

## СИНТЕЗ ХАРАКТЕРИСТИК ВЕНТИЛЬНОГО РЕАКТИВНОГО ПРИВОДА С МИКРОПРОЦЕССОРНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

Васильев Л.А., Мнускин Ю.В.

Донецкий государственный технический университет  
Yuri@mn.dc.donetsk.ua

*A new mathematical model of switched reluctance motor (SRM) is offered in this article, mechanical characteristics of motor are received and analyzed at the different ways of control. A possibility of synthesis characteristics of SRM with microprocessor control is shown.*

Последнее десятилетие развития электропривода отличается все большим использованием микропроцессорных технологий для более гибкого и полного использования возможностей электродвигателей. Во многом этот процесс обусловлен развитием микроэлектроники и силовой электроники. Достижения науки и техники в этих областях позволяют поднять на новую ступень развития существующие виды электропривода (асинхронный и коллекторный электропривод), а также дают толчок для создания и исследования новых видов электропривода, таких как тяговый вентильный электропривод на основе вентильных реактивных двигателей, имеющих пассивный ротор.

Для электропривода с вентильными реактивными двигателями (ВРД) характерна неразрывная связь между электромеханическим преобразователем и микропроцессорным устройством управления (МУУ), которое обеспечивает как алгоритм функционирования собственно двигателя, так и требуемые характеристики привода в целом. Можно отметить, что использование традиционных электродвигателей переменного тока совместно с МУУ обходится более дорогостоящим, чем аналогичных ВРД за счет меньшей стоимости последних и более простых схем силового преобразователя. Последнее имеет место в связи с тем, что фазный ток ВРД однопроводный.

Вопросам проектирования и теории вентильного реактивного привода (ВРП) посвящено немало число трудов как зарубежных, так и отечественных исследователей [1-3]. Однако, как правило, они затрагивают лишь общие вопросы. Как указано в [3], актуальными являются задачи структурного анализа и синтеза замкнутых систем ВРП, сравнения различных законов управления. Также остается недостаточно раскрытой предпочтительная область применения такого привода. Этим обусловлена данная публикация.

Одной из наиболее информативных характеристик двигателя можно считать механическую характеристику. Для ВРД с МУУ существует возможность реализовывать требуемый вид механической характеристики с ограничениями по свойствам электродвигателя и возможностям источника энергии.

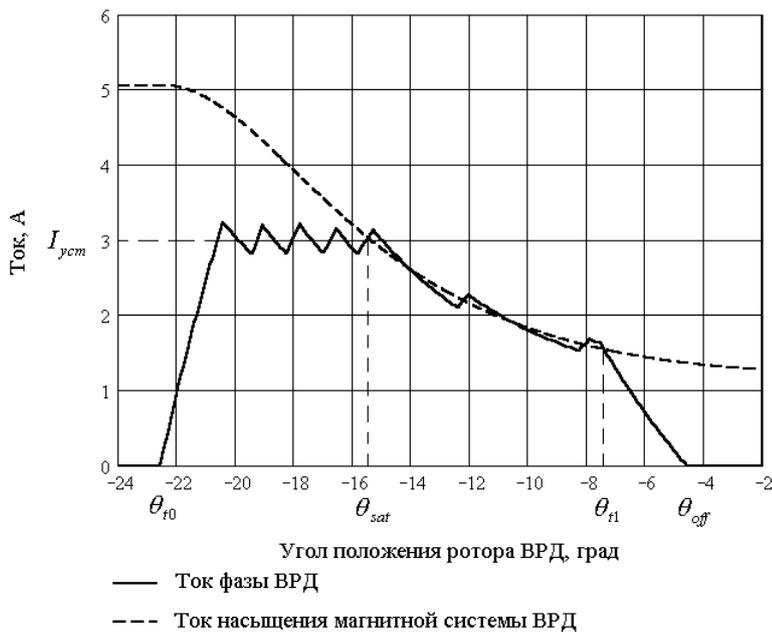


Рисунок 1 – Управляющие параметры ВРД

Расчет механической характеристики ВРД является сложной задачей, которую с достаточной точностью можно решать путем расчета электромагнитных и механических процессов на математической модели ВРП.

