

РЕГУЛИРОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ КООРДИНАТ ВЕНТИЛЬНОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА МЕТОДОМ ВЕКТОРНОГО УПРАВЛЕНИЯ

С.Г. Воронин, Д.А. Курносев

Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск

Рассматриваются вопросы регулирования скорости вращения и электромагнитного момента в вентильном электроприводе, построенном на основе синхронного двигателя с возбуждением от постоянных магнитов. Приводятся аналитические соотношения, определяющие закон изменения угла коммутации исходя из условий обеспечения заданного значения регулируемых координат или максимального значения электромагнитного к.п.д. Показано качественное и количественное отличие электромагнитного к.п.д., учитывающего электрические потери, и полного к.п.д., определяемого отношением электромагнитной к полной потребляемой мощности.

Ключевые слова: синхронный электродвигатель с возбуждением от постоянных магнитов, вентильный электропривод, векторное управление, электромагнитный к.п.д., полный к.п.д., энергетическая эффективность.

1. Постановка задачи исследования

При разработке управляемого электропривода, как правило, ставится задача обеспечения заданного диапазона регулируемых координат. Чаще всего такими координатами являются электромагнитный момент и скорость вращения электродвигателя. В любом электроприводе ставится задача обеспечения максимального электромагнитного к.п.д. двигателя во всех режимах работы или в основном рабочем режиме. В частности, для обеспечения требуемого быстродействия манипуляторов для устройств реабилитации и диагностики в медицинской технике [1] необходимо минимизировать время разгона и торможения исполнительного органа в переходных режимах, которые являются основными рабочими режимами. Для этого необходимо обеспечить максимальный момент двигателя при имеющейся скорости и напряжении первичного источника, а к.п.д. не является важнейшим показателем. Для расширения диапазона отработываемых углов манипулятора мы должны увеличить скорость холостого хода двигателя при ограниченном напряжении первичного источника питания, не ставя первостепенной задачей обеспечение максимума к.п.д. Однако при установившемся плавном движении манипулятора или при реализации режима притормаживания с рекуперацией энергии, особенно при работе от автономного переносного источника питания, входящего в состав реабилитационно-диагностического комплекса, такая задача возникает.

Все перечисленные задачи могут быть достаточно эффективно решены при использовании вентильного электропривода на основе синхрон-

ного двигателя (СД) с возбуждением от постоянных магнитов с векторным управлением. Причём в отличие от широко распространённых методов векторного управления путём автономного регулирования токов по осям d и q , требующих привлечения значительных вычислительных ресурсов [2–4], управление предлагается осуществлять путём регулирования угла коммутации (θ), которое при наличии датчика углового положения ротора реализуется простейшими средствами. В представленной статье приводятся теоретические предпосылки для такой реализации. При этом рассматриваются только установившиеся режимы работы привода и предполагается, что ШИМ-регулирование амплитуды фазного напряжения осуществляется идеально без дополнительных потерь. Проблемы, связанные с оговорёнными допущениями, требуют дополнительного исследования и не входят в задачи данной статьи.

2. Обеспечение максимального электромагнитного момента двигателя

Предположим, что в режиме векторного управления на фазные обмотки двигателя поступает симметричное трёхфазное напряжение. Представим уравнения напряжений статорной цепи СД во вращающейся системе координат в относительных единицах с учётом общепринятых допущений о симметрии статорной обмотки, равенстве индуктивных сопротивлений двигателя по осям d и q , отсутствии влияния реакции якоря и т. д. [6]:

$$\begin{aligned} -\gamma \sin \theta &= i_d - \tau_3 \varepsilon i_q + \tau_3 \frac{di_d}{dt}, \\ \gamma \cos \theta &= i_q + \tau_3 \varepsilon i_d + \tau_3 \frac{di_q}{dt} + \varepsilon. \end{aligned}$$

Здесь $\gamma = \frac{U}{U_a}$ – относительное значение амплитуды фазного напряжения; U и U_a – соответственно, фактическое и номинальное значение амплитуды фазного напряжения; i_d и i_q – относительное значение токов по соответствующим осям, при базовом значении тока $I_6 = \frac{3}{2} \frac{U_a}{r}$, где r – активное сопротивление фазной обмотки; $\varepsilon = \frac{E}{U_a} = \frac{k\Phi\omega}{U_a}$ – относительное значение скорости двигателя, где E – амплитуда фазной э.д.с., $k\Phi$ – коэффициент связи между мгновенной скоростью двигателя и амплитудой фазной э.д.с., ω – абсолютная скорость вращения ротора; $\tau_3 = \frac{\omega_0 L}{r}$ – относительная электромагнитная постоянная времени фазной обмотки, $\omega_0 = \frac{U_a}{k\Phi}$ – скорость идеального холостого хода (базовая скорость); $\tau = \omega_0 t$ – относительное время.

