

**МОДИФИЦИРОВАННЫЙ МЕТОД УПРАВЛЕНИЯ МОМЕНТОМ ВЕНТИЛЬНО-РЕАКТИВНОГО ДВИГАТЕЛЯ****В. В. Бушер<sup>1</sup>, В. В. Горошко<sup>1</sup>, К. А. Хандакжи<sup>2</sup>**<sup>1</sup>Одесский национальный политехнический университет<sup>2</sup>Тафильский Технический университет, г. Тафила, Иордан

**Аннотация.** Предложен модифицированный метод управления моментом вентильно-реактивного двигателя, основанный на сочетании метода прямого управления моментом и метода предопределенных функций распределения момента. Приведены результаты сопоставления базового метода с косинусоидальной зависимостью с модифицированным методом управления, обоснованы достоинства и недостатки предлагаемого решения.

**Ключевые слова:** вентильно-реактивный двигатель, функции распределения момента, метод управления, пульсации электромагнитного момента.

**Введение**

Вентильно-реактивные двигатели (ВРД) в последние годы привлекают специалистов к их исследованию, о чем свидетельствует активный рост патентов, связанных с данной областью [1, 2]. Причины такой активности объясняются тем, что ВРД обладают существенной дешевизной своей конструкции. Производство электромеханических преобразователей оказывается дешевле даже производства асинхронных двигателей (на роторе нет обмоток, в статорной обмотке используется меди на 40-50% меньше), технология изготовления проще. В среднем, при одинаковых электрических и массогабаритных характеристиках ВРД имеет в 4 раза меньшую стоимость, более широкий диапазон вращения, более высокий диапазон рабочих температур, чем вентильные двигатели с постоянными магнитами [3]. Причиной данных достоинств является явнополюсная структура этих двигателей со стороны статора и ротора. Но это же одновременно становится недостатком, так как электромеханический преобразователь работает в импульсном режиме, что приводит к акустическим шумам, а значительное магнитное насыщение усложняет управления из-за нелинейных зависимостей. Поэтому ВРД все еще немногочисленны и используются в узко направленных сферах [2].

Тем не менее, развитие программного обеспечения (моделирования магнитостатических полей), микропроцессорной техники и силовых ключей позволяют нивелировать вышесказанные недостатки и расширить область применения вентильно-

реактивных двигателей.

Анализ литературы показал, что существуют различные методы по уменьшению пульсаций электромагнитного момента (что касается системы управления): оптимизация углов включения и отключения, применение нечеткой логики или искусственных нейронных сетей и т.д. [4]. Но наибольшее число работ по этой проблеме посвящается методам прямого управления моментом (в западной литературе Direct Instantaneous Torque Control – DITC) и методу функций распределения момента (Torque Shared Function – TSF) и являются наиболее перспективными [5,6]. Однако, несмотря на свою популярность, данные методы имеют свои недостатки. В методе DITC для уменьшения количества переключений ключей используется три региона (определяемые по профилю индуктивности фазы), в которых используются своя структура гистерезисных регуляторов [9]. Для расширения диапазона скорости требуется менять границы регионов, однако, общепринятой методики по определению данных границ нет, что усложняет синтез системы управления. Проще система управления для разных скоростей при использовании метода TSF, при котором необходимо установить только ширину региона коммутации в зависимости от текущей скорости. Но стандартные функции распределения момента при больших скоростях не соответствуют требуемому значению момента, что приводит к дополнительным пульсациям. Решением этой проблемы были модифицированные стандартные функции распределения момента [7]. Однако, ширина региона коммутации при этом остается предопределенной, приходится отрабатывать требуемые задания тока для выключаемой и

включаемой фазы, что приводит к дополнительным переключениям транзисторов.

В работе [8] предложена концепция метода, основанного на согласовании переходных процессов токов в выключаемой и включаемой фазах, однако не описана структура регуляторов, реализующих такой принцип управления.

Поэтому целесообразно разработать такой метод, который в момент переключения одной фазы на другую мог бы поддерживать постоянный электромагнитный момент путем задания такого тока включаемой фазы, при котором ток выключаемой фазы мог без ограничений уменьшаться до нуля без коммутации ключей. Подобный принцип не только позволит снизить количество переключений транзисторов, но при этом уменьшит ширину региона коммутации с неизменным углом включения. Это позволит упростить настройку системы управления во всем диапазоне частот вращения.

### 1. Математическая модель контура момента вентильно-реактивного двигателя

Для упрощения описания процесса преобразования энергии были сделаны следующие допущения в модели электродвигателя:

- фазы магнито-изолированы от друг друга;
- при определении суммарного момента, действующего на ротор, применяется принцип суперпозиции;
- идеализированные силовые ключи;
- внутреннее сопротивление источника равно нулю;
- снижение момента ротора от сопротивления воздуха пренебрегается.

