

# СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА РАЗЛИЧНЫХ СПОСОБОВ УПРАВЛЕНИЯ КОММУТАЦИЕЙ ВЕНТИЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПО ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМ ПОКАЗАТЕЛЯМ И РЕГУЛИРОВОЧНЫМ СВОЙСТВАМ\*

С.Г. Воронин, Д.А. Курносков, А.С. Кульмухаметова

Решается задача сравнительной оценки способа коммутации обмотки ВД с точки зрения энергетической эффективности, возможности расширения диапазонов рабочих скоростей и моментов, а также улучшения регулировочных свойств с целью применения его в конкретном электроприводе.

Сравнительная оценка проводилась при одинаковых значениях относительной скорости и относительной индуктивности. Показано, что в двигателях, имеющих относительно небольшие значения индуктивности обмотки якоря, при использовании дискретной коммутации с точки зрения обеспечения максимального значения электромагнитного КПД целесообразно использование 120-градусной коммутации, при этом указанный параметр оказывается не хуже, чем при векторном управлении. В случае большого значения относительной индуктивности 120-градусная коммутация перерождается в 180-градусную, поэтому целесообразно сразу запрограммировать работу двигателя на эту коммутацию. Представлено, что при векторном управлении за счет регулирования угла коммутации вентильного двигателя в функции от скорости вращения ротора появляется возможность не только решать вопросы минимизации энергопотребления двигателя, но и существенно изменять его механические характеристики от характеристик, присущих двигателю постоянного тока независимого возбуждения, до характеристик аналогичных двигателям последовательного возбуждения.

*Ключевые слова:* вентильный электропривод, способы коммутации обмоток, векторное управление, электромагнитный КПД

## 1. Постановка задачи

При выборе типа и принципа построения электропривода чаще всего руководствуются соображениями обеспечения заданного диапазона рабочих скоростей, моментов, минимизации энергопотребления. С точки зрения обеспечения лучших энергетических показателей наиболее перспективными признаны электроприводы с вентильными двигателями (ВД). Существуют различные способы коммутации обмоток ВД. Например, дискретная коммутация – когда вектор поля статора по сигналам датчика положения ротора (ДПР) дискретно перемещается по окружности рашочки статора. Или векторное управление – когда вектор поля осуществляет плавное вращение. Упомянутые способы питания ВД допускают изменение модуля вектора поля статора и его углового положения относительно вектора поля ротора. Данный факт определяет возможность воздействия как на энергетические характеристики, так и на регулировочные свойства двигателя.

Дискретная коммутация обмоток ВД не исключает дешёвых технических решений. Вектор-

ное управление – дороже. Алгоритмы формирования поля статора – ресурсоемки (реализуются лишь специализированными микроконтроллерами). Поэтому возникает задача сравнительной оценки способов коммутации обмоток ВД с точки зрения энергетической эффективности, возможности расширения диапазонов рабочих скоростей и моментов, а также улучшения регулировочных свойств. В статье описано решение этой задачи. Даны рекомендации, позволяющие рационально выбирать способ питания ВД в конкретном электроприводе.

## 2. Методы описания характеристик ВД в установившихся режимах

При векторном управлении ВД можно рассматривать как синхронный двигатель, питающийся от источника синусоидального напряжения с фиксированным значением угла нагрузки ( $\theta$ ) [1, 2], который в теории ВД называют углом коммутации. Тогда в установившемся режиме для определения электромагнитной и потребляемой мощности могут быть использованы выражения, приня-

\* Работа выполнялась при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках комплексного проекта «Создание высокотехнологичного производства модельного ряда энергосберегающих низкопольных трамвайных вагонов модульной конструкции» по договору № 02.G36.31.0002 между Министерством образования и науки Российской Федерации и Федеральным государственным унитарным предприятием «Государственный космический научно-производственный центр имени М.В. Хруничева» в кооперации с головным исполнителем НИОКТР – Федеральным государственным бюджетным образовательным учреждением высшего профессионального образования «Южно-Уральский государственный университет» (национальный исследовательский университет).

тые в теории синхронных машин. В частности, если предположить, что ротор ВД имеет возбуждение от постоянных магнитов и разностью индуктивных сопротивлений по осям  $d$  и  $q$  можно пренебречь, уравнения относительных значений электромагнитной ( $P_э$ ) и потребляемой ( $P_п$ ) мощностей можно записать в виде [3]:

$$P_э = \frac{v \cdot (\cos(\theta) + v \cdot \xi \cdot \sin(\theta) - v)}{1 + \xi^2}, \quad (1)$$

$$P_п = \frac{v \cdot (\xi \cdot \sin(\theta) - \cos(\theta)) + 1}{1 + \xi^2}, \quad (2)$$

где  $v = K\Phi\omega/U$  – относительная скорость двигателя,  $\omega$  – мгновенное значение скорости вращения якоря,  $\Phi$  – мгновенное значение потока,  $K$  – конструктивный коэффициент, который определяется соотношением  $K = pN/2a$ , где  $p$  – число пар полюсов,  $N$ ,  $a$  – соответственно число активных проводников и число параллельных ветвей якорной обмотки;  $\xi = \omega L/R$  – параметр, определенный конструкцией ВД, где  $L$ ,  $R$  – индуктивное и активное сопротивление обмотки.

