M_{\Sigma}$ . Такое разделение в алгоритмах управления ВИД в отличие от других типов электрических двигателей объясняется тем, что регулирование среднего значения момента представляет собой обычно более простую задачу, чем регулирование мгновенного момента. Оно используется тогда, когда к качеству движения ВИД не предъявляется жестких требований, и пульсации момента не имеют принципиального значения, особенно при работе ВИД на высокоинерционную нагрузку.

Кроме того, алгоритмы управления ВИД зависят от скоростного диапазона его работы. Обычно выделяют два режима функционирования ВИД: с постоянством среднего момента в зоне относительно низких скоростей и со снижающимся моментом в зоне относительно высоких скоростей.

Зависимость фазной индуктивности и электромагнитного момента от фазного тока и положения ротора характеризует вентильно-индукторный двигатель как нелинейный объект управления с перекрестными связями. Воздействовать на развиваемый им момент можно как за счет фазного напряжения, так и углового положения коммутации обмоток. Дискретный характер переключения обмоток определяет отсутствие установившегося режима в электромеханической системе ВИД (работу двигателя можно представить как последовательность взаимно влияющих друг на друга переходных процессов).

Таким образом, несколько каналов управления, присущая ВИД дискретность работы и нелинейность магнитных характеристик чрезвычайно осложняет применение к ним традиционных методик синтеза регулятора момента для обеспечения высоких точностных и динамических показателей его работы. При этом особенности ВИД не позволяют получать приемлемые для практики аналитические соотношения, описывающие его поведение. В этих условиях эффективным средством решения задач анализа и синтеза его систем управления является имитационное моделирование.

**Во второй главе** рассмотрены различные варианты учета нелинейных характеристик ВИД при построении имитационных моделей для решения задач управления и обоснована целесообразность использования для этого нормированных нелинейных зависимостей, известных в литературе как «кривые Миллера». На этой базе предлагается модель ВИД в среде Matlab-Simulink.

Один из относительно простых и наиболее распространенных подходов к определению мгновенных значений фазных токов и моментов ВИД в имитационных моделях основан на использовании кусочно-линейной аппроксимации его магнитных характеристик. Несомненным достоинством этого метода является простота. Однако при исследовании процессов, связанных с управлением мгновенным моментом двигателя, принятая здесь аппроксимация его магнитных характеристик оказывается недопустимо грубой.

Наиболее точно учесть все характерные особенности конкретного экземпляра машины позволяет табличное задание магнитных характеристик. При этом кривые намагничивания в виде функциональной связи между

потокосцеплением  $\Psi$ , фазным током  $I_\phi$  и положением ротора  $\Theta$  получают, как правило, либо в результате экспериментальных исследований, либо численного расчета магнитной цепи ВИД, например, методом конечных элементов. Фазный ток  $I_\phi$  определяют непосредственно по магнитным характеристикам. Кривые фазного момента  $M_\phi$  могут быть получены либо экспериментально, либо расчетным путем. Однако полученные таким образом результаты относятся к конкретному экземпляру, либо, к некоторому классу геометрически подобных машин, когда изменением их магнитных характеристик можно пренебречь.

Для решения поставленных в работе задач необходимо иметь нелинейную модель машины с возможностью гибкого изменения ее параметров. Этим требованиям отвечает метод с использованием «нормированных кривых Миллера».

### **Использование «универсальных нормированных кривых Т. Миллера» в имитационных моделях ВИД**

Одним из основоположников теории ВИД Т. Миллером (Англия) установлено, что если его кривые намагничивания представить в виде зависимостей  $\Psi(\Theta)$  для ряда значений фазного тока  $I_\phi$ , (на рис. 4, а  $I_1 < I_2 < I_3 < I_4$ ), а затем их соответствующим образом нормировать, используя выражения:

$$y(x) = (\Psi(x) - \Psi_{\min}) / (\Psi_{\max} - \Psi_{\min}), \quad (1)$$

$$x = (\Theta - \Theta_{\min}) / (\Theta_{\max} - \Theta_{\min}), \quad (2)$$

то полученные зависимости  $y(x)$  при различных значениях  $I_\phi$  практически совпадают. Здесь  $\Psi_{\max}$  – потокосцепление в согласованном положении ротора  $\Theta_{\max}$ ,  $\Psi_{\min}$  – потокосцепление в рассогласованном положении ротора  $\Theta_{\min}$ ;  $\Psi(x)$  – потокосцепление в промежуточном положении ротора  $x$ .