Данные допущения позволяют рассматривать каждую фазу по отдельности и потом развиваемый момент каждой из них суммировать с остальными. Дифференциальные уравнения для отдельной фазы:

$$\begin{cases} u_\phi = i_\phi R_\phi + \frac{d\psi_\phi}{dt} \\ M_\phi = M_c + M_{xx} + J_{\Sigma np} \cdot \frac{d\omega}{dt} \\ \psi_\phi = f(i_\phi, \Theta) \\ M_\phi = f(i_\phi, \Theta) \end{cases}$$

где  $u_\phi, i_\phi, R_\phi, \psi_\phi, M_\phi$  – напряжение, ток, сопротивление, потокосцепление, момент фазы соответственно;  $M_c$  – момент сопротивления на

валу двигателя;  $M_{xx}$  – момент холостого хода;  $J_{\Sigma np}$  – суммарный момент инерции, приведенный к валу;  $\Theta$  – угловое положение;  $\omega$  – угловая частота вращения;  $t$  – время.

Так как  $\psi_\phi = L_\phi \cdot i_\phi$  и нас интересует только контур момента, поэтому можно записать

$$\begin{cases} \frac{d\psi_\phi}{dt} = u_\phi - i_\phi R_\phi \\ i_\phi = \frac{\psi_\phi}{L_\phi} \\ L_\phi = f(i_\phi, \Theta) \\ M_\phi = f(i_\phi, \Theta) \end{cases} \quad (1)$$

На рис. 1 и рис. 2 представлены функции зависимости момента  $M_\phi = f(i_\phi, \Theta)$  и индуктивности  $L_\phi = f(i_\phi, \Theta)$  от углового положения и тока фазы, получены методом конечных элементов в программе FEMM.

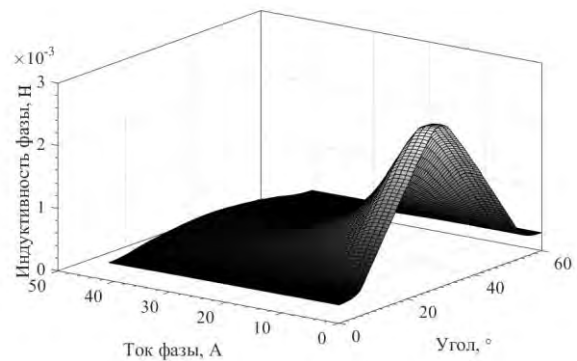


Рис. 1. График зависимости  $L_\phi = f(i_\phi, \Theta)$

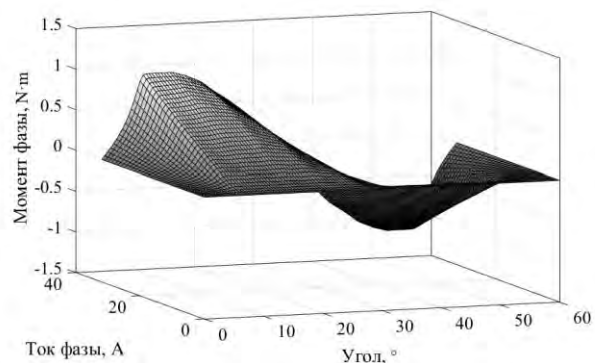


Рис. 2. График зависимости  $M_\phi = f(i_\phi, \Theta)$

Визуально форма статора и ротора двигателя аналогичны с рис. 3, более точные данные предоставлены в табл. 1.

Таблица 1  
Основные параметры ВРД

Параметр	Значение
Количество полюсов статора	8
Количество полюсов ротора	6
Диаметр ротора, mm	28.7
Активная длина ротора, mm	30
Диаметр расточки статора, mm	29
Внутренний диаметр окна статора, mm	42.5
Внешний диаметр статора, mm	53
Ширина зубца статора, mm	5.5
Ширина зубца ротора, mm	6.1
Число витков обмотки фазы	60
Напряжение питания, V	24.2
Суммарная масса стали, kg	0.28
Момент инерции ротора, $kg \cdot m^2$	$7.3 \cdot 10^{-6}$
Активное сопротивление фазы постоянному току, $\Omega$	0.68
Сталь марки	2211

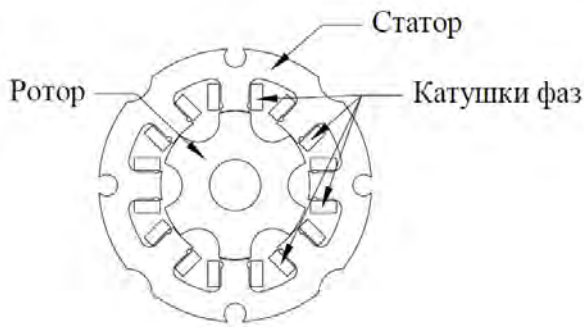


Рис. 3. Магнитная система ВРД

Исходя из системы уравнений (1) можно построить структурную схему для одной фазы, изображенной на рис. 4.