Электромагнитный КПД ( $\eta$ ) будет определяться отношением электромагнитной мощности к потребляемой

$$\eta = \frac{P_э}{P_п}. \quad (3)$$

При дискретной коммутации трёхфазного ВД распространены два способа коммутации: 180-градусная и 120-градусная [4, 5]. При первом способе на каждом межкоммутационном интервале (МКИ) к шинам источника питания подключаются три фазные обмотки, а при втором – две. Электро-

магнитные процессы, а соответственно, и энергетические показатели двигателя при различных способах коммутации обмоток отличаются. Математические модели, описывающие эти процессы, в настоящее время хорошо отработаны [4, 6–8]. Для расчета рабочих характеристик, определения электромагнитной и потребляемой мощностей, а также КПД можно выбрать любую из них. Использовались модели, описанные в работе [6].

### 3. Сравнительная оценка способов коммутации ВД по энергетическим показателям

Сравнительная оценка всех описанных выше способов коммутации ВД проводилась при одинаковом значении параметра  $\xi$  и  $v$ . В зависимости от способа коммутации, либо по выражениям (1)–(3), либо по моделям, представленным в [4, 6–8], были рассчитаны электромагнитная мощность и электромагнитный КПД двигателя. По результатам расчета были построены зависимости этих величин от угла коммутации  $\theta$  при  $\xi = [0,5; 0,05]$  и  $v = [0,5; 0,8]$ , представленные на рис. 1–4.

Из сравнения полученных зависимостей можно заключить:

1. Для двигателей с относительно малой индуктивностью обмотки ( $\xi < 1$ ) наибольший КПД получаем при 120-градусной коммутации. Немного уступает векторное управление. И худший вариант – 180-градусная коммутация.

2. При  $\xi > 1$  у ВД с векторным управлением

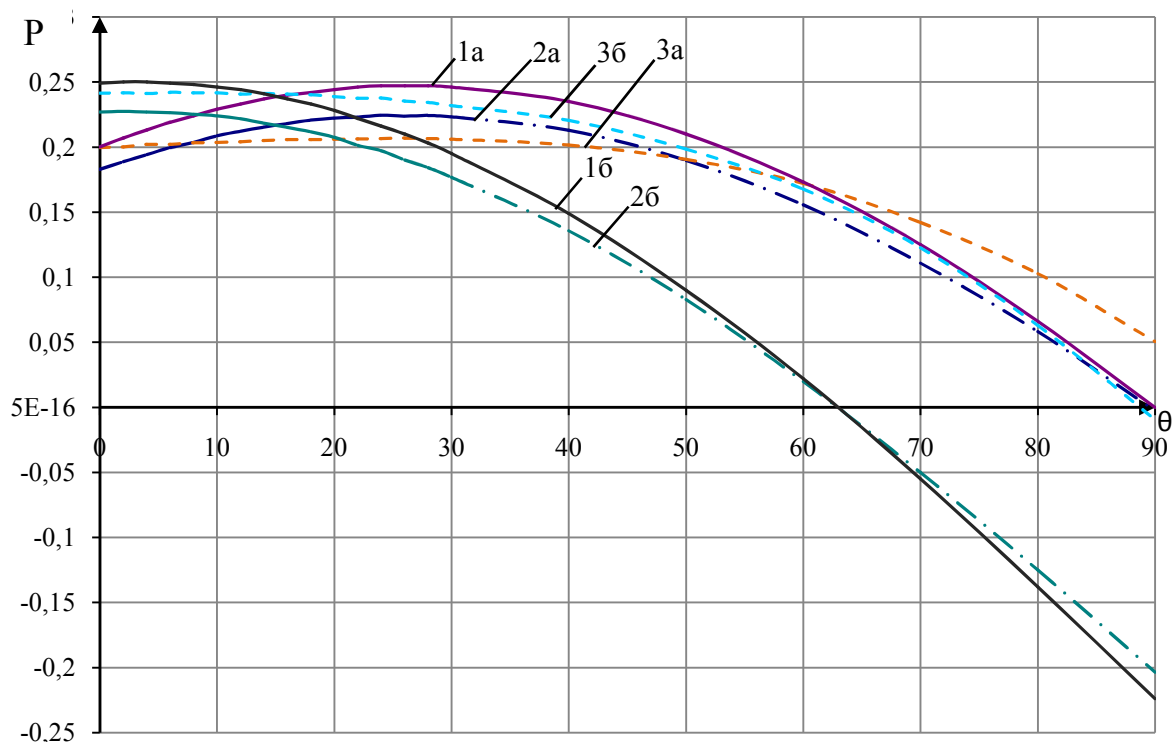


Рис. 1. Зависимость электромагнитной мощности  $P_э$  от угла коммутации  $\theta$  при  $v = 0,5$  для  $\xi = [0,5; 0,05]$ , где 1а –  $P_э$  при векторном управлении для  $\xi = 0,5$ ; 1б – для  $\xi = 0,05$ ; 2а –  $P_э$  при 180-градусной коммутации для  $\xi = 0,5$ ; 2б – для  $\xi = 0,05$ ; 3а –  $P_э$  при 120-градусной коммутации для  $\xi = 0,5$ ; 3б – для  $\xi = 0,05$