Основной сложностью при расчете механической характеристики ВРД является большое количество управляющих параметров и сложная форма тока. Так, например, синусоидальный ток полностью описывается амплитудой, частотой и фазой. Для сравнения, ВРД имеет следующие управляющие параметры, характеризующие ток двигателя (рисунок 1): ток уставки  $I_{уст}$ ; ток насыщения  $I_{sat}$ , соответствующий угловому положению ротора  $\theta_{sat}$ , при котором достигается насыщение магнитной системы ВРД; угол включения тока фазы  $\theta_{t0}$ ; угол выключения тока фазы  $\theta_{t1}$ ; угол  $\theta_{off}$ , при котором ток фазы спадает до 0. Скорость нарастания тока сильно зависит от ЭДС источника пита-

ния. При изменении этих параметров форма тока фазы ВРД может изменяться от прямоугольной до трапецидальной и даже треугольной.

Поскольку форма тока фазы ВРД изменяется в широких пределах, то расчет механической характеристики ВРД можно выполнить путем последовательного расчета токовой характеристики для определенных значений угловой скорости ротора с последующим определением формы мгновенного момента и значения среднего момента ВРД.

Исследования механической характеристики выполнены на разработанной авторами математической модели ВРП, позволяющей исследовать статические и динамические процессы при произвольном варьировании управляющих параметров ВРД.

Модель описывает электромагнитные процессы в ВРП при следующих допущениях: идеализированные электронные ключи в силовом преобразователе электропривода, представленные активным сопротивлением; аппроксимированная гладкой функцией кривая намагничивания стали  $\psi(i, \theta)$ , кусочно-аппроксимированная теоретическая или представленная рядом Фурье экспериментальная зависимость проводимости магнитной цепи  $\Lambda(\theta)$ , отсутствие взаимного магнитного влияния фаз друг на друга при совместной работе, динамический и статический момент равны.

Для аппроксимации вебер-амперной характеристики фазы была выбрана функция следующего вида:

$$\psi(i, \theta) = a_1 \arctg(a_2(\theta)i),$$

где  $i$  - ток фазы;  $\theta$  - угол положения ротора;  $a_1 = \frac{2\psi_{sat}}{\pi}$ ,  $a_2(\theta) = \frac{W^2 \Lambda(\theta)}{a_1}$  - коэффициенты аппроксимации;

$\psi_{sat}$  - потокосцепление насыщения;  $W$  – общее число витков фазы.

Выбор аппроксимирующей функции обусловлен её простотой, всего двумя коэффициентами аппроксимации, возможностью аналитического дифференцирования и интегрирования.

В математической модели ВРП использована кусочно-аппроксимированная зависимость проводимости магнитной цепи  $\Lambda(\theta)$ , которая является периодической функцией с периодом

$$T_A = \frac{2\pi}{N_{pom}}$$

и может быть представлена отрезками прямой и косинусоидой

$$\Lambda(\theta) = \begin{cases} \Lambda_{min}, n\pi(-30 \leq \theta < -22,5) \text{ или } (22,5 < \theta \leq 30) \\ \frac{\Lambda_{max} + \Lambda_{min}}{2} + \frac{\Lambda_{max} - \Lambda_{min}}{2} \cos(N_{cm}\theta), n\pi(-22,5 \leq \theta \leq 22,5) \end{cases}$$

где  $N_{pom}$  - число полюсов ротора ВРД;  $\Lambda_{min}$  – минимальное значение проводимости магнитной системы ВРД;  $\Lambda_{max}$  - максимальное значение проводимости магнитной системы ВРД;  $N_{cm}$  – число полюсов статора ВРД.

Электромагнитный момент фазы ВРД определен энергетическим методом через коэнергию магнитного поля  $W_c$ , запасенного в фазе ВРД

$$M(i, \theta) = \left. \frac{\partial W_c}{\partial \theta} \right|_{I=const} = \frac{\partial \left[ \int_0^I \psi(i, \theta) di \right]}{\partial \theta} = \frac{2\psi_{sat}^2}{\pi^2 W^2 \Lambda^2(\theta)} \ln \left[ 1 + \left( \frac{\pi W^2 \Lambda(\theta) i}{2\psi_{sat}} \right)^2 \right] \frac{\partial \Lambda(\theta)}{\partial \theta}. \quad (1)$$

В качестве критерия для определения тока насыщения использовано условие

$$\frac{\partial^2 M(I_{sat}, \theta)}{\partial i} = 0,$$

откуда ток насыщения

$$I_{sat}(\theta) = \frac{2\psi_{sat}}{\pi W^2 \Lambda(\theta)}.$$

Рассчитанные таким образом значения токов соответствуют максимальной скорости нарастания мгновенного момента при изменении тока фазы, при дальнейшем увеличении тока скорость нарастания момента уменьшается, и энергетические характеристики ВРД ухудшаются. Превышение тока насыщения рекомендуется только для увеличения момента при пуске.