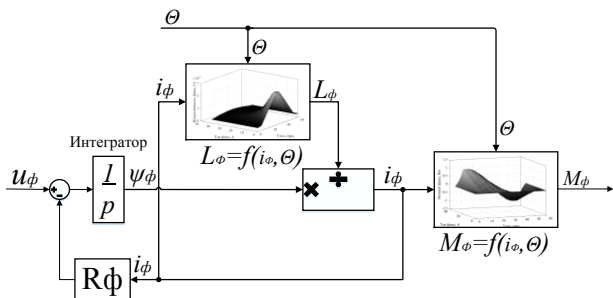


Рис. 4. Структурная схема одной фазы ВРД

После определения структурной схемы для моделирования одной фазы необходимо составить такую же схему для всех четырех фаз. Исходя из допущения суперпозиции момента, составлена структурная схема, изображенная на рис. 5. Как видно скорость двигателя здесь задается как внешний параметр.

Необходимо учесть, что в зависимости от подаваемых сигналов на транзисторы VT1 и VT2 полумостового инвертора и направления тока к катушке будет прикладываться разное напряжение. Варианты состояния силового инвертора показаны на рис. 6.

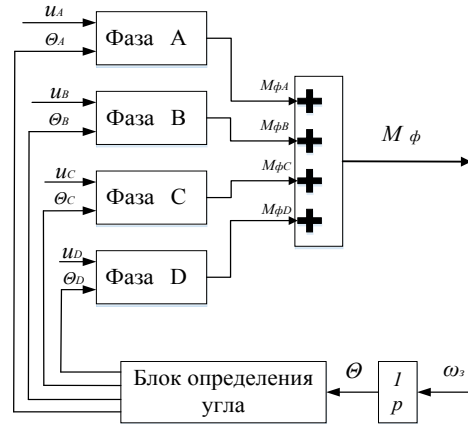


Рис. 5. Структурная схема математической модели ВРД

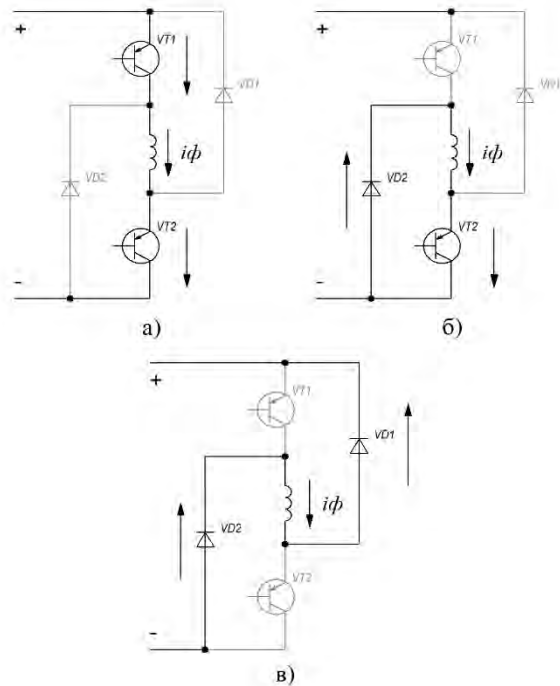


Рис. 6. Силовой инвертор при задании разных сигналов управления: а) – режим «1», б) – режим «0», в) – режим «-1»

В режиме «1» оба транзистора включены и к катушке прикладывается положительное напряжение, ток возрастает. Когда задается режим «0» открывается один транзистор VT2 и будет прикладываться нулевое напряжение и ток будет медленно уменьшаться. В случае режима «-1» оба транзистора закрыты и к катушке прикладывается отрицательное напряжение и ток быстро уменьшается.

## 2. Модифицированный метод управления вентильно-реактивного двигателя

Метод функций распределения момента, используя предопределенную линейную или косинусную форму электромагнитного момента, не обрабатывает требуемого значения при скоростях близких к номинальной, при этом возникают дополнительные пульсации момента. Чтобы это предотвратить, можно расширить регионы коммутации, но это приведет к снижению КПД, так как будут дольше работать одновременно две фазы. Поэтому необходимо, чтобы регионы коммутации были как можно меньше. Также к недостаткам можно отнести то, что включаемая и выключаемая фаза поддерживают заданный ток и это влияет на частоту коммутации ключей, которая также влияет на КПД.

Предложим модифицированный метод, при котором регионы коммутации уменьшаются, количество переключений транзисторов в течение цикла управления одной фазой снижается, при этом пульсации момента находятся на заданном уровне.