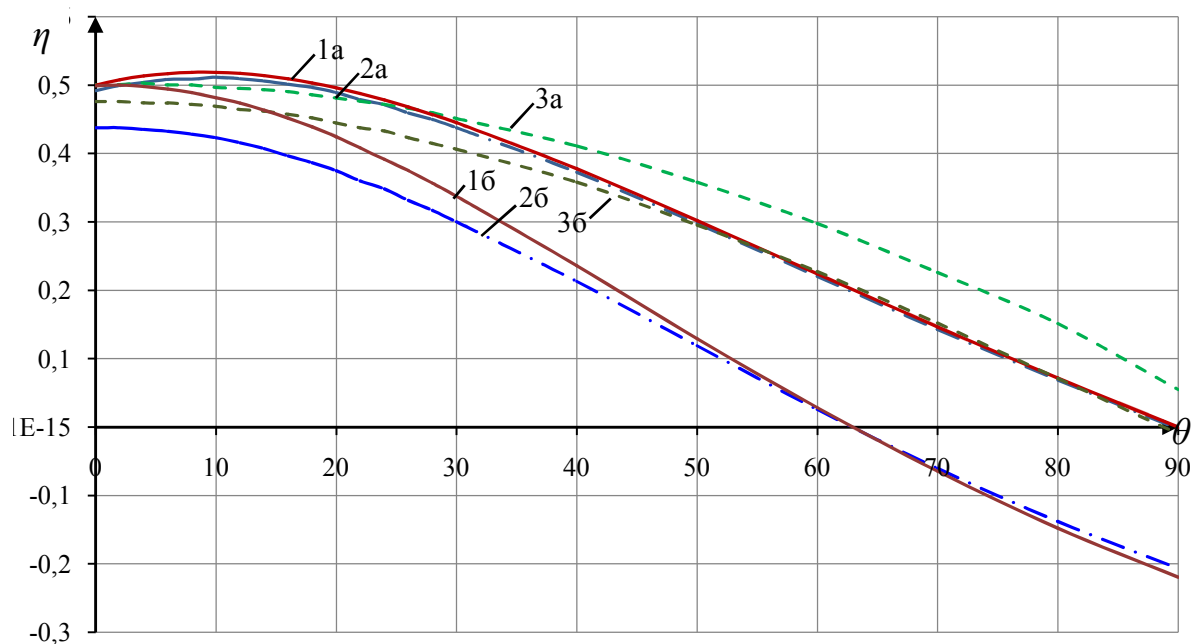


Рис. 2. Зависимость электромагнитного КПД от угла коммутации  $\theta$  при  $\nu = 0,5$  для  $\xi = [0,5; 0,05]$ , где 1а – КПД при векторном управлении для  $\xi = 0,5$ ; 1б – для  $\xi = 0,05$ ; 2а – КПД при 180-градусной коммутации для  $\xi = 0,5$ ; 2б – для  $\xi = 0,05$ ; 3а – КПД при 120-градусной коммутации для  $\xi = 0,5$ ; 3б – для  $\xi = 0,05$