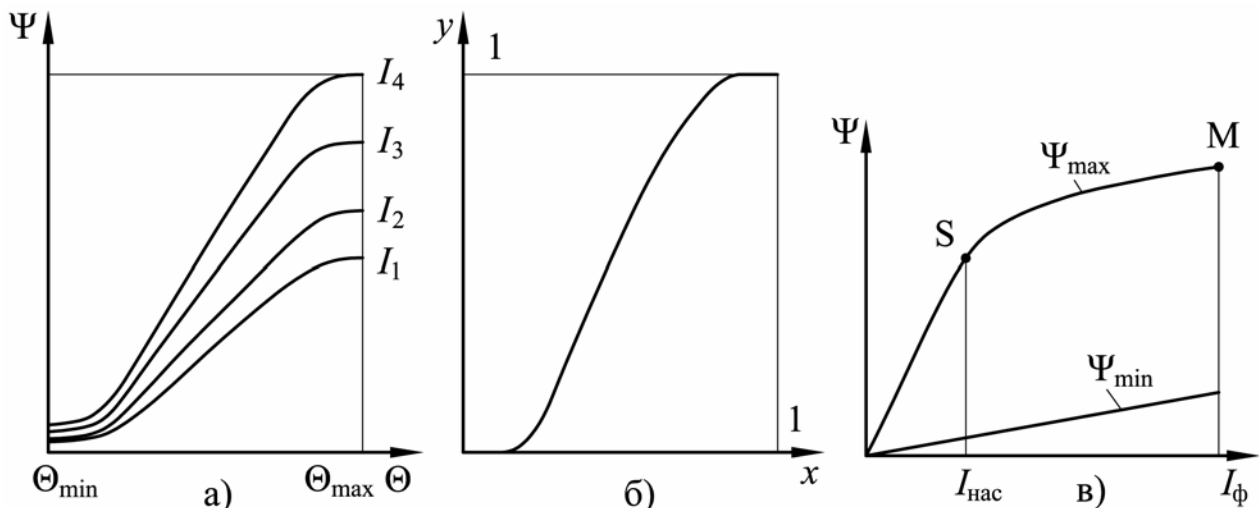


Рис. 4. Зависимости  $\Psi(\Theta)$  (а), нормированная  $y(x)$  (б) и  $\Psi(I_\phi)$  (в)

Усредненная кривая  $y(x)$  (см. рис. 4, б) получила в литературе название «кривой Миллера». Характерный вид кривых  $\Psi_{\min}(I_\phi)$  и  $\Psi_{\max}(I_\phi)$  показан на рис. 4, в.

Фазный ток  $I_\phi$  определяется из решения уравнения (1) при подстановке выражений для  $\Psi_{\min}(I_\phi)$  и  $\Psi_{\max}(I_\phi)$ . Общее выражение для фазного момента  $M_\phi$



с учетом принятых обозначений принимает вид:

$$M = \frac{1}{\Theta_{\max} - \Theta_{\min}} \frac{dy(x)}{dx} \cdot \int_0^{I_{\phi}} (\Psi_{\max} - \Psi_{\min}) dI_{\phi}. \quad (3)$$

С использованием приведенных выражений модель одной фазы ВИД в среде Matlab-Simulink реализована, как показано на рис. 5. В этой модели в подсистеме *CM* рассчитываются значения  $\Psi_{\max}(I_{\phi})$  и  $\Psi_{\min}(I_{\phi})$ , в подсистеме *NFI* –  $y(x)$ . В блоке *Algebraic Constraint* в каждый момент времени определяется значение фазного тока  $I_{\phi}$ , при котором выполняется равенство (1). Подсистема *NFI* рассчитывает также значения  $dy(x)/dx$  в зависимости от текущего значения угла  $\Theta$ , а блок *Product2* – момент фазы  $M_{\phi}$  по выражению (3).

Важно заметить, что при использовании этого способа построения модели за счет соответствующего изменения вида зависимости  $y(x)$  появляется возможность достаточно просто исследовать влияние геометрических параметров ВИД на алгоритмы управления.

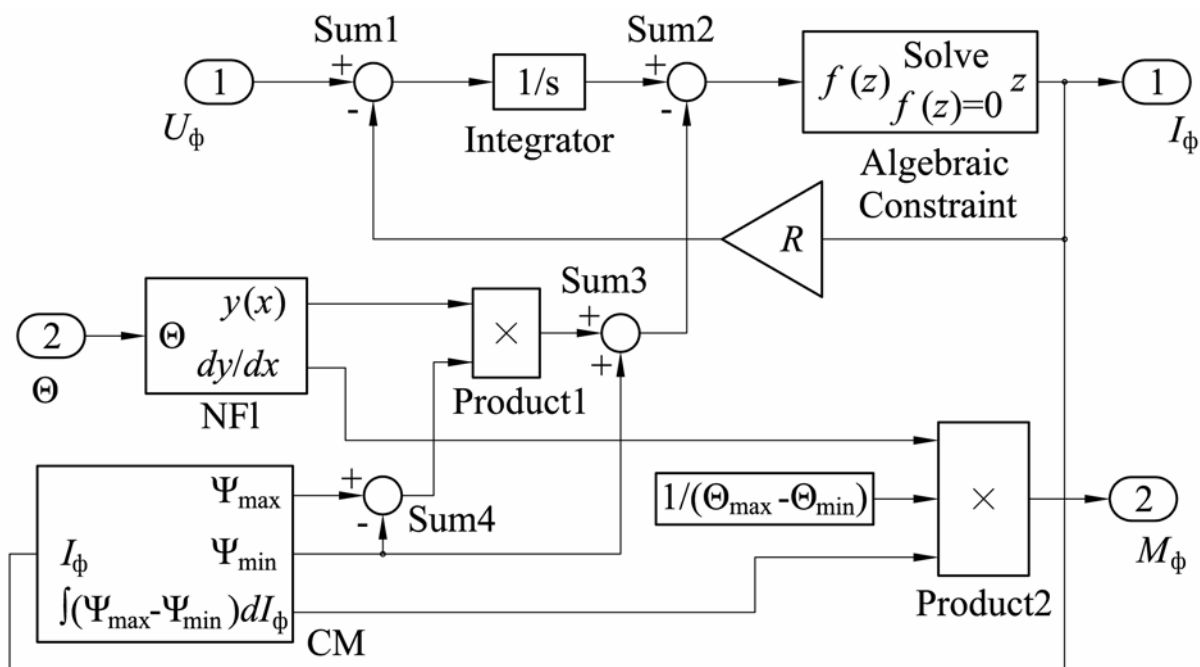


Рис. 5. Имитационная модель фазы ВИД на основе «кривых Миллера»

Кроме того, достоинства рассмотренного метода состоят в следующем:

- 1) Высокая скорость вычислений благодаря использованию простых аналитических зависимостей, позволяющих достаточно точно учитывать все нелинейности двигателя;
- 2) Компактность и простота реализации модели (отсутствует необходимость формирования двумерных массивов данных как в методе табличного задания);
- 3) Легкость настройки модели на определенный тип ВИД путем изменения коэффициентов в математических выражениях.