Данный модифицированный метод, в отличие от стандартного TSF, не использует строго определенные формы момента в регионе коммутации, а поддерживает суммарный момент, исходя из мгновенного значения тока выключаемой фазы.

Принцип работы заключается в следующем. Сначала определяется, в каком регионе находится каждая фаза. Таких регионов три: регион выключаемой фазы, регион включаемой фазы и бестоковый регион. Регионы для ВРД 8/6 определяется следующим образом:

$$\begin{cases} \Theta_\phi \in [\Theta_{on}; \Theta_{on} + 15^\circ) - \text{регион включения} \\ \Theta_\phi \in [\Theta_{on} + 15^\circ; 30^\circ) - \text{регион выключения} \\ \Theta_\phi \in [0^\circ; \Theta_{on}) \cup [30^\circ; 60^\circ] - \text{бестоковый регион} \end{cases}$$

Далее задается ток для каждой из фаз, исходя из определенного региона и заданного момента  $M_{ref}$ .

Во время перекрытия фаз суммарный момент  $M_\Sigma$  должен быть постоянен:

$$M_\Sigma = M_j + M_{j+1} = M_{ref},$$

где  $M_j$  – момент выключаемой фазы,  $M_{j+1}$  – момент включаемой фазы.

Ток *выключаемой фазы* формируется путем подачи на нее фиксированного напряжения для работы в режимах «0» или «-1». Тогда момент

выключаемой фазы измеряется косвенно с помощью нелинейной зависимости  $M = f(i, \Theta)$ , получаемой, например в FEMM или ANSYS Maxwell.

Затем, исходя из заданного суммарного момента, вычисляется требуемое значение момента для включаемой фазы:

$$M_{j+1} = M_{ref} - M_j$$

По обратной зависимости  $i = f(M, \Theta)$  находится требуемое значения тока для включаемой фазы.

Далее из сигналов задания тока и ее обратной связи вычисляется ошибка, которая подается на релейный регулятор. Структура регулятора зависит в каком регионе находится фаза.

В *регионе включения* реализован регулятор, показанный на рис. 7. В качестве входного сигнала служит собственная ошибка по току в фазе. Структура регулятора позволяет фазе работать в основном в режимах «1» и «0», что позволяет сократить частоту переключения, и только если ток слишком большой, то происходит переключение в режим «-1».

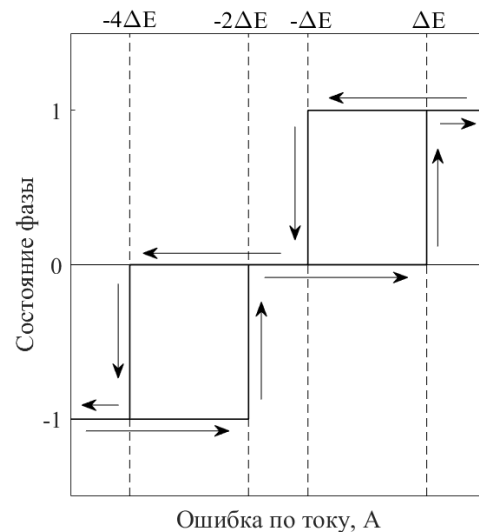


Рис. 7. Релейный регулятор тока для региона включения

В *регионе выключения* управление фазой осуществляется не по собственной ошибке по току, а по ошибке включаемой фазы. Эта связано с тем, что ток включаемой фазы не всегда может быстро нарасти до требуемого значения. Тогда необходимо замедлить темп уменьшения тока выключаемой фазы путем перехода из режима «-1» в режим «0».

Структура регулятора показана на рис. 8. Ширина петли гистерезиса должна быть достаточно большой для уменьшения частоты

переключення, но при злишком великому значенні виникають додаткові пульсації моменту. По результатам моделювання подобрано значення  $5\Delta E$ , при якому отримані найкращі результати.

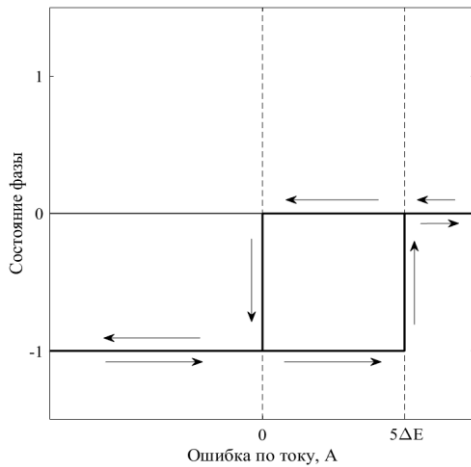


Рис. 8. Релейный регулятор тока для региона выключения

В *бестоковом* регионе ток фазы должен быть равен нулю. Поэтому к фазе подключается регулятор (рис. 7), на который подается нулевое задание.