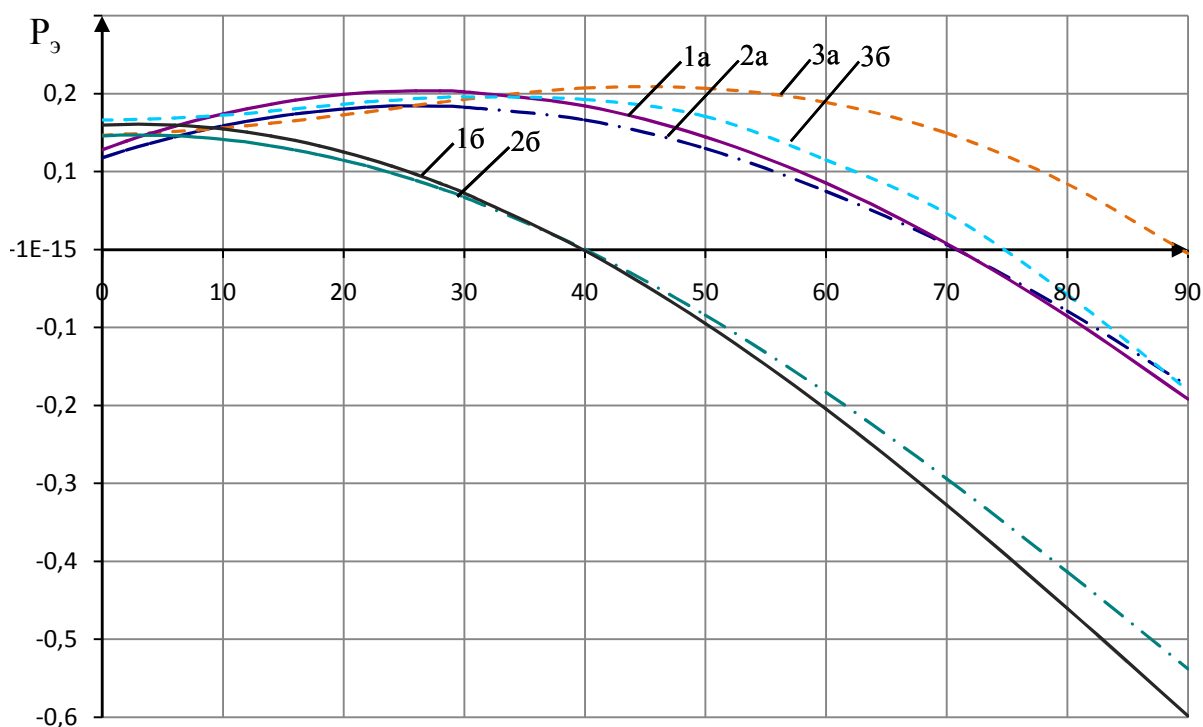


Рис. 3. Зависимость электромагнитной мощности  $P_e$  от угла коммутации  $\theta$  при  $\nu = 0,8$  для  $\xi = [0,5; 0,05]$ , где 1а –  $P_e$  при векторном управлении для  $\xi = 0,5$ ; 1б – для  $\xi = 0,05$ ; 2а –  $P_e$  при 180-градусной коммутации для  $\xi = 0,5$ ; 2б – для  $\xi = 0,05$ ; 3а –  $P_e$  при 120-градусной коммутации для  $\xi = 0,5$ ; 3б – для  $\xi = 0,05$

и со 180-градусной коммутацией зависимости  $\eta(\theta)$  и  $P_e(\theta)$  практически совпадают и имеют максимум по электромагнитной мощности и КПД

3. При 120-градусной коммутации для рассматриваемых значений параметров при изменении угла коммутации от 0 до  $\pi/2$  величина электромагнитной

мощности и КПД с увеличением  $\theta$  падает. Таким образом, для этого способа коммутации, как по электромагнитной мощности, так и по КПД оптимальным является значение угла  $\theta = 0$ .

Можно отметить, что при определённых значениях параметров и скорости вращения ток в от-

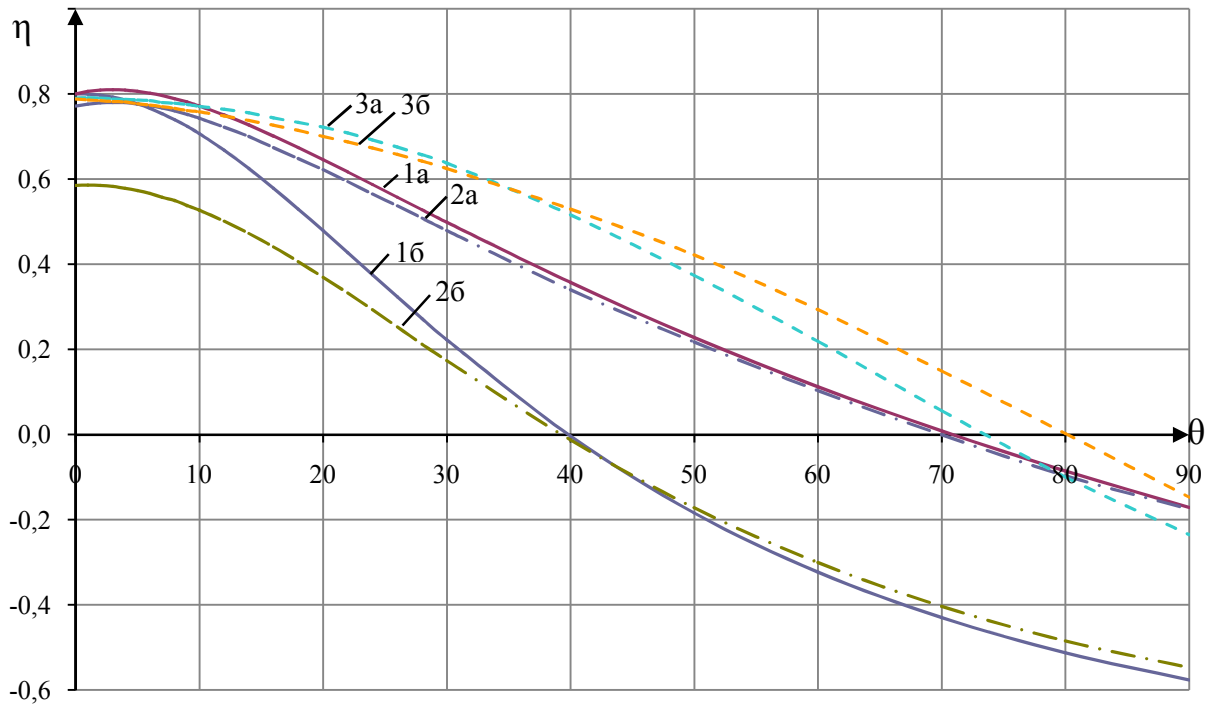


Рис. 4 – Зависимость электромагнитного КПД от угла коммутации  $\theta$  при  $v = 0.8$  для  $\xi = [0,5; 0,05]$ , где 1а – КПД при векторном управлении для  $\xi = 0,5$ ; 1б – для  $\xi = 0,05$ ; 2а – КПД при 180-градусной коммутации для  $\xi = 0,5$ ; 2б – для  $\xi = 0,05$ ; 3а – КПД при 120-градусной коммутации для  $\xi = 0,5$ ; 3б – для  $\xi = 0,05$