Из приведённой системы уравнений просто определить токи i_d и i_q , которые в принятой системе относительных единиц для установившегося режима получают вид:

$$i_d = \frac{\gamma(\varepsilon\tau_3 \cos\theta - \sin\theta) - \varepsilon^2\tau_3}{1 + (\varepsilon\tau_3)^2}, \tag{1a}$$

$$i_q = \frac{\gamma(\varepsilon\tau_3 \sin\theta + \cos\theta) - \varepsilon}{1 + (\varepsilon\tau_3)^2}. \tag{1б}$$

Если в качестве базового момента двигателя взять $M_6 = k\Phi I_6$, то согласно общей теории электромеханического преобразования энергии можно считать относительное значение электромагнитного момента двигателя равным относительному значению тока $\mu = i_q$.

В [7] показано, что угол коммутации, соответствующий максимальному установившемуся значению электромагнитного момента двигателя, можно найти, определив производную $di_q/d\theta$ и приравняв её к нулю. При этом в принятой системе единиц получим для двигательного режима

$$\theta_{\mu_{\max}}^d = \arctg \varepsilon\tau_3. \tag{2}$$

Очевидно, что для обеспечения максимального тормозного момента необходимо установить угол

$$\theta_{\mu_{\max}}^T = \theta_{\mu_{\max}}^d + \pi. \tag{3}$$

3. Обеспечение максимального электромагнитного к.п.д. двигателя

Такая задача также уже решалась ранее [8]. В основу её решения положено известное из теории электромеханического преобразования энергии положение о том, что составляющая тока статорной цепи i_d не участвует в создании электромагнитного момента. Следовательно, если при известных параметрах двигателя мы установим значение угла коммутации, при котором $i_d = 0$, то обеспечим максимальное значение электромагнитного к.п.д. при данной скорости. Принимая во внимание соотношение (1а), найдём значение угла, при котором обеспечивается максимальный электромагнитный к.п.д. в двигательном режиме

$$\theta_{\eta_{\max}} = \arctg \varepsilon\tau_3 - \arcsin \frac{\varepsilon^2\tau_3}{\gamma\sqrt{1+(\varepsilon\tau_3)^2}}. \tag{4}$$

Для оценки адекватности выражения (4) получим в общем виде аналитическое соотношение для расчёта электромагнитного к.п.д. В [9] приведено аналитическое выражение для определения потребляемой синхронным двигателем активной мощности, которое в принятой системе относительных единиц получит вид

$$p_{\text{ап}} = \frac{\gamma\varepsilon(\varepsilon\tau_3 \sin\theta - \cos\theta) + \gamma^2}{1 + (\varepsilon\tau_3)^2}.$$

Электромагнитный к.п.д. определяется соотношением

$$\eta_3 = \frac{p_3}{p_{\text{ап}}},$$

где $p_3 = i_q \varepsilon$. Подставив $p_{\text{ап}}$ и p_3 в выражение для к.п.д., получим

$$\eta_3 = \frac{\gamma\varepsilon(\varepsilon\tau_3 \sin\theta + \cos\theta) - \varepsilon^2}{\gamma\varepsilon(\varepsilon\tau_3 \sin\theta - \cos\theta) + \gamma^2}. \tag{5}$$

По выражению (5) рассчитана кривая $\eta_3 = f(\theta)$ при $\gamma = 1$, $\varepsilon = 0,8$ и $\tau_3 = 1,2$ (рис. 1). На этом рисунке отмечена точка 1, соответствующие углу обеспечивающему максимальный к.п.д., рассчитанному по выражению (4), а также точка 2, соответствующая максимальному значению к.п.д., рассчитанному по выражению (5).