### 3. Результаты моделирования в MATLAB/Simulink

Модель ВРД и методов управления в Simulink создавалась на основе структурной схемы, изображенной на рис. 9. Так как рассматриваются только быстрые процессы управления моментом, то относительно медленно изменяющийся сигнал скорости  $n$  принимается постоянным и задается как внешний сигнал.

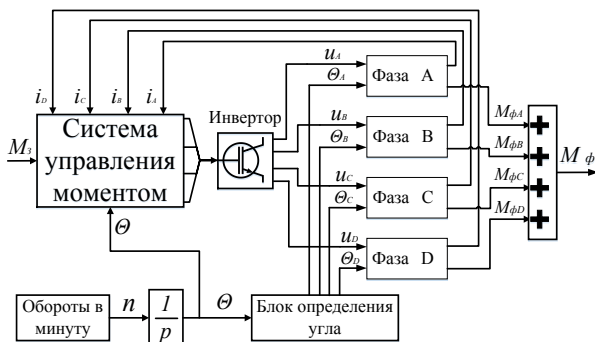


Рис. 9. Блок-схема модели контура управления моментом

Предлагаемый метод управления реализуется в блоке «Система управления моментом», блок-схема которого приведена на рис. 10.

В модели для двигателя с номинальным током 4.4 А задана величина  $\Delta E = 0.1$  А.

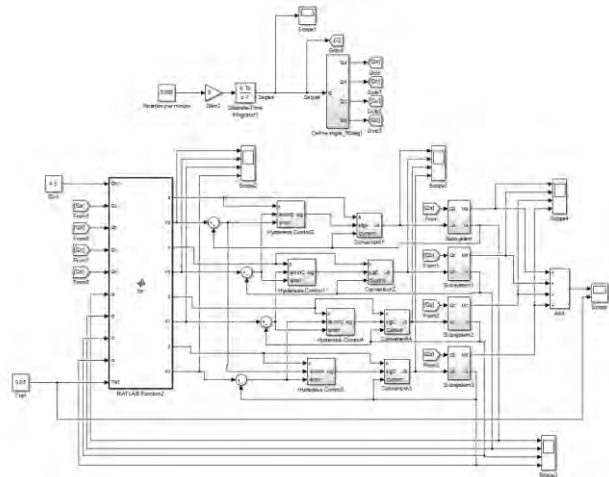


Рис. 10. Модель системы управления контура момента в Simulink

Результаты моделирования представлены на рис. 11. Пульсации электромагнитного момента оценивались по формуле:

$$k = \frac{M_{\max} - M_{\min}}{M_{cp}} \cdot 100\% \quad (2)$$

где  $M_{\max}$  – максимальное значение момента, N·m;  $M_{\min}$  – минимальное значение момента, N·m;  $M_{cp}$  – среднее значение момента, N·m.

В качестве сравнительной оценки электрических потерь в меди применялся интеграл  $\int I^2 dt$ .

На рис. 11 слева изображены результаты моделирования с использованием метода TSF с косинусоидальной зависимостью, а справа – модифицированного метода управления. На рис. 11,а и 11,б скорость задания составляет 100 гр/м, на рис. 11,в и 11,г – 2500 гр/м, на рис. 11,д и 11,е – 5000 гр/м. Сигнал задания момента для всех режимов – 0.05 N·m. Также численные результаты моделирования были сведены в таблицы 2 и 3.

Как видно из рис. 11,а даже при маленькой скорости в методе TSF возникают небольшие пульсации момента, что является результатом нелинейных зависимостей в ВРД и из-за этого ток не может полностью скомпенсировать косинусоидальное распределение момента между фазами. При последующем увеличении скорости (рис. 11,в и 11,д) ошибка по току увеличивается, что приводит к еще большим пульсациям момента.