ключённой от источника питания секции за один МКИ не успевает затухнуть до нуля. В результате по характеру электромагнитных процессов 120-градусная коммутация перестаёт отличаться от 180-градусной и может быть описана теми же зависимостями. Уравнение для определения условий перехода 120-градусной коммутации в 180-градусную получено в работе [5] и при переходе к принятой нами системе относительных единиц имеет вид

$$C_1 \cdot (1 - b) - C_2 \cdot b = 0,$$

где

$$C_1 = (1 - b) + \frac{(v')^2 \cdot \xi}{1 + (v' \cdot \xi)^2} \cdot \left( \left[ \frac{1}{v' \cdot \xi} \cdot \cos \theta - \sin \theta \right] \cdot b - \left[ \frac{1}{v' \cdot \xi} \cdot \cos \left( \frac{\pi}{3} - \theta \right) - \sin \left( \frac{\pi}{3} - \theta \right) \right] \right);$$

$$C_2 = (1 - b) + \frac{(v')^2 \cdot \xi}{1 + (v' \cdot \xi)^2} \times \left( \left[ \frac{1}{v' \cdot \xi} \cdot \cos \left( \frac{2\pi}{3} + \theta \right) - \sin \left( \frac{2\pi}{3} + \theta \right) \right] \cdot b - \left[ \frac{1}{v' \cdot \xi} \cdot \cos \left( \frac{\pi}{3} + \theta \right) - \sin \left( \frac{\pi}{3} + \theta \right) \right] \right);$$

$$b = e^{-\frac{\pi}{3 \cdot \xi \cdot v}}; \quad v' = \frac{6}{\pi} \cdot v.$$

#### 4. Определение угла коммутации, соответствующего максимальному значению электромагнитного момента или электромагнитного КПД

Если применяется 180-градусная коммутация или векторное управление, значение угла коммутации ( $\theta^{\max}$ ), при котором электромагнитная мощ-

ность имеет максимальное значение, определяется известным соотношением [9]

$$\theta^{\max} = \arctg(\xi). \quad (4)$$

Им можно пользоваться для задания уставки угла коммутации в динамических режимах, когда актуально обеспечение максимального момента двигателя для скорейшего завершения переходного процесса.

Аналитическая зависимость для угла коммутации от скорости вала, при котором достигается максимальный электромагнитный КПД заданного ВД, в элементарных функциях не выражается. Поэтому предлагается пользоваться приближенными аппроксимирующими соотношениями. Для их вывода были проведены численные эксперименты, в результате которых получены значения углов коммутации  $\theta_m$ , соответствующие максимальному электромагнитному КПД и сами значения КПД в диапазоне параметров  $v = (0,1, \dots, 0,9)$  и  $\xi = (0,1, \dots, 1,5)$ . По результатам этого эксперимента методом наименьших квадратов были получены аппроксимирующие зависимости, связывающие  $\theta_m$ ,  $v$  и  $\xi$ . За базовые функции для аппроксимации были приняты полиномы второго и третьего порядка [10]

$$\theta(v, \xi) = C_1 + C_2 \cdot v + C_3 \cdot \xi + C_4 \cdot v \cdot \xi + C_5 \cdot v^2 + C_6 \cdot \xi^2 + C_7 \cdot v^2 \cdot \xi + C_8 \cdot v \cdot \xi^2 + C_9 \cdot v^3 + C_{10} \cdot \xi^3.$$

В результате расчёта полином второго порядка удалось представить в виде

$$\theta(v, \xi) = 7,15 - 28,11 \cdot v + 40,19 \cdot \xi - 34,54 \cdot v \cdot \xi + 21,67 \cdot v^2 - 5,40 \cdot \xi^2. \quad (5)$$

Здесь сумма квадратов ошибки, рассчитанная по методике [11], составляет  $\Delta = 103,21$ , относительная ошибка  $\delta = 0,54\%$ .

Соответственно для полинома третьей степени получим

$$\theta = 1,85 - 15,13 \cdot x + 56,44 \cdot y - 75,69 \cdot x \cdot y + 26,55 \cdot x^2 - 14,86 \cdot y^2 + 18,84 \cdot x^2 \cdot y + 13,95 \cdot x \cdot y^2 - 13,3 \cdot x^3 - 1,03 \cdot y^3. \quad (6)$$

Здесь имеем  $\Delta = 20,154$ ,  $\delta = 0,24\%$ .

Для оценки достоверности соотношений (5) и (6) во всём рабочем диапазоне параметров по ним были рассчитаны и построены зависимости  $\theta_m = f(\xi)$  при различных значениях  $v$ , представленные на рис. 5 (пунктирные – рассчитаны по выражению (5), а штрихпунктирные – по выражению (6)). На том же рисунке сплошными линиями представлены аналогичные зависимости, но полученные путём поиска  $\theta_m$  при известных численных значениях  $v$  и  $\xi$  по выражениям (1)–(3). Сравнение этих кривых показывает, что по выражениям (5) или (6) можно с достаточной для практики точностью находить  $\theta_m$  при решении вопросов оптимизации энергетических показателей привода.