Очевидно, что точки 1 и 2 зависимости $\eta_3(\theta)$, как по значению угла, так и по значению к.п.д. не совпадают. Поскольку выражение (5) получено строго в соответствии с теорией синхронных машин, то вызывает сомнение справедливость выражения (4). В частности, требует проверки утверждение о том, что выполнение условия $i_d = 0$ обеспечивает максимум электромагнитного к.п.д. двигателя.

Дело в том, что выполнение этого условия позволяет обеспечить при заданной электромагнитной мощности минимум полной, активная плюс реактивная составляющие, потребляемой мощности, которая определяется в относительных единицах соотношением [9]

$$p_{\text{пп}} = \gamma \sqrt{\frac{\gamma^2 - 2\gamma\varepsilon \cos\theta + \varepsilon^2}{1 + (\varepsilon\tau_3)^2}}.$$

Можно отметить, что полная и активная потребляемые мощности связаны известным соотношением

$$p_{\text{ап}} = p_{\text{пп}} \cos\varphi,$$

где φ – угол между векторами напряжения и тока.

Определим к.п.д. по полной потребляемой мощности

$$\eta_{\text{п}} = \frac{p_3}{p_{\text{пп}}} = \frac{\gamma\varepsilon(\varepsilon\tau_3 \sin\theta + \cos\theta) - \varepsilon^2}{\gamma\sqrt{[1+(\varepsilon\tau_3)^2](\gamma^2 - 2\varepsilon\gamma \cos\theta + \varepsilon^2)}}. \tag{6}$$

По выражению (6) на рис. 1 при тех же параметрах двигателя построена зависимость $\eta_{\text{п}}(\theta)$. Мы видим, что для этой зависимости максимум к.п.д. по полной потребляемой мощности (точка 3) соответствует углу $\theta_{\eta_{\text{пmax}}}$, рассчитанному по формуле (4).

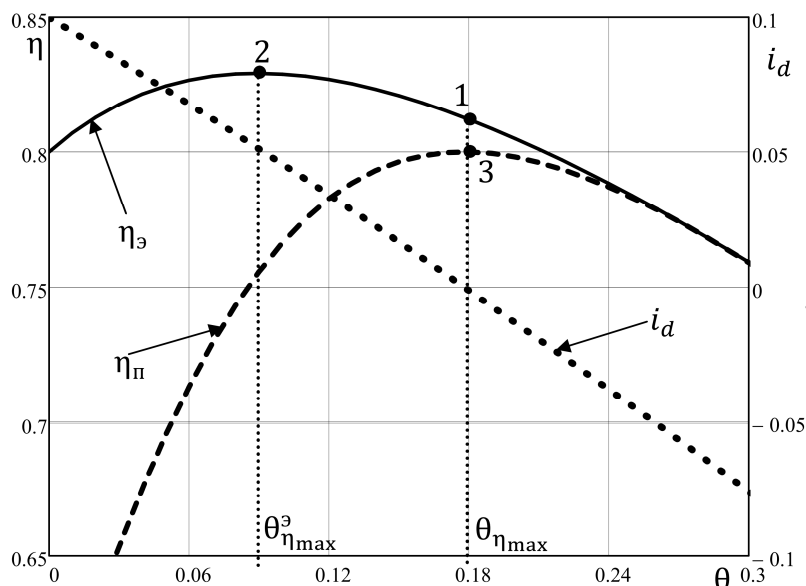


Рис. 1. Зависимости $\eta_э(\theta)$, $\eta_п(\theta)$ и $i_d(\theta)$

Следовательно, выражение (4) позволяет осуществить настройку угла θ из условия обеспечения минимума полной потребляемой мощности (максимум $\eta_п$), но при этом не гарантирован минимум электрических потерь в обмотке якоря, который обеспечивает максимум электромагнитного к.п.д. $\eta_э$, что очень важно с точки зрения облегчения теплового режима двигателя.

Формула для определения угла θ , соответствующего максимуму электромагнитного к.п.д. $\eta_э$, получена из выражения (5) путём поиска экстремума функции и имеет следующий вид

$$\theta_{\eta_{\max}}^э = 2 \arctg \frac{(\gamma - \varepsilon)(-1 + \sqrt{1 + (\varepsilon \tau_э)^2})}{\varepsilon \tau_э (\gamma + \varepsilon)}. \quad (7)$$

В частности, для кривых, изображённых на рис. 1, для случая $\gamma = 1$, $\varepsilon = 0,8$ и $\tau_э = 1,2$, значения $\theta_{\eta_{\max}}^э$ и $\theta_{\eta_{\max}}^п$ будут следующими: $\theta_{\eta_{\max}}^э = 0,089$ и $\theta_{\eta_{\max}}^п = 0,178$.