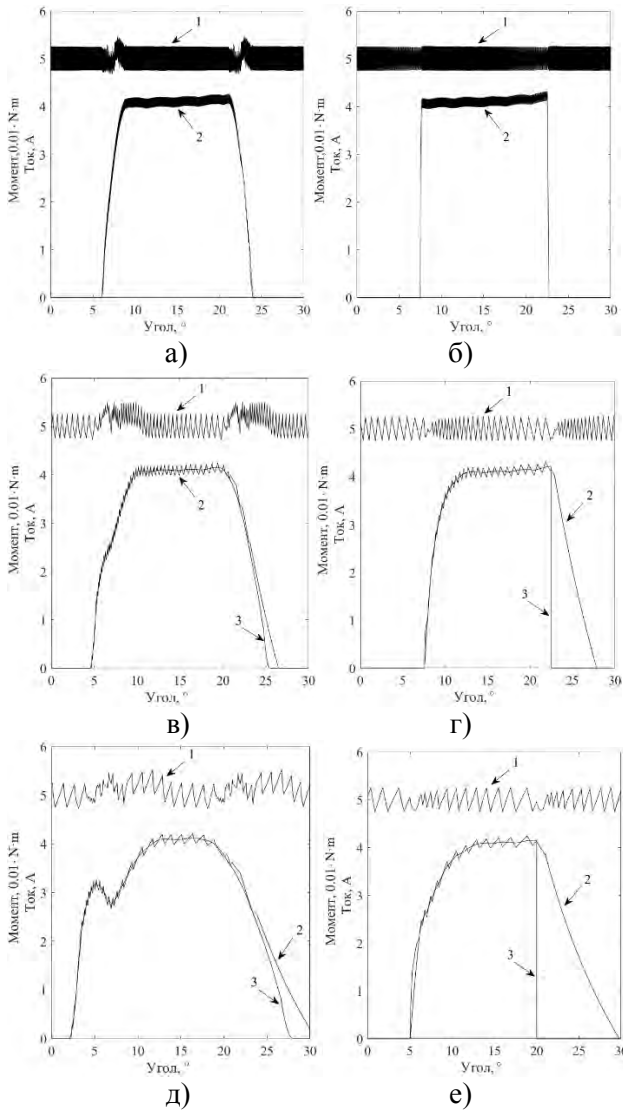


Рис. 11. Результати моделювання для метода TSF (слева) и модифицированного метода (справа): 1 – результуючий електромагнітний момент, 2 – ток фази, 3 – сигнал задания тока.

Таблица 2  
Моделирование с использованием метода TSF с косинусоидальной зависимостью

$n, \text{rpm}$	$Q_{on}, ^\circ$	$\int I^2 dt, \text{A}^2 \cdot \text{s}$	$k, \%$
100	6	0.417	13.4
2500	4.5	0.0173	14.2
5000	2	$9.30 \cdot 10^{-3}$	14.6

Таблица 3

Моделирование с использованием модифицированного метода управления

$n, \text{rpm}$	$Q_{on}, ^\circ$	$\int I^2 dt, \text{A}^2 \cdot \text{s}$	$k, \%$
100	7.5	0.422	10
2500	7.5	0.0170	10
5000	5	$8.62 \cdot 10^{-3}$	10

Для того чтобы пульсации не были слишком велики, в методе TSF приходится уменьшать угол включения  $Q_{on}$ , что позволяет расширить регион коммутации, тем самым дать возможность току отработать задание по току с меньшим погрешностью. Поэтому  $Q_{on}$  зависит в большей степени от скорости (табл. 2), чем в модифицированном методе (табл. 3).

В модифицированном методе управления не требуется обрабатывать заданную (косинусоидальную) зависимость момента, что позволяет удерживать пульсации на заданном уровне на заданных скоростях (табл. 3).

Дополнительно в табл. 2 и 3 приведены значения интеграла  $\int I^2 dt$ , характеризующего тепловые потери в обмотке за один период. Видно, что при средних и высоких скоростях модифицированный метод характеризуется меньшими потерями из-за отсутствия «лишних» пульсаций тока. При малых скоростях у метода TSF небольшое преимущество, так как ток нарастает плавно.

Также модифицированный метод имеет меньшее количество переключения транзисторов (это видно с рис. 11) и ток в фазе не выходит за значения  $30^\circ$ , где генерируется отрицательное значение момента, в то время как в методе TSF при скорости 5000 rpm (рис. 11,д) это происходит, что сказывается на коэффициенте полезного действия.

### Выводы

Предложенный модифицированный метод управления позволяет удерживать пульсации электромагнитного момента на заданном уровне. Метод позволяет снизить электрические потери в зонах средних и близких к номинальным скоростям и предотвращает попадание «хвоста» тока в зону отрицательного генерирования

момента по сравнению с методом TSF, а также снизить количество переключений транзисторов.

Преимущество перед DITC у модифицированного метода в том, что нет необходимости настраивать границы регионов, что упрощает синтез системы управления.

К недостаткам модифицированного метода можно отнести небольшой проигрыш методу TSF в тепловых потерях при малых скоростях и повышенные требования к ресурсам микроконтроллера, так как необходимо хранить в памяти и осуществлять выборки и интерполяцию данных из двух трехмерных таблиц  $M_\phi = f(i_\phi, \Theta)$  и  $i_\phi = f(M_\phi, \Theta)$ . Но эти недостатки, по мнению авторов, компенсируются существенным уменьшением пульсаций момента ВРД.