Силовой преобразователь по схеме асимметричного полумоста моделируется переключающими функциями ключей  $VT1_j$  и  $VT2_j$ , принимающими значения 0 для закрытого ключа и 1 для открытого. Возможные комбинации состояния ключей определяют три режима коммутации тока фазы: включение тока фазы ( $VT1_j = VT2_j = 1$ ); плавное выключение тока фазы ( $VT1_j = 0, VT2_j = 1$  или  $VT1_j = 1, VT2_j = 0$ ); быстрое (форсированное) выключение тока фазы ( $VT1_j = 0, VT2_j = 0$ ). В зависимости от состояния ключей  $VT1_j$  и  $VT2_j$  задается значение специальной функции  $F_j$ , которая принимает значения 1, 0 и -1 и изменяет вид дифференциального уравнения электрической цепи в соответствии с режимом формирования тока.

Полная математическая модель ВРП после преобразований может быть представлена в следующем виде:

$$\left\{ \begin{array}{l}
 E \cdot F_j = i_j(t) W^2 \frac{\partial \Lambda_j(t)}{\partial t} + W^2 \Lambda_j(t) \frac{\partial i_j(t)}{\partial t} + i_j(t) R_{kj} \\
 \frac{\partial \omega(t)}{\partial t} = \frac{1}{J} \cdot \left[ \sum_j \left[ \frac{2\psi_{sat}^2}{\pi^2 W^2 \Lambda_j^2(t)} \cdot \frac{\partial \Lambda_j(t)}{\partial t} \cdot \ln \left[ 1 + \left( \frac{\pi W^2 \Lambda_j(t) i_j(t)}{2\psi_{sat}} \right)^2 \right] \right] - M_c(\omega(t)) \right] \\
 \frac{\partial \theta(t)}{\partial t} = \omega(t) \\
 F_j = \begin{cases} 1, \text{если } (VT1_j = 1, VT2_j = 1) \\ -1, \text{если } (VT1_j = 0, VT2_j = 0) \\ 0, \text{иначе} \end{cases} \\
 VT1_j = f_1(k_j) \\
 VT2_j = f_2(k_j) \\
 k_j = f_3[t, \theta(t), i(t), I_{ycm}, I_{sat}, \theta_{t0}, \theta_{t1}] \\
 I_{ycm} = f_4(\omega(t)) \\
 I_{sat} = f_5(t) \\
 \theta_{t0} = f_6(\omega(t), I_{ycm}) \\
 \theta_{t1} = f_7(\omega(t)) \\
 \Lambda_j(t) = \frac{A_0}{2} + \sum_{m=1}^{\infty} \left[ A_{mj} \cos(mN_{pom}\theta(t)) + B_{mj} \sin(mN_{pom}\theta(t)) \right] \\
 A_{mj} = \frac{N_{pom}}{\pi} \frac{N_{pom}}{2\pi} \int_0^{2\pi} \Lambda_j(\theta) \cos(mN_{pom}\theta) \\
 B_{mj} = \frac{N_{pom}}{\pi} \frac{N_{pom}}{2\pi} \int_0^{2\pi} \Lambda_j(\theta) \sin(mN_{pom}\theta) \\
 j = 1, 2, \dots, \frac{N_{cm}}{2}; k_j = 0, 1, \dots, 4
 \end{array} \right. \quad (2)$$

где  $E$  – ЭДС источника питания;  $R_{kj}$  – общее активное сопротивление электрической цепи в режиме коммутации  $k_j$ ;  $\alpha(t)$  – угловая скорость ротора;  $J$  – момент инерции привода;  $M_c(\alpha(t))$  – зависимость момента сопротивления от угловой скорости;  $\theta(t)$  – угловое положение ротора ВРД;  $k_j$  – сложная функция управления, реализующая алгоритм формирования тока фазы с учетом управляющих параметров и заданного регулятора тока;  $j$  – номер фазы.