Необходимо отметить интересный факт, который следует из рис. 1. Путём регулирования угла θ удаётся получить электромагнитный к.п.д. вентильного двигателя больше по величине относительной скорости вращения ротора ε , что невозможно для асинхронного или коллекторного двигателя. Более того, чем больше относительное значение индуктивного сопротивления обмотки якоря ($\varepsilon \tau_э$), тем ближе максимальное значение к.п.д. к единице. Наконец, если найти предельное значение $\eta_э$ по выражению (5) при $\varepsilon \tau_э \rightarrow \infty$, то, оказывается, оно равно 1.

Что касается повышения электромагнитного к.п.д. в тормозном режиме, то осуществление торможения путём изменения угла коммутации с точки зрения экономии энергии неэффективно, так как в этом смысле эквивалентно торможению противовключением, и может быть рекомендовано

только для экстренного торможения. Из соображений энергетической эффективности более рационально использование рекуперативного торможения путём регулирования амплитуды фазного напряжения двигателя γ . При этом угол коммутации также должен определяться согласно (7) при $\gamma \leq \varepsilon$.

4. Обеспечение максимальной скорости вращения

Сначала найдём значение угла коммутации, при котором обеспечивается максимальная скорость холостого хода. Для этого, воспользовавшись соотношением (16), решим уравнение $i_q = 0$ относительно ε . В результате получим значение скорости холостого хода в виде

$$\varepsilon_{xx} = \frac{\gamma \cos \theta}{1 - \gamma \tau_э \sin \theta}. \quad (8)$$

Найдём экстремум полученной функции традиционным способом. В результате решения получим значение угла θ , соответствующее максимальной скорости

$$\theta_{\omega_{\max}}^{xx} = \arcsin \gamma \tau_э. \quad (9)$$

Подставим найденное значение угла в выражение (8) и получим максимальное значение скорости холостого хода

$$\varepsilon_{\max}^{xx} = \frac{\gamma}{\sqrt{1 - (\gamma \tau_э)^2}}. \quad (10)$$

Выражение (10) показывает, что зависимость скорости от угла имеет экстремум в виде точки перегиба только при выполнении условия $|\gamma \tau_э| < 1$. Однако реальные значения $\tau_э$ могут быть в разы больше единицы. В этом случае приведённая методика поиска максимальной скорости холостого хода не пригодна.

На рис. 2 представлены зависимости скорости холостого хода от угла коммутации $\varepsilon_{xx} = f(\theta)$, рассчитанные по выражению (8) при $\gamma = 1$ и раз-

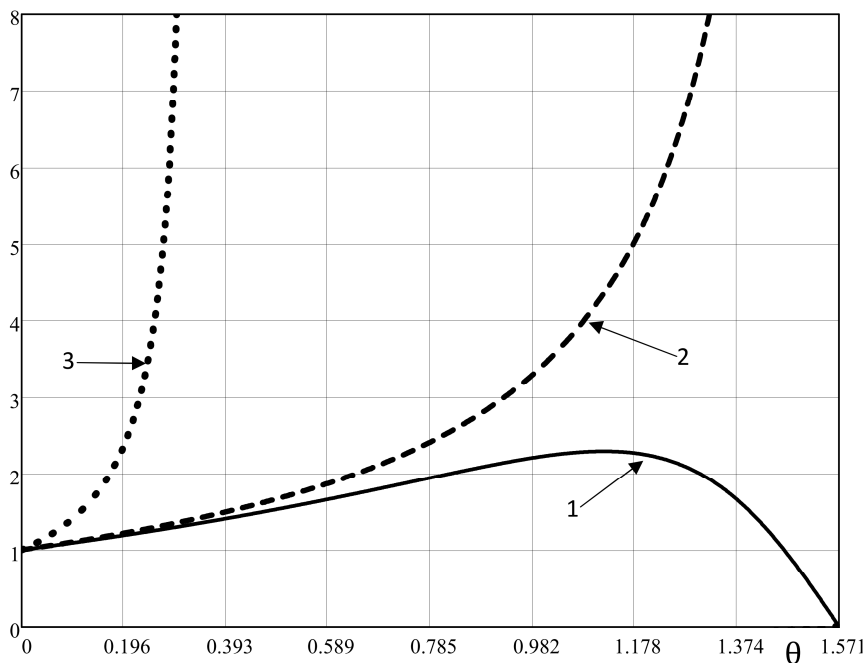


Рис. 2. Скорость холостого хода: кривая 1 – ϵ_{xx} при $\tau_3 = 0,9$; кривая 2 – ϵ_{xx} при $\tau_3 = 1$; кривая 3 – ϵ_{xx} при $\tau_3 = 3$