В заключительной части главы приведены результаты экспериментальных исследований процессов в ВИД. Сопоставление расчетных кривых изменения тока и момента с экспериментальными данными позволило сделать вывод о том,

что предлагаемая модель адекватна реальному объекту и может быть использована для поиска алгоритмов управления моментом ВИД.

**В третьей главе** решаются задачи регулирования среднего момента ВИД в зоне «низких» и «высоких» скоростей. Проведена оценка работы ВИД с предложенным регулятором среднего момента.

### *Регулирование среднего момента в зоне «низких» скоростей*

В наиболее простых случаях при регулировании среднего момента ВИД в зоне низких скоростей используется разомкнутое управление, обеспечивающее  $I_\phi = I_{\text{ref}} = \text{const}$  на рабочем интервале  $\gamma_{\text{раб}}$  ( $I_{\text{ref}}$  – заданное значение тока).

Ранее с использованием кусочно-линейной аппроксимации магнитных характеристик ВИД получены достаточно простые законы согласованного изменения управляющих воздействий  $U_\phi$  и  $\gamma_{\text{вкл}}$  для обеспечения  $I_\phi = I_{\text{ref}} = \text{const}$ . Однако, проведенные исследования показывают, что при этом возникают существенные отклонения (до 50%) действительного значения тока и момента от заданного, т.к. кусочно-линейная аппроксимация только в первом приближении отражает реальный характер кривых намагничивания двигателя.

В работе с использованием разделения переменных в функции  $\Psi(I_\phi, \Theta)$  по методу Миллера получены следующие выражения для фазного напряжения  $U_\phi$  и угла включения  $\gamma_{\text{вкл}}$ :

$$U_\phi = \frac{\partial \Psi}{\partial \Theta} \cdot \omega = \frac{\Psi_{\text{max}} - \Psi_{\text{min}}}{\Theta_{\text{max}} - \Theta_{\text{min}}} \frac{dy(x)}{dx} \cdot \omega, \quad (4)$$

$$\gamma_{\text{вкл}} = \frac{(\Theta_{\text{max}} - \Theta_{\text{min}})}{dy(x_{\text{рас}})/dx} \left[ y(x_{\text{рас}}) + \frac{\Psi_{\text{min}}}{(\Psi_{\text{max}} - \Psi_{\text{min}})} \right]. \quad (5)$$

Из (4) следует, что, если на рабочем этапе  $\gamma_{\text{раб}}$  принять  $dy/dx = \text{const}$ , значение напряжения  $U_\phi$ , необходимое для поддержания постоянного тока  $I_{\text{уст}}$ , зависит только от разности  $\Psi_{\text{max}} - \Psi_{\text{min}}$ , которая, в свою очередь, является функцией тока.

На рис. 6, а представлена зависимость напряжения в относительных единицах  $U_\phi^* = U_\phi / U_{\text{баз}}$  от тока  $I_{\text{уст}}^* = I_{\text{уст}} / I_{\text{нас}}$  ( $I_{\text{нас}}$  – ток насыщения), построенная с использованием экспериментальных зависимостей  $\Psi_{\text{max}}$  и  $\Psi_{\text{min}}$  по выражению (4) (сплошная линия) и при кусочно-линейной аппроксимации (штриховая линия); здесь  $U_{\text{баз}} = I_{\text{нас}} \omega \cdot dL(\Theta) / d\Theta$ . Видим, что в линейном режиме (без насыщения) характеристики совпадают, при локальном насыщении полюсов зависимость (4) становится нелинейной.

На рис. 6, б представлена зависимость угла включения в относительных единицах  $\gamma_{\text{вкл}}^* = \gamma_{\text{вкл}} / \gamma_{\text{баз}}$  от тока  $I_{\text{уст}}^* = I_{\text{уст}} / I_{\text{нас}}$ , построенная по выражению (5) (сплошная линия) и при кусочно-линейной аппроксимации; здесь  $\gamma_{\text{баз}} = L(\Theta_{\text{рас}}) / (dL(\Theta_{\text{рас}}) / d\Theta)$ .

Моделированием установлено, что найденные законы изменения управляющих воздействий позволяют снизить до 10% отклонения тока и электромагнитного момента на интервале работы фазы от заданных значений.