### Список использованной литературы

1. Кузнецов, В. А. Вентильно-индукторные двигатели: учеб. пособие [Текст] / В. А. Кузнецов, В. А. Кузьмичев; Министерство образования Российской Федерации, Московский энергетический институт – Москва: Издательство МЭИ, 2003. – 70 с.
2. Miller, T. J. E. Electronic control of switched reluctance motors [Text] / T. J. E. Miller. – Glasgow: SPEED Laboratory, 2001. – 272 p.
3. Саввинов, П. В. Обзор вентильно-реактивных двигателей [Электронный ресурс] / П. В. Саввинов, А. С. Семёнов – Режим доступа: <http://www.scienceforum.ru/2013/pdf/4579.pdf>.
4. Shahgholian, G. Torque ripple reduction in switched reluctance motors [Text] / G. Shahgholian, A.R. Sahafi, J. Faiz // *Electromotion*. – 2015. – №22. – P. 35–56.
5. Обзор подходов к снижению пульсаций электромагнитного момента вентильно-индукторного двигателя методами математического моделирования [Текст] / Н. Ф. Карнаухов, М. Н. Филимонов, Д. А. Статовой, А. С. Лыков // *Вестник Донского государственного технического университета, Машиностроение и машиноведение*. – 2016. – №2(85) – С. 51–58.
6. Stella, K. State of the art of switched reluctance motor for torque ripple minimization [Text] / Stella Kurian, G. K Nisha. // *International Journal of Industrial Electronics and Electrical Engineering*. – 2014. – Vol. 2, Issue 12. – P. 68–74.
7. Minimization of Torque-Ripple in Switched Reluctance Motors Over Wide Speed Range [Text] / Milad Dowlathshahi, Seyed Morteza Saghaiannejad, Jin-Woo Ahn and Mehdi Moallem // *J Electr Eng Technol*. – 2014. – Vol. 9, №2. – P. 478–488.

8. A Simple Nonlinear Logical Torque Sharing Function for Low-Torque Ripple SR Drive [Text] / Dong-Hee Lee, Jianing Liang, Zhen-Guo Lee, and Jin-Woo Ahn // *IEEE Transactions on industrial electronics*. – 2009. – Vol. 56, №8. – P. 3021–3028.

9. Moulay, T. L. Torque control [Text] / Moulay Tahar Lamchich. – Rijeka: InTech, 2001. – 252 p.

10. A Review of Torque Ripple Control Strategies of Switched Reluctance Motor [Text] / Xudong Gao, Xudong Wang, Zhongyu Li and Yongqin Zhou // *International Journal of Control and Automation*. – 2015. – Vol. 8, № 4. – P. 103–116.

11. Гулий, М. В. Вентильно-реактивный электродвигун для апаратів штучної вентиляції легенів [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.01: захищена 16.04.10 / Гулий Михайло Вікторович. – Одеса, 2010 – 169 с.

### References

1. Kuznecov, V. and Kuz'michev, V. (2003), *Switched reluctance motors: schoolbook. [Ventil'no-induktornye dvigateli: uchebnoe posobie]*, Moscow: Publisher MEI, 70 p.
2. Miller, T. (2001). *Electronic Control of Switched Reluctance Machines*. Glasgow: SPEED Laboratory, 272 p.
3. Savvinov, P. and Semenov A., Overview of switched reluctance [Obzor ventil'no-reaktivnyh dvigatelej], available at: <http://www.scienceforum.ru/2013/pdf/4579.pdf>.
4. Shahgholian, G., Sahafi, A. and Faiz, J. (2015). Torque ripple reduction in switched reluctance motors. *Electromotion*, 22, pp. 35–56.
5. Karnaukhov, N., Filimonov, M., Statova, D. and Likov A. (2016). Overview of approaches to reducing pulsations of the electromagnetic torque of switched reluctance motor by mathematical modeling methods. *Bulletin of the Don State Technical University* [Obzor podhodov k snizheniju pul'sacij jelektromagnitnogo momenta ventil'no-induktornogo dvigatelja metodami matematicheskogo modelirovanija. *Vestnik Donskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta*], 2(85), pp. 51–58.
6. Stella, K. and Nisha, G. (2014). State of the art of switched reluctance motor for torque ripple minimization. *International Journal of Industrial Electronics and Electrical Engineering*, 2(12), pp. 68–74.
7. Milad, D, Seyed, M., Jin-Woo, A. and Mehdi M. (2014). Minimization of Torque-Ripple in Switched Reluctance Motors Over Wide Speed Range. *J Electr Eng Technol*, 9(2), pp. 478–488.

8. Dong-Hee, L., Jianing, L., Zhen-Guo, L. and Jin-Woo, A. (2009). A Simple Nonlinear Logical Torque Sharing Function for Low-Torque Ripple SR Drive. *IEEE Transactions on industrial electronics*, 56(8), pp. 3021–3028.

9. Jin-Woo, A. (2011). Switched Reluctance Motor. In; T. Moulay, ed., *Torque control*, 1st ed. Rijeka: InTech, pp. 201–252.