личных значениях $\tau_3 = 0,9; 1; 3$, которые подтверждают сказанное выше.

Действительно, при $\tau_3 = 0,9$ функция скорости имеет явно выраженный экстремум. В двух других случаях он отсутствует и максимум скорости стремится к бесконечности. Тогда максимальную скорость лучше определять численно, как это показано ниже.

Предположим, что перед нами стоит задача получения заданной относительной скорости двигателя при имеющемся значении относительного момента. Перепишем уравнение (16) в виде

$$\gamma(\cos\theta + \epsilon\tau_3\sin\theta) = \mu[1 + (\epsilon\tau_3)^2] + \epsilon \quad (11)$$

и разрешим его относительно θ . В результате определим значение угла, при котором для известных γ и μ получим требуемое значение ϵ

$$\theta = 2\arctg \frac{\epsilon\tau_3 - \sqrt{(\epsilon\tau_3)^2 - (\mu[1 + (\epsilon\tau_3)^2] + \epsilon)/\gamma^2 + 1}}{\mu[1 + (\epsilon\tau_3)^2] + \epsilon} / \gamma + 1 \quad (12)$$

Если в результате расчёта по выражению (12) мы получим вещественное положительное значение угла $\theta \leq \pi/2$, то поставленная задача может быть решена. В противном случае можно заключить, что при имеющихся значениях управляющего сигнала и параметрах двигателя заданное значение скорости не может быть обеспечено.

Теперь решим задачу определения максимального достижимого значения скорости двигателя при заданных параметрах, нагрузочном моменте, номинальном или максимально допустимом напряжении. Для этого разрешим уравнение (11) относительно скорости:

$$\epsilon = \frac{\gamma\tau_3\sin\theta - 1 + \sqrt{4\gamma\mu\tau_3^2\cos\theta - 4\mu^2\tau_3^2 + \gamma^2\tau_3^2\sin^2\theta - 2\gamma\tau_3\sin\theta + 1}}{2\mu\tau_3^2} \quad (13)$$

С помощью этого соотношения необходимо найти угол θ , соответствующий максимальной скорости. Однако получение этой аналитической зависимости представляет определённые трудности.

Численные расчёты показывают, что при наиболее вероятных практических значениях $\tau_3 \leq 3$ угол, соответствующий максимальному значению скорости ϵ при заданных значениях γ и μ , может быть найден по простому приближённому выражению

$$\theta_{\omega_{max}} \cong \tau_3(\gamma - \mu). \quad (14)$$

Полученное значение угла коммутации подставим в выражение (13) при $\gamma = 1$ и найдём максимальное значение скорости, которую может развить двигатель при заданном значении параметров и нагрузочного момента.

Для подтверждения возможности использования приближённого соотношения (14) был осуществлён численный поиск угла, соответствующего максимальной скорости по выражению (13), и определение этого угла по выражению (14). Результаты расчёта при $\mu = 0,1 \dots 0,9$ и $\tau_3 = 0,6 \dots 1,2$ сведены в таблицу, где первые два столбца (1-й и 2-й) для каждого значения τ_3 соответствуют численно найденному значению угла, при котором скорость достигает максимума, и собственно максимальному значению скорости, а следующие два столбца (3-й и 4-й) соответствуют приближённо вычисленному значению угла (по формуле (14)) и значению скорости при этом приближённом угле коммутации. Строки таблицы соответствуют различным значениям относительного нагрузочного момента. Сравнение значений максимальной ско-