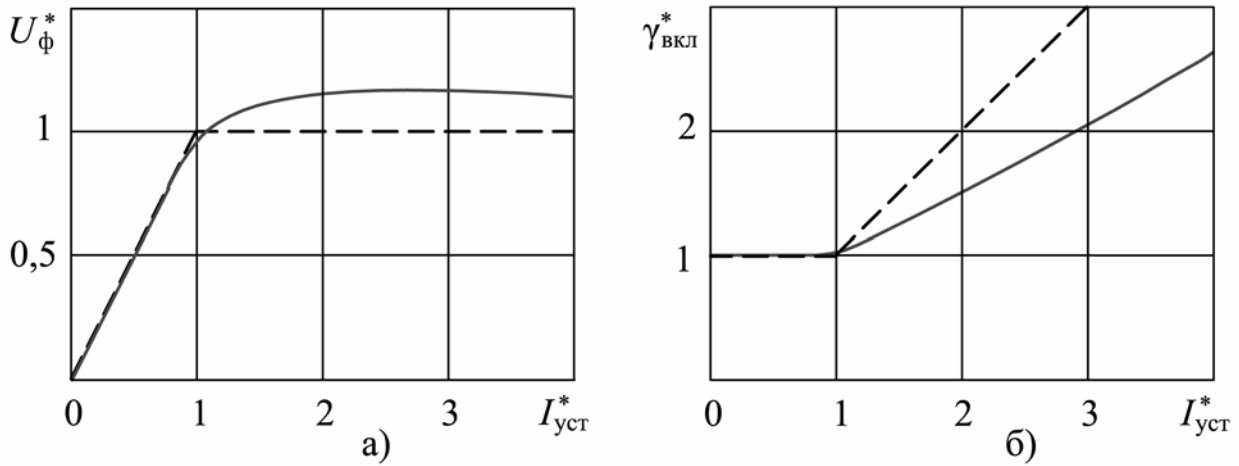


Рис. 6. Зависимости  $U_{\phi}^*$  и  $\gamma_{\text{вкл}}^*$  от тока

### Регулирование среднего момента в зоне «высоких» скоростей

Известно, что в зоне высоких скоростей воздействовать на среднее значение момента можно только за счет изменения длительности интервалов включения  $\gamma_{\text{вкл}}$ , работы  $\gamma_{\text{раб}}$  и отключения фазы  $\gamma_{\text{откл}}$ .

Так как смещение угла отключения  $\Theta_{\text{ком}}$  позволяет лишь незначительно улучшить энергетические показатели ВИД, не влияя на качество движения, предлагается метод регулирования среднего момента в зоне высоких скоростей только за счет изменения углового положения включения фазы  $\Theta_{\text{вкл}}$ . Такой подход существенно упрощает учет нелинейностей ВИД и позволяет полученные законы регулирования распространять на некоторый класс машин с подобными характеристиками. На рис. 7 изображена функциональная схема предлагаемого регулятора. Выходной величиной является задание угла включения фазы  $\gamma_{\text{вкл}}$ , в соответствии с которым преобразователь П формирует прямоугольные импульсы напряжения.

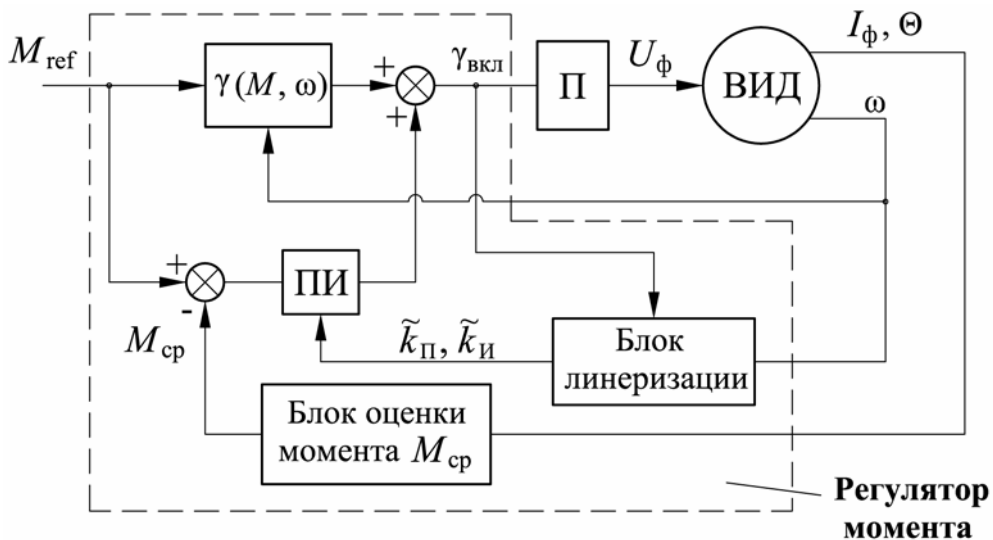


Рис. 7. Функциональная схема регулятора среднего момента в зоне высоких скоростей

Основным возмущающим фактором, влияющим на изменение среднего момента, является изменение скорости  $\omega$ . При постоянной скорости зависимость среднего момента  $M_{\text{ср}}$  от угла включения фазы  $\gamma_{\text{вкл}}$  носит нелинейный характер.

Из анализа семейства характеристик  $M_{cp}(\gamma_{вкл}, \omega)$  следует, что в первом приближении их можно представить в виде произведения двух функций, каждая из которых зависит только от одной переменной.

$$M_{cp} = k_a M_{баз} \cdot f(\gamma_{вкл}) \cdot g(\omega), \quad (6)$$

где  $M_{баз}$  – базовый момент:  $M_{баз} = \frac{1}{2} \frac{dL(\Theta)}{d\Theta} I_{нас}^2$ ;

$k_a$  – постоянный коэффициент, зависящий от геометрических параметров машины и значения угла коммутации  $\Theta_{ком}$ .