## 5. Регулировочные свойства ВД при управлении путём изменения угла коммутации

Как отмечалось, при векторном управлении имеется возможность регулирования не только

модуля вектора поля статора двигателя при его плавном вращении, но и его углового положения относительно вектора поля ротора. Такая возможность позволяет существенно изменять вид механической характеристики двигателя и его рабочий диапазон скоростей вращения.

На рис. 6 представлены механические характеристики ВД при переменном  $\theta$ , определяемом соотношением (3) при различных значениях  $\xi$ . Кривые показывают, что путем регулирования угла коммутации можно существенно изменять вид механических характеристик от соответствующих двигателю независимого возбуждения до характеристик, соответствующих двигателю последовательного возбуждения. Очевидно, что в зависимости от требований к электроприводу возможно независимое регулирование угла  $\theta$  по любому произвольному закону, который выбирается в соответствии с этими требованиями.

## 6. Заключение

1. В двигателях, имеющих относительно небольшие значения индуктивности обмотки якоря, при использовании дискретной коммутации с точки зрения энергетических показателей целесообразно использование 120-градусной коммутации, при котором этот показатель оказывается не хуже, чем при векторном управлении. При этом наиболее эффективной оказывается нейтральная коммутация ( $\theta = 0$ ), обеспечивающая максимальный для

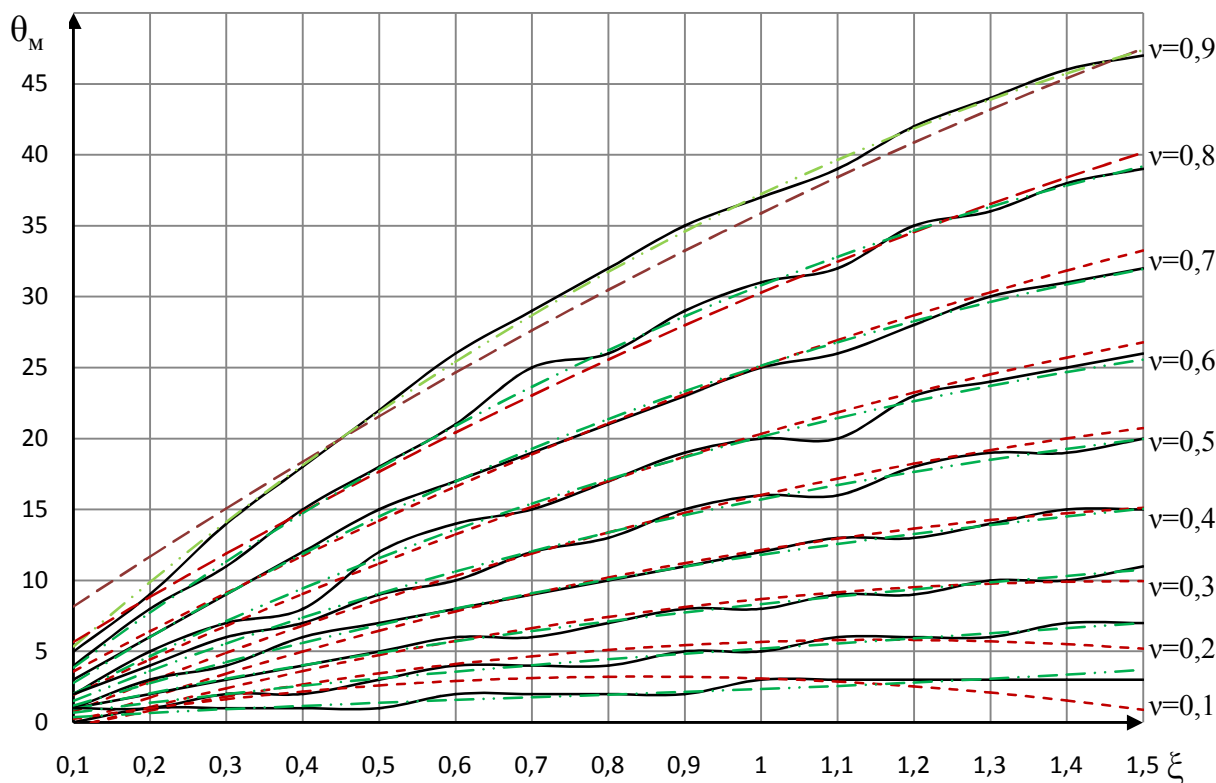


Рис. 5. Семейство аппроксимирующих зависимостей, позволяющее выбрать оптимальный угол коммутации  $\theta_m$  во всем диапазоне скоростей вращения ротора ( $v$ ) ВД заданной конструкции (параметр  $\xi = \omega L/R$ ) по критерию максимума электромагнитного КПД, в случаях использования 180-градусной коммутации или векторного управления