Математическая модель реализована в пакете MathCad 2000 Pro и применена для расчета параметров установившегося режима и механических характеристик экспериментального образца четырехфазного ВРД с МУУ расчетной мощностью 130 Вт, описанным в [4].

Семейство механических характеристик ВРД реализуется при изменении управляющих параметров. С помощью математической модели исследованы три основных способа управления ВРД:

1. управление по уставке тока;
2. управление по уставке напряжения;
3. широтно-фазовое управление [5-6].

Анализ показывает, что возможна комбинация этих способов, которая позволяет получить максимальную энергетическую отдачу электропривода.

Представляет значительный интерес сравнение механических характеристик, реализуемых при каждом из указанных способов управления с целью выработки рекомендаций по использованию того или иного способа управления ВРД при синтезе характеристик для конкретного использования электропривода.

Первый способ – управление по уставке тока – требует достаточно больших интеллектуальных возможностей от МУУ, что связано с наличием обратных связей по угловой скорости и по току фазы. Обратная связь по угловой скорости осуществляется программно по сигналам датчика положения ротора, что связано с непрерывным расчетом угловой скорости и коррекцией управляющих параметров при каждом срабатывании датчика. Обратная связь по току фазы обеспечивается цифровым регулятором (релейным или широтно-импульсным) с помощью соответствующего программного обеспечения. Такой объем вычислений в реальном масштабе времени может выполнить МУУ на цифровом сигнальном процессоре.

С использованием разработанной математической модели получены механические характеристики ВРД при изменении уставки тока в пределах 0,5 – 5 А (рисунок 2). Вид механических характеристик свидетельствует о том, что имеется некоторая предельная характеристика, зависящая от напряжения источника питания и магнитных параметров ВРД. Эта характеристика напоминает гиперболу, т.е. при движении рабочей точки по предельной характеристике мощность на валу остается примерно постоянной, обеспечивается повышенный пусковой момент ВРД и высокая угловая скорость на холостом ходу.

При движении рабочей точки ниже предельной характеристики действует токоограничение в соответствии с уставкой тока, и двигатель работает в режиме источника момента.

Таким образом, управление по уставке тока позволяет эффективно управлять ВРД и реализовать требуемый вид механических характеристик в области, ограниченной предельной характеристикой. Непосредственное управление током фазы обеспечивает высокое быстродействие при его формировании.

Управление по уставке напряжения реализуется путем задания напряжения, питающего силовой преобразователь ВРД. Для регулирования этого напряжения можно использовать широтно-импульсный DC-DC преобразователь, включенный между источником питания и силовым преобразователем. В приводе с таким управлением ток фазы ограничивается путем снижения напряжения на входе силового преобразователя.

На рисунке 3 представлены механические характеристики ВРД с управлением по уставке напряжения. Они рассчитаны при изменении уставки напряжения от 20 до 200 В и напоминают семейство гипербол, причем уставка напряжения существенно влияет на форму гиперболы, а отдельно взятая характеристика соответствует предельной характеристике при управлении по уставке тока.

Как видно из рисунка 3, уставка напряжения существенно влияет на мощность, развиваемую ВРД, а механические характеристики при таком способе управления позволяют успешно использовать ВРД как тяговый без применения специальных алгоритмов. Особенно необходимо отметить, что увеличение мощности на валу ВРД при увеличении уставки напряжения достигается при незначительном изменении потребляемой мощности, т.е. КПД при увеличении уставки напряжения увеличивается, что следует учитывать при проектировании ВРД. В связи с этим приобретают перспективность работы по использованию элементов вольтодобавки в силовом преобразователе ВРД, действие которых эквивалентно