Тогда значение угла включения можно определить в виде обратной функции  $f^{-1}$ :  $\gamma_{вкл} = f^{-1}\left(\frac{M_{ref}}{k_a M_{баз} \cdot g(\omega)}\right)$ . (7)

Так как характеристики  $M_{cp}(\gamma_{вкл})$  представляют собой гладкие функции, при создании замкнутого контура регулирования среднего момента возможно использование линеаризации по методу касательных. При ПИ-регулировании коэффициенты регулятора:

$$\tilde{k}_{П} = \frac{k_{П}}{\partial M_{cp} / \partial \gamma_{вкл}}; \quad \tilde{k}_{И} = \frac{k_{И}}{\partial M_{cp} / \partial \gamma_{вкл}}, \quad (8)$$

где  $k_{П} = \text{const}$ ,  $k_{И} = \text{const}$  – коэффициенты передачи пропорциональной и интегральной составляющих регулятора, соответственно.

Из выражения (6): 
$$\frac{\partial M_{cp}}{\partial \gamma_{вкл}} = k_a M_{баз} \cdot \frac{df(\gamma_{вкл})}{d\gamma_{вкл}} \cdot g(\omega). \quad (9)$$

При обработке характеристик  $M_{cp}(\gamma_{вкл}, \omega)$  ВИД с одной из наиболее распространенных конфигураций магнитной системы 8/6 (8 зубцов на статоре и 6 зубцов на роторе) получены универсальные выражения для функций  $f^{-1}$ ,  $f'_\gamma$  и  $g$  в кусочно-полиномиальном виде.

При моделировании показано, что рассмотренный подход к управлению моментом ВИД обеспечивает его *заданные динамические свойства* в замкнутой структуре управления.

**В четвертой главе** предлагается структура системы управления мгновенным моментом ВИД с использованием нелинейного регулятора и компенсацией ЭДС движения. Рассмотрены особенности управления моментом ВИД при линеаризации его характеристик в окрестности рабочей точки.

**Структурная схема ВИД при управлении мгновенным моментом**

Уравнение электрического равновесия фазы в операторной форме:

$$U_\phi - E_{дв} = [1 + T_{эkv}(I_\phi, \Theta) \cdot p] \cdot I_\phi R_\phi,$$

где  $p = d/dt$  – оператор дифференцирования;  $T_{эkv}(I_\phi, \Theta) = L_{диф}(I_\phi, \Theta)/R_\phi$  – эквивалентная электромагнитная постоянная времени фазы;  $L_{диф}$  – дифференциальная индуктивность;  $R_\phi$  – активное сопротивление фазной обмотки. ЭДС движения:  $E_{дв} = k_E(I_\phi, \Theta) \cdot \omega$ . Зависимость электромагнитного

момента от тока:  $M_\phi = k_M(I_\phi, \Theta) \cdot I_\phi$ , где  $k_E(I_\phi, \Theta) = k_M(I_\phi, \Theta)$  – нелинейные коэффициенты.

Уравнение движения:  $M_\Sigma - M_c = J \frac{d\omega}{dt}$ , где  $M_c$  – момент сопротивления,  $J$  – момент инерции вращающихся масс.

С использованием приведенных выражений получена структурная схема многофазного ВИД (на рис. 8 показана схема только для одной фазы). Она внешне напоминает структурную схему машины постоянного тока при управлении электромагнитным моментом по цепи якоря, однако, в отличие от последней, содержит нелинейные элементы и перекрестные связи (на рисунке они показаны тонкими линиями).

Анализ схемы показывает, что для того, чтобы каждую фазу ВИД, находящуюся под током, можно было бы рассматривать, как управляемый источник момента, необходимо в общем случае компенсировать влияние переменной ЭДС движения, уменьшить влияние переменной электромагнитной инерционности фазы и компенсировать нелинейную связь между током и моментом.

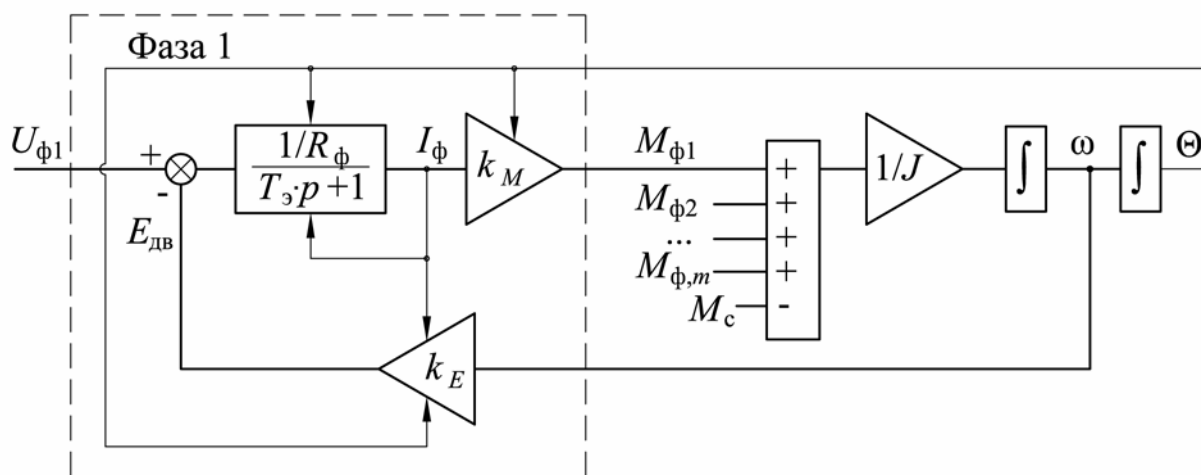


Рис. 8. Структурная схема  $m$ -фазного ВИД

### Регулятор мгновенного момента ВИД

Предлагается регулятор, содержащий пропорциональный канал с переменным коэффициентом  $k_p$  и канал компенсации с выходным сигналом  $U_k$  (см. рис. 9). Коэффициент передачи регулятора  $k_p$  находится по следующей формуле:

$$k_p = k_0 \cdot \frac{L_{\text{диф}}}{\partial M_\phi / \partial I}, \text{ где } k_0 = \text{const.}$$

Как известно, наиболее характерным режимом функционирования ВИД является чередование работы одной фазы и одновременной работы двух смежных фаз (перекоммутация фаз).

При работе одной фазы должно компенсироваться падение напряжения на её активном сопротивлении, ЭДС движения и изменение фазного момента в зависимости от углового положения. При одновременной работе двух фаз

необходимо регулировать момент одной из фаз с учетом изменения момента в смежной фазе. В общем случае, сигнал компенсации

$$U_k = I_\phi R_\phi - \frac{L_{\text{диф}}}{\partial M_\phi / \partial I} \left( \frac{\partial M_\phi}{\partial \Theta} \omega + \frac{dM_{\phi j}}{dt} \right) + E_{\text{дв}}, \quad \text{где } \frac{dM_{\phi j}}{dt} - \text{ темп изменения}$$

момента смежной фазы.

Схема предлагаемого регулятора мгновенного момента изображена на рис. 9. Главной отличительной особенностью является то, что все наиболее значимые нелинейности двигателя учтены в *замкнутом* контуре момента. Задание фазного напряжения рассчитывается как сумма сигнала на выходе пропорционального регулятора с переменным коэффициентом  $k_p$  и сигнала компенсации, рассчитываемого нелинейным преобразователем НП1. Ключ К переключает вход задания напряжения между сигналами  $-U_{\text{пит}}$ ,  $+U_{\text{пит}}$  и выходом нелинейного регулятора, формируя этапы включения и отключения.

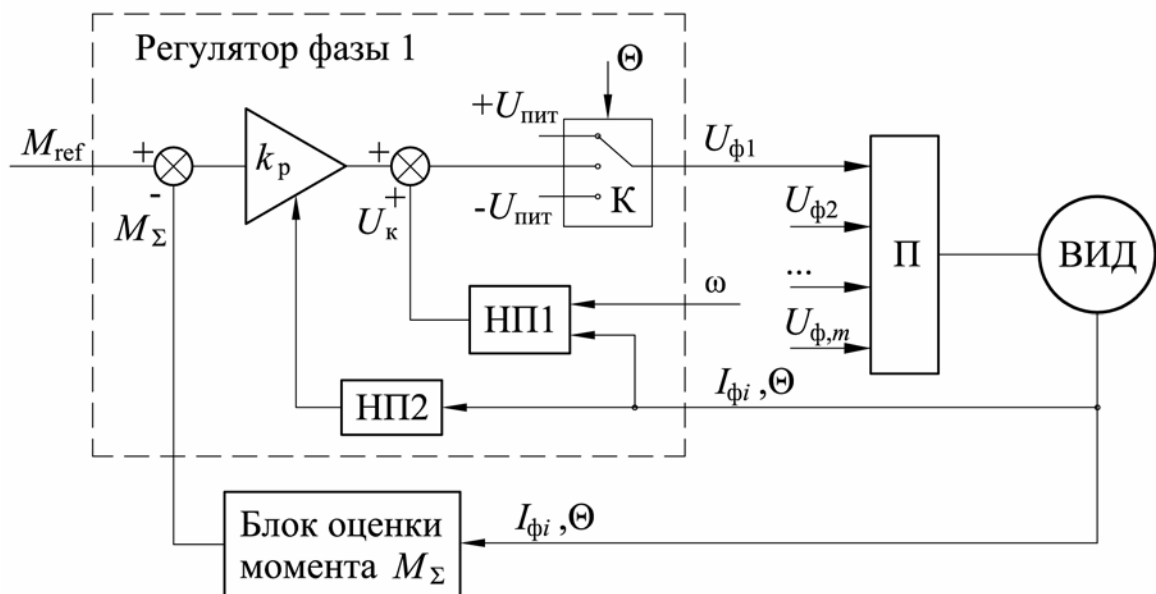


Рис. 9. Регулятор мгновенного суммарного момента ВИД

С помощью разработанной модели проведено исследование системы, содержащий предлагаемый регулятор момента. Контур скорости синтезирован традиционными методами. Результаты моделирования подтверждают что, предлагаемый алгоритм позволяет компенсировать характерные нелинейности системы. Изменение скорости и нагрузки не влияет на вид переходного процесса изменения электромагнитного момента ВИД.

Однако, по причине того, что такой алгоритм управления весьма сложен и сопряжен с большим объемом вычислений, дополнительно предлагается упрощенный подход к регулированию мгновенного момента ВИД.