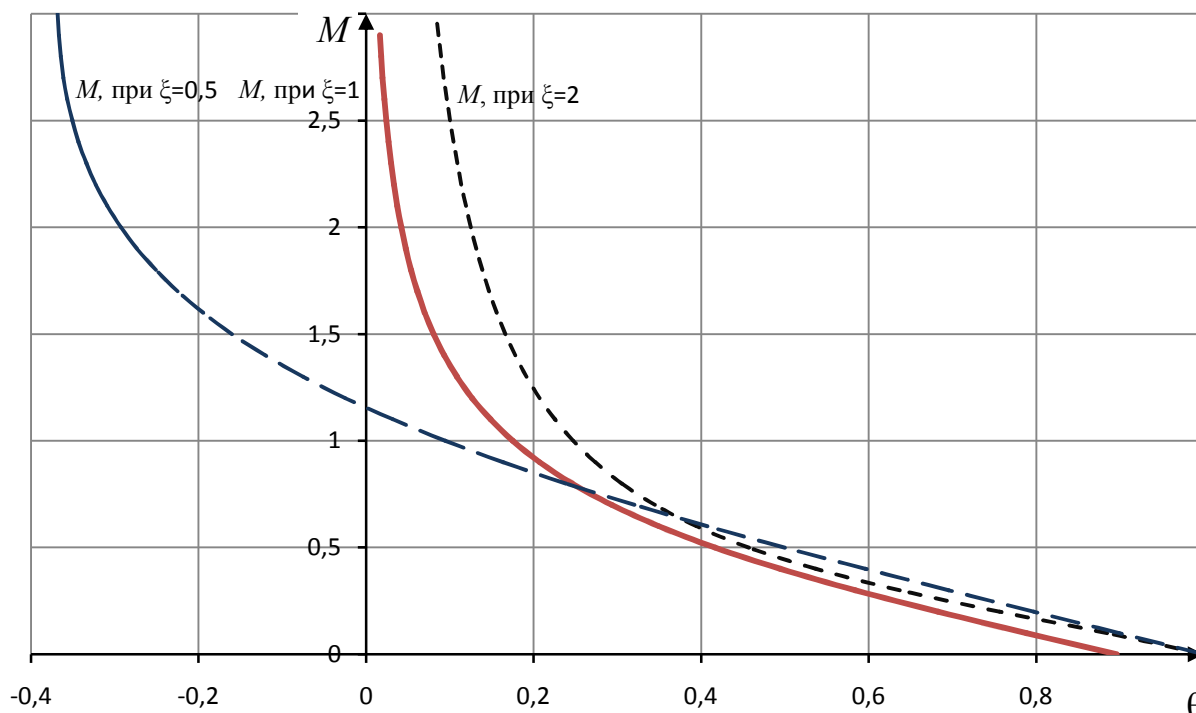


Рис. 6. Механические характеристики ВД при переменном угле коммутации  $\theta$

имеющейся скорости электромагнитный КПД и близкое к максимальному значение электромагнитного момента.

2. В случае большого относительного значения индуктивности 120-градусная коммутация перерождается в 180-градусную, поэтому целесообразно сразу запрограммировать работу двигателя на эту коммутацию. При этом значения угла  $\theta$ , соответствующие максимальному КПД и максимальному моменту, будут различными. Для определения первого из них может быть использовано выражение (4), для второго – выражения (5) или (6). Эти же соотношения могут быть использованы при реализации векторного управления электроприводом.

3. При векторном управлении за счет регулирования угла коммутации ВД при изменении скорости вращения появляется возможность не только решать вопросы минимизации энергопотребления двигателя, но и существенно изменять его механические характеристики от характеристик, присущих двигателю постоянного тока независимого возбуждения, до характеристик, аналогичных двигателям последовательного возбуждения.

#### Литература

1. Busca, Cristian *Open loop low speed control for PMSM in high dynamic application* / Cristian Busca. – Aalborg, Denmark, Aalborg university, 2010.

2. *Электромагнитный момент и момент сопротивления на валу синхронного электродвигателя с возбуждением от постоянных магнитов* / С.Г. Воронин, Д.А. Курносое, Д.В. Коробатов и др. // *Электротехника*. – 2012. – № 02. – С. 2–5.

3. Юферов, Ю.М. *Электрические машины автоматических систем* / Ф. М. Юферов, М.М. Кацман. – М.: Высшая школа, 1979. – 261 с.

4. Овчинников, И.Е. *Вентильные электрические двигатели и привод на их основе (малая и средняя мощность)* / И.Е. Овчинников. – СПб, 2012. – 333 с.

5. Воронин, С.Г. *Исследование пульсаций момента тихоходных бесконтактных двигателей постоянного тока с дискретным датчиком положения ротора* / С.Г. Воронин, В.А. Лифанов, Б.Г. Шумихин // *Электричество*. – 1977. – № 11. – С. 54.

6. *Управляемые бесконтактные электроприводы постоянного тока* / Н.П. Адволодкин, В.Г. Гаращенко, Н.Н. Лебедев, Н.Е. Овчинников. – Л.: Наука, 1984. – 188 с.