10. Xudong, G., Xudong, W., Zhongyu, L. and Yongqin, Z. (2015). A Review of Torque Ripple Control Strategies of Switched Reluctance Motor. *International Journal of Control and Automation*, 8(4), pp. 103–116.

11. Gulyy, M. (2010). *Switched reluctance motor for artificial pulmonary ventilation apparatus*. PhD. Odessa National Polytechnic University.

## A MODIFIED TORQUE CONTROL METHOD FOR SWITCHED RELUCTANCE MOTOR DRIVES

V. V. Busher<sup>1</sup>, V. V. Goroshko<sup>1</sup>, K. Khandakji<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Odessa National Polytechnic University, Odessa, Ukraine

<sup>2</sup>Tafila Technical University, Tafila, Jordan

**Abstract.** *The inherent simplicity and low cost of switched reluctance motors (SRM) make them well suited to many applications. However, high torque ripple is intrinsic in this motor unless a torque ripple control strategy is employed. This paper presents a modified torque control method for SRMs to reduce their torque ripple. The method is based on a combination of instantaneous direct torque control method and torque-shared functions method; maintaining constant torque during the transition from one phase to another, by turning off transistors of the outgoing phase and determining the required current of the incoming phase, thus eliminating the number of switching of the transistors.*

*Simulation results show that the proposed method successfully eliminates the motor torque ripple, especially when the motor runs at the average to the nominal speed, the proposed method is more effective (from the energy point of view) than the method of torque shared functions with a cosinusoidal relationship.*

*The advantages of the modified control method are the simplicity of the control algorithm compared to the direct torque control method, since the adjustment of the ripple level requires one firing angle definition (the value of which varies with the motor speed), and less number of regions in which the structure of the relay regulators changes, which is much simpler than in the direct control as well.*

*The drawbacks of the proposed modified method include small current pulsations in low-speed zones, and increased demands on microprocessor resources caused by the need to process two three-dimensional tables.*

**Keywords:** *switched reluctance motor, torque shared function, method control, electromagnetic torque, torque ripple, direct instantaneous torque control.*

## МОДИФІКОВАНИЙ МЕТОД КЕРУВАННЯ МОМЕНТОМ ВЕНТИЛЬНО-РЕАКТИВНОГО ДВИГУНА

В. В. Бушер<sup>1</sup>, В. В. Горошко<sup>1</sup>, К. А. Хандакжи<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Одеський національний політехнічний університет

<sup>2</sup>Тадільський Технічний університет, м. Тафіла, Йордан

**Анотація.** *Запропоновано модифікований метод керування моментом вентиляно-реактивного двигуна, заснований на поєднанні методу прямого керування моментом і методу визначених функцій розподілу моменту. Наведено результати зіставлення базового методу з косинусоїдальною залежністю з модифікованим методом управління, обґрунтовані переваги і недоліки запропонованого рішення.*

**Ключові слова:** *вентилюно-реактивний двигун, функції розподілу моменту, метод керування, пульсації електромагнітного моменту.*

Получено 17.04.2017





**Бушер Виктор Владимирович**, доктор технических наук, профессор кафедры Электромеханических систем с компьютерным управлением Одесского национального политехнического университета. Просп. Шевченко, 1, Одесса, Украина, 65044.

E-mail: [victor.v.bousher@gmail.com](mailto:victor.v.bousher@gmail.com), тел. +38(050)3908809

**Busher Victor**, Doctor of Science, Professor of Department of Electromechanical Systems with Computer Control, Odessa National Polytechnic University, (ave. Shevchenko, 1, c. Odessa, Ukraine, 65044).

**ORCID ID:** 0000-0002-3268-7519



**Горошко Василий Владимирович**, аспирант кафедры Электромеханических систем с компьютерным управлением Одесского национального политехнического университета. Просп. Шевченко, 1, Одесса, Украина.

E-mail: [vas.goroshko@yandex.ua](mailto:vas.goroshko@yandex.ua), тел. +38(063)6008004

**Goroshko Vasily**, post graduate student of Department of Electromechanical Systems with Computer Control, Odessa National Polytechnic University, (ave. Shevchenko, 1, c. Odessa, Ukraine, 65044).

**ORCID ID:** 0000-0002-7265-2513



**Хандакжи Камаль Абдальмажид**, к.т.н., Доцент кафедры Электротехники и Мехатроники, Тафила Технический Университет, Тафила, Иордания.

**Kamal Khandakji**, Associate Professor, Department of Electrical Power and Mechtronics, Tafila Technical University, Tafila, Jordan.

Email: [drkhandakji@yahoo.com](mailto:drkhandakji@yahoo.com)

**ORCID ID:** 0000-0003-0322-757X