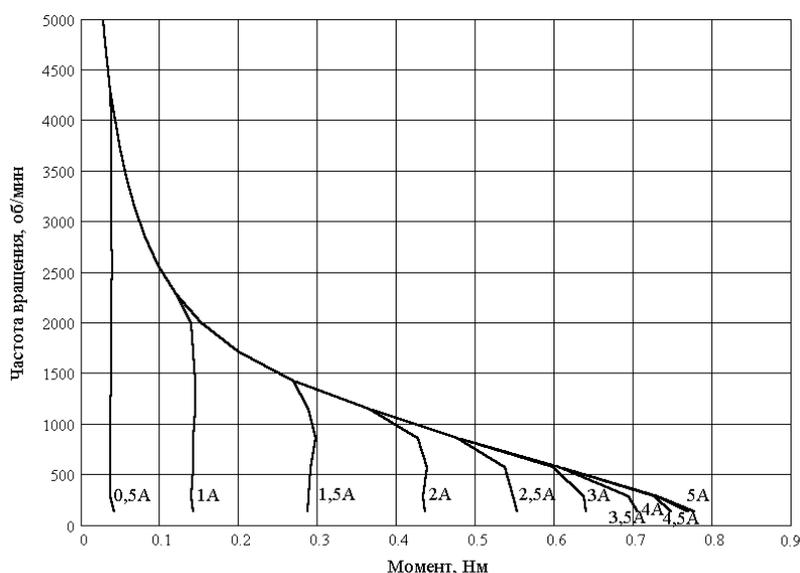


Рисунок 2 – Механические характеристики ВРД при токовом управлении

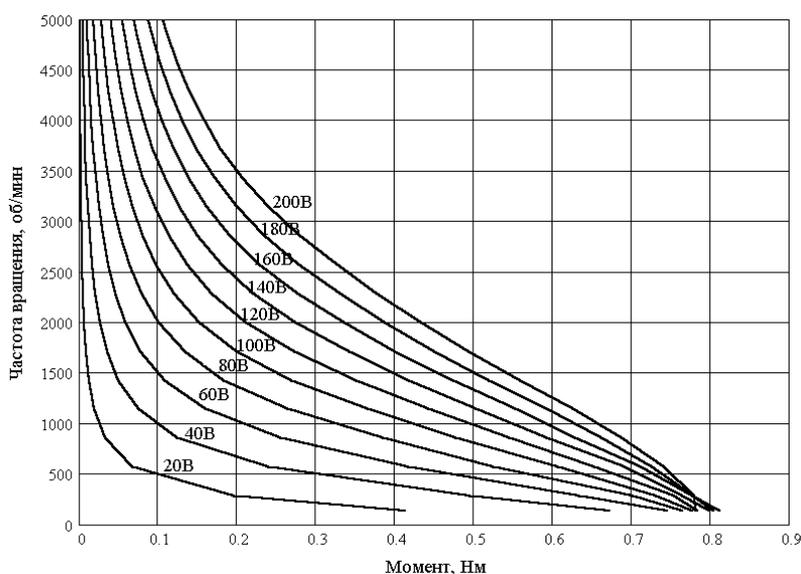


Рисунок 3 – Механические характеристики ВРД при управлении по уставке напряжения

увеличению напряжения источника питания.

Недостатки способа управления по уставке напряжения – сложности аппаратной реализации (дополнительный преобразователь), снижение КПД, пониженное быстродействие привода за счет инерционности фильтра в DC-DC преобразователе.

Широтно-фазовое управление является наиболее простым способом формирования характеристик ВРД и не требует дополнительных аппаратных затрат. Оно может быть реализовано при управлении углом отрывания и закрывания ключей силового преобразователя ВРД. Угол положения ротора определяется по сигналам датчика положения ротора. Длительность открытого состояния ключей определяется угловой скоростью и заданными значениями углов включения и выключения. Поскольку максимум статического момента ВРД приходится на зону в области угла включения, то управление выгоднее осуществлять изменением угла выключения.