7. *Динамические модели вентильного двигателя при различных сочетаниях параметров* / С.Г. Воронин, Д.В. Коробатов, Р.Т. Киякпаев, А.С. Кульмухаметова // *Известия Академии электротехнических наук*. – 2011. – С. 58–63.

8. Самосейко, В.Ф. *Теоретические основы управления электроприводом: учебное пособие* / В.Ф. Самосейко. – СПб.: Элмор, 2007. – 464 с.

9. Лодочников, Э.А. *Микродвигатели для систем автоматики* / Э.А. Лодочников, Ю.М. Юферов. – М.: Энергия, 1969. – 272 с.

10. Линник, Ю.В. *Метод наименьших квадратов и основы математико-статистической теории обработки наблюдений* / Ю.В. Линник. – 2-е изд. – М., 1962.

11. Айвазян, С.А. *Прикладная статистика. Основы эконометрики* / С.А. Айвазян. – М.: Юнити-Дана, 2001. – Т. 2. – 432 с.

**Воронин Сергей Григорьевич**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Электромеханика и электромеханические системы», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, тел.: (351) 267-90-57.

**Курносов Дмитрий Александрович**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электромеханика и электромеханические системы», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, тел.: (351) 267-90-57.

**Кульмухаметова Александра Сериковна**, ассистент кафедры «Электромеханика и электромеханические системы», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, тел.: (351) 267-90-57, e-mail: kulmukhametovaas@susu.ac.ru.

---

**Bulletin of the South Ural State University**  
**Series "Power Engineering"**  
**2013, vol. 13, no. 1, pp. 96–102**

---

### Comparison of Different Ways Switching Control Synchronous Motor with Permanent Magnet at Energy Indicators and Settings Properties

**S.G. Voronin**, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

**D.A. Kurnosov**, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

**A.S. Kulmukhametova**, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation, kulmukhametovaas@susu.ac.ru.

There are various ways of switching the windings SMPM. This raises the problem of the comparative evaluation of methods of switching windings SMPM in terms of energy efficiency, the possibility of expanding the range of operating speeds and torques as well as improving the adjustment properties. This article describes a solution to this problem. The recommendations of making rational to choose a way of eating in a particular SMPM drive.

Comparative evaluation of the methods described above switching SMPM held at the same value of the parameter  $\xi$  and  $v$ . As a result, the engine having a relatively small value of inductance of armature winding, using a discrete switching in terms of energy performance of appropriate use of 120-degree switch, in which the rate is no worse than in vector control. The most effective is a neutral switching ( $\theta = 0$ ), which provides for the maximum available speed of electromagnetic efficiency and close to the maximum value of the electromagnetic torque. Vector control by adjusting the angle of SMPM when the switching speed of the opportunity not only to solve the problems of minimizing energy consumption motor, but also significantly change the mechanical characteristics of the characteristics shared by the DC motor with separate excitation, up features the same engine series excitation.

*Keywords: synchronous motor with permanent magnet, means switching windings, vector control, electromagnetic efficiency.*

#### References

1. Cristian Busca. *Open loop low speed control for PMSM in high dynamic application*, Aalborg, Denmark, Aalborg university, 2010, 109 p.
2. Voronin, S.G., Kurnosov, D.A., Korobov, D.V., Shaburov, P.O., Kulmukhametova, A.S. Electromagnetic and resistance torque on a synchronous motor shaft with permanent magnet excitation, *Russian Electrical Engineering*, 2012, no. 83 (2), pp. 61–63.
3. Yuferof F.M., Kacman M.M., *Electrichekieskie mashini antomaticheskikh system*, Moscow, 1979, 261 p.
4. Ovchinnikov I.E., *Ventilnye Electrichekieskie Dvigateli i Privody na ih Osnove*, 2012, 333 p.
5. Lifanov V.A., Voronin S.G., Shumikhin B.G., *Issledovanie pulsaciy momenta tikhokhodnikh beskontaktnykh dvigateley postoyannogo toka s diskretnym datchikom pologeniya rotora*, *Electrical Technology Russia*, 1977, no. 11. p. 54.
6. Advolodkin N.P., Garashenkov V.G., Lebedev N.N., Ovchinnikov N.E., *Upravlyaemye beskontakthye elektroprivody postoyannogo toka [Contactless controlled DC drives]*, Leningrad, 1984, 188 p.
7. Voronin S.G., Korobov D.V., Kiyakpaev R.T., Kulmukhametova A.S., *Dynamic processes of brushless DC motor with different combinations of parameters*, *Izvestiya Akademii Elektrotekhnicheskikh Nauk*, 2011, pp. 58–63.
8. Samoseyko V.F. *Theoretical Foundations of Motor Control*, 2007, 464 p.
9. Lodochnikov E.A., Yuferov Yu.M., *Mikrodvigateli dlya system avtomatiki [Micromotors for Automation Systems]*, Moscow, 1969, 272 p.
10. Linnik Yu.V., Линник Ю.В. *The method of least squares and the foundation of mathematics and statistical theory of observation processing*, Moscow, 1962.
11. Ayzvazyan S.A. *Applied Statistics. Foundations of Econometrics*, Moscow, 2001, 432 p.

*Поступила в редакцию 04.09.2012 г.*