В некоторых режимах, основную долю момента каждая фаза производит на интервале  $\gamma_{\text{раб}}$ , и влиянием этапов её включения и отключения можно пренебречь. Как показали исследования, в данном случае можно регулировать мгновенное значение момента только на угловом интервале  $\gamma_{\text{раб}}$ , не устраняя пульсаций момента на этапе перекоммутации фаз и косвенно обеспечивая равенство среднего момента моменту фазы на интервале работы  $M_{\text{ср}} = M_{\text{раб}}$ .

### Линеаризация ВИД в окрестности рабочей точки

Особенностью ВИД является то, что даже при малых изменениях суммарного момента и скорости фазные ток момент в каждом цикле коммутации изменяются в широких пределах. Поэтому использовать процедуру линеаризации нелинейных характеристик ВИД в окрестности рабочей точки можно только формально, а получаемые при этом результаты требуют особой оценки и обсуждения.

При моделировании установлено, что синтез системы управления ВИД на этой основе позволяет получать динамические характеристики не выше, чем в системах регулирования среднего момента. При переходе на режим работы отличный от «расчетного» динамические характеристики существенно ухудшаются.

**В пятой главе** рассмотрены вопросы прямого управления электромагнитным моментом ВИД. Разработаны новый метод управления и реализующий его регулятор, позволяющие практически полностью устранить принципиально присущие этим машинам пульсации момента, как в двигательном, так и в генераторном режимах работы. Сформулированы требования к аппаратным функциям контроллера системы управления с учетом специфики данного алгоритма при его цифровой реализации.

Прямое управление моментом ВИД является аналогом известного подхода к управлению асинхронным двигателем. Этот метод управления является наиболее перспективным для ВИД при компенсации пульсаций момента  $M_{\Sigma}$ . Задачей прямого управления является обеспечение быстрой реакции электромагнитного момента на изменение управляющего воздействия. Для этого используется коммутация ключей преобразователя непосредственно в функции отклонения действительного значения момента от заданного  $\delta M$ . На рис. 10 представлена предлагаемая структура регулятора.

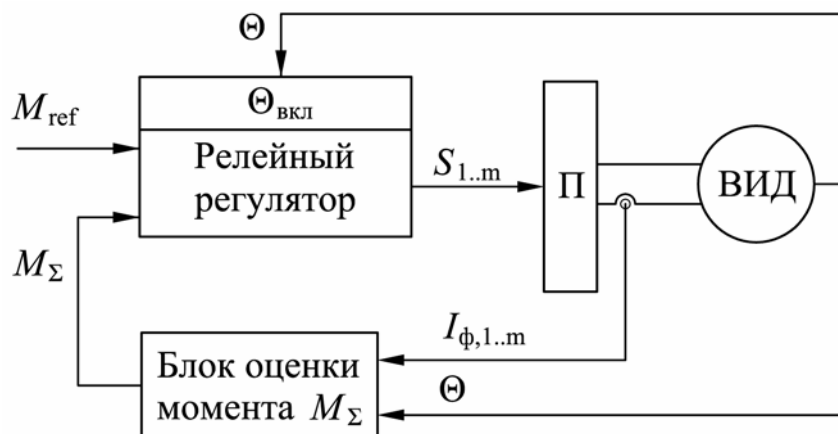


Рис. 10. Структура прямого регулятора момента ВИД ( $S$  – сигналы управления ключами преобразователя П)

Алгоритм работы регулятора фазы « $n$ » следующий:

1) Включение фазы:  $U_{\phi} = +U_{пит}$  при  $\Theta \geq \Theta_{вкл}$ . Суммарный момент регулируется за счет воздействия на напряжение фазы « $n-1$ » (нумерация фаз в порядке чередования работы).

2) Переход на релейное регулирование момента по сигналу от фазы « $n-1$ ».

3)  $U_{\phi} = -U_{\text{пит}}$ , если  $\delta M > 2\Delta_M$  ( $\Delta_M$  – зона гистерезиса релейного регулятора) при условии, что включена фаза « $n+1$ », одновременно происходит подача сигнала перехода фазы « $n+1$ » на 2-ой этап. Т.е. фаза « $n$ » больше не в состоянии поддерживать суммарный момент на заданном уровне.

4) Конец цикла работы фазы:  $U_{\phi} = 0$  при  $I_{\phi} = 0$ .

**Определение параметров регулятора скорости в структуре с подчиненным контуром прямого управления моментом**

При исследованиях многоконтурной системы управления ВИД следует учитывать ограничение, связанное с низким темпом изменения момента на высоких скоростях. Реально темп изменения момента зависит от многих переменных: скорости; фазного тока; углового положения ротора; напряжения источника питания, а так же от количества одновременно работающих фаз. Моделирование показывает, что определяет характер переходных процессов ограничение темпа *нарастания* момента на этапе работы одной фазы в режиме локального насыщения  $dM_{\phi, \text{lim}}/dt$ . При кусочно-линейной аппроксимации магнитных характеристик:

$$\frac{dM_{\phi, \text{lim}}}{dt} = \frac{dL(\Theta)}{d\Theta} \cdot I_{\text{нас}} \cdot \frac{U_{\text{пит}} - \frac{dL(\Theta)}{d\Theta} \cdot I_{\text{нас}} \cdot \omega}{L_{\text{рас}}}, \quad (10)$$

где  $L_{\text{рас}}$  – индуктивность фазы при начале перекрытия полюсов  $\Theta_{\text{рас}}$ .