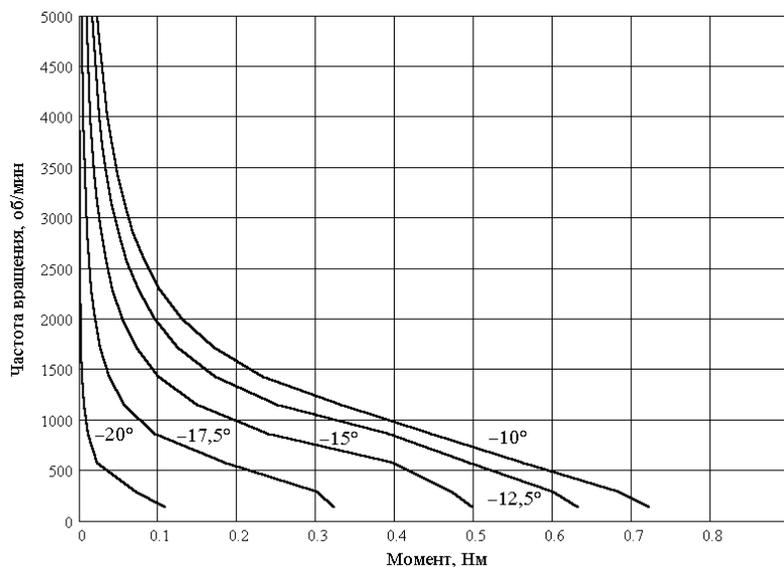


Рисунок 4 – Механические характеристики ВРД при широтно-фазовом управлении

характеристики ВРД и рекомендуется к применению в недорогом маломощном приводе.

Элементы широтно-фазового управления могут удачно сочетаться с другими, более развитыми способами управления, описанными выше. Так, формирование упреждающего угла включения фазы может обеспечить повышение мощности ВРД [6].

Полученные результаты свидетельствуют о перспективности применения ВРП в качестве тягового взамен коллекторного электропривода в транспортных установках. Наиболее гибким можно считать управление по уставке тока с элементами широтно-фазового управления при возможном использовании цепей вольтодобавки. При управлении по уставке тока имеется возможность программно синтезировать механические характеристики ВРД путем получения зависимости уставки тока от частоты вращения ротора и формирования этой зависимости МУУ. Представляет интерес «горячее» изменение характеристик ВРД прямо на эксплуатируемом объекте путем простого перепрограммирования, что может быть полезно в некоторых случаях для оптимизации работы установки. МУУ может содержать в памяти целую библиотеку характеристик и быть универсальным для электроприводов различной мощности и назначения.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Miller T.J.E. Switched reluctance motors and their control. – Oxford: Magna Physics Publishing and Clarendon Press, 1993.
2. В.А. Кузнецов, Л.А. Садовский, В.Л. Виноградов, В.В. Лопатин. Особенности расчета индукторных двигателей для вентильного электропривода. // Электротехника, 1998, №6, с.35-43.
3. Бычков М.Г. Элементы теории вентильно-индукторного электропривода. // Электричество, 1997, №6, с.35-44.
4. Дудник М.З., Васильев Л.А., Мнускин Ю.В. Тяговый вентильно-реактивный электропривод с микропроцессорным управлением.
5. Ткачук В.І. Явнополюсні вентильні реактивні двигуни з буферами енергії. Автореферат дисертації. Львів, 1999.
6. Дудник М.З., Васильев Л.А., Демченко Г.В., Мнускин Ю.В. Цифровая система управления реактивного вентильного двигателя. // Труды ДонГТУ. Серия: электротехника и энергетика. Вып. 2. Донецк, 1998, с.195-198.

Расчетным путем получены механические характеристики ВРД при широтно-фазовом управлении и изменении угла выключения в пределах  $-20 \dots -10$  градусов (рисунок 4). Можно констатировать, что эти характеристики близки по форме к механическим характеристикам, полученным при управлении по уставке напряжения.

Однако при таком способе управления качество работы привода будет более низким. При уменьшении угла выключения фазы резко увеличиваются пульсации момента, в интервале между работой двух соседних фаз появляется провал момента, отсутствие токоограничения может привести к возникновению токовых перегрузок.

Таким образом, этот способ управления позволяет простыми средствами формировать тяговые

# **SYNTHESIS CHARACTERISTICS OF SWITCHED RELUCTANCE MOTOR WITH MICROPROCESSOR CONTROL**

***L. Vasilyev, Y. Mnuskin***

В статье предложена новая математическая модель вентильного реактивного двигателя (ВРД), получены и проанализированы механические характеристики двигателя при различных способах управления. Показана возможность синтеза характеристик ВРД с микропроцессорным управлением.

*A new mathematical model of switched reluctance motor (SRM) is offered in this article, mechanical characteristics of motor are received and analyzed at the different ways of control. A possibility of synthesis characteristics of SRM with microprocessor control is shown.*