Моделирование показывает, что переходной процесс остается апериодическим при значении коэффициента передачи регулятора скорости

$$k_{\text{р.с.}} \leq \frac{2 \cdot J}{M_{\text{max}}} \frac{dM_{\phi, \text{lim}}}{dt}, \quad (11)$$

где  $M_{\text{max}}$  – максимально допустимое значение момента.

Из (10) и (11) следует, что коэффициент  $k_{\text{р.с.}}$  можно увеличивать с уменьшением скорости. Таким образом, можно при малых скоростях повышать быстродействие и статическую точность системы.

**Определение допустимой частоты дискретизации сигналов управления при цифровой реализации прямого регулятора момента**

В настоящее время, как правило, регуляторы реализуются на базе программируемых логических контроллеров (ПЛК). Вследствие запаздывания сигналов по времени при цифровой реализации релейного регулятора регулируемая величина выходит из зоны его гистерезиса. Ошибка тем больше, чем выше скорость изменения регулируемой величины и больше период дискретизации  $\tau$ . В зависимости от того, в какой момент времени проводится оценка значения момента, запаздывание при переключении может составить от одного до двух  $\tau$ . В предлагаемом методе управления используется двухзонное релейное регулирование, поэтому предлагаемый алгоритм будет работоспособен до тех пор, пока за время равное  $2\tau$  изменение момента не превысит зоны гистерезиса  $\Delta_M$ .



При условии, что зона гистерезиса мала, можно считать, что момент изменяется линейно во времени, тогда  $\tau_{\max} = \frac{\Delta M}{2dM_{\max}/dt}$ . Здесь также можно использовать упрощенную оценку темпа изменения момента по формуле, полученной на основе кусочно-линейной аппроксимации:

$$\frac{dM_{\max}}{dt} = \frac{dL(\Theta)}{d\Theta} \cdot I_{\text{нас}} \cdot \frac{U_{\text{пит}}}{L_{\text{рас}}}. \quad (12)$$

Для экспериментального образца ВИП 5 кВт  $\tau_{\max}$  составляет порядка 50-150 мкс, что близко к требованиям аппаратной части современных систем управления приводом переменного тока.

Предложенный регулятор момента ВИД имеет следующие преимущества по сравнению с известными регуляторами при минимизации пульсаций момента: высокая устойчивость к изменению возмущающих факторов, таких как изменение скорости, напряжения, температуры; высокая точность (ошибка регулирования момента 2-3%) и быстроедействие; минимальные требования по форсировкам питающего напряжения (15-20%).

**В заключении** приведены выводы по работе.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Проведен сравнительный анализ известных принципов построения систем управления вентильно-индукторных двигателей. Показано, что они в недостаточной степени учитывают особенности ВИД и, как следствие, не позволяют добиться высоких показателей качества управления.

2. Создана имитационная модель вентильно-индукторного двигателя на основе «нормированных кривых Миллера» с базовой системой управления, максимально приспособленная для синтеза её новых элементов.

3. Уточнены законы согласования управляющих воздействий регулятора среднего момента ВИД в зоне «низких» скоростей. Предложен новый принцип построения и работы регулятора *среднего* момента при работе ВИД в зоне «высоких» скоростей.

4. Разработана новая структура замкнутой системы управления *мгновенным* моментом ВИД с использованием регулятора с переменными параметрами, дополнительными обратными связями и компенсацией ЭДС движения.

5. Разработаны регулятор прямого управления моментом ВИД, позволяющий снизить требования по запасу питающего напряжения, и методика определения параметров регулятора скорости при прямом управлении моментом. Найдена зависимость допустимой частоты дискретизации сигналов управления от требуемой точности поддержания момента и параметров вентильно-индукторного двигателя при цифровой реализации регулятора.

6. Проверена работоспособность предлагаемых регуляторов и подтверждена их эффективность.

**Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:**

1. Красовский А.Б., Кузнецов С.А., Трунин Ю.В. Моделирование магнитных характеристик вентильно-индукторных машин // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия «Естественные науки». – 2007. – №4(27). – С. 57-77.
2. Красовский А.Б., Кузнецов С.А. Особенности замкнутого управления моментом вентильно-индукторного электродвигателя // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия «Естественные науки». – 2009. – №3(34). – С. 84-102.
3. Кузнецов С.А. Учет нелинейных свойств вентильно-индукторных машин в алгоритмах управления // Системы управления и информационные технологии. – Воронеж: Научная книга, 2008. – № 4(34). – С. 82-86.
4. Кузнецов С.А. Формирование типовых режимов работы вентильно-индукторного двигателя с учетом его нелинейных свойств // Актуальные проблемы фундаментальных наук: Сборник трудов. – М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. – С. 155-157.
5. Красовский А.Б., Кузнецов С.А. Использование «кривых Миллера» в имитационных моделях вентильно-индукторных машин // Современные проблемы информатизации в проектировании и информационных системах: Сб. трудов. – Воронеж: Научная книга, 2008. – Вып. 13. – С. 418-419.
6. Кузнецов С.А. Уточненные алгоритмы формирования типовых режимов вентильно-индукторных двигателей // 14-я междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика»: Тез. докл. в 3-х т. – М.: Издательский дом МЭИ, 2008. – Т.2. – С. 112-113.
7. Красовский А.Б., Кузнецов С.А. Применение линеаризующих обратных связей для улучшения динамических свойств вентильно-индукторного электропривода // Современные проблемы информатизации в моделировании и социальных технологиях: Сб. трудов. – Воронеж: Научная книга, 2009. – Вып. 14. – С. 219-220.