Значения максимальной скорости вращения

| | | τ_s | | | | | | | | | | | | | | | |
|-------|-----|------------|-----------------|------------------|-----------------------|------------|-----------------|------------------|-----------------------|------------|-----------------|------------------|-----------------------|------------|-----------------|------------------|-----------------------|
| | | 0,6 | | | | 0,8 | | | | 1 | | | | 1,2 | | | |
| | | θ_m | ε_m | $\hat{\theta}_m$ | $\hat{\varepsilon}_m$ | θ_m | ε_m | $\hat{\theta}_m$ | $\hat{\varepsilon}_m$ | θ_m | ε_m | $\hat{\theta}_m$ | $\hat{\varepsilon}_m$ | θ_m | ε_m | $\hat{\theta}_m$ | $\hat{\varepsilon}_m$ |
| μ | 0,1 | 0,558 | 1,04 | 0,54 | 1,039 | 0,761 | 1,19 | 0,72 | 1,188 | 0,968 | 1,452 | 0,9 | 1,444 | 1,143 | 1,832 | 1,08 | 1,821 |
| | 0,3 | 0,415 | 0,735 | 0,42 | 0,735 | 0,546 | 0,759 | 0,56 | 0,759 | 0,667 | 0,787 | 0,7 | 0,786 | 0,772 | 0,811 | 0,84 | 0,807 |
| | 0,5 | 0,291 | 0,499 | 0,3 | 0,499 | 0,379 | 0,497 | 0,4 | 0,497 | 0,458 | 0,493 | 0,5 | 0,492 | 0,529 | 0,487 | 0,6 | 0,485 |
| | 0,7 | 0,174 | 0,294 | 0,18 | 0,294 | 0,227 | 0,289 | 0,24 | 0,289 | 0,276 | 0,283 | 0,3 | 0,283 | 0,32 | 0,277 | 0,36 | 0,276 |
| | 0,9 | 0,059 | 0,099 | 0,06 | 0,099 | 0,078 | 0,098 | 0,08 | 0,098 | 0,096 | 0,096 | 0,1 | 0,096 | 0,113 | 0,095 | 0,12 | 0,095 |

рости, полученных путём численного решения и по приближённой методике показывает, что их отличие для самого наихудшего случая не превышает 0,6 %.

Из таблицы мы видим также, что путём регулирования угла коммутации можно обеспечить скорость вращения существенно выше скорости идеального холостого хода ($\varepsilon = 1$).

Очевидно, представляет интерес оценка энергетических затрат, необходимых для обеспечения высокой скорости вращения электродвигателя. Для этого по выражению (5) были проведены расчёты электромагнитного к.п.д. η_s с различным моментом на валу, когда угол θ выбирался из условия обеспечения максимально достижимой для данного момента скорости (кривая η_s'). Результаты расчёта при $\gamma = \tau_s = 1$ представлены на рис. 3. Там же приведена зависимость к.п.д. $\eta_s(\mu)$, когда угол θ выбирается из условия обеспечения максимального к.п.д. для данной скорости в соответствии с выражением (7) (кривая η_s''), а также зависимость максимальной скорости $\varepsilon_{\max}(\mu)$.

Мы видим, что стремление повысить скорость вращения двигателя приводит к резкому уменьшению его электромагнитного к.п.д. Физически это

объясняется тем, что для повышения скорости вращения мы должны ослабить магнитное поле машины, и такое ослабление осуществляется за счёт увеличения тока i_d , который при полученных значениях угла коммутации имеет отрицательное значение, т.е. является размагничивающим. Аналогичное утверждение имеется и у других авторов [10].

Это положение подтверждают зависимость $i_d(\theta)$ при различных значениях τ_s и постоянной скорости вращения ротора ε (пример этой зависимости приведён на рис. 1).

На рис. 1 видно, что при $\theta = \theta_{\eta_{\max}}^3$, который определяется согласно (7), имеем $i_d > 0$ и максимум электромагнитного к.п.д. При $\theta = \theta_{\eta_{\max}}^3 > \theta_{\eta_{\max}}^3$, который определяется согласно (4) имеем ток $i_d = 0$, что соответствует максимуму к.п.д. по полной потребляемой мощности. По мере дальнейшего увеличения θ ток i_d меняет знак и увеличивается по модулю.

Можно отметить, что положительное значение тока i_d необходимо для компенсации индуктивной составляющей тока, обусловленной индуктивностью обмотки статора, и при $\theta = \theta_{\eta_{\max}}^3$ как раз осуществляется полная компенсация этой составляющей. Отрицательный ток i_d создаёт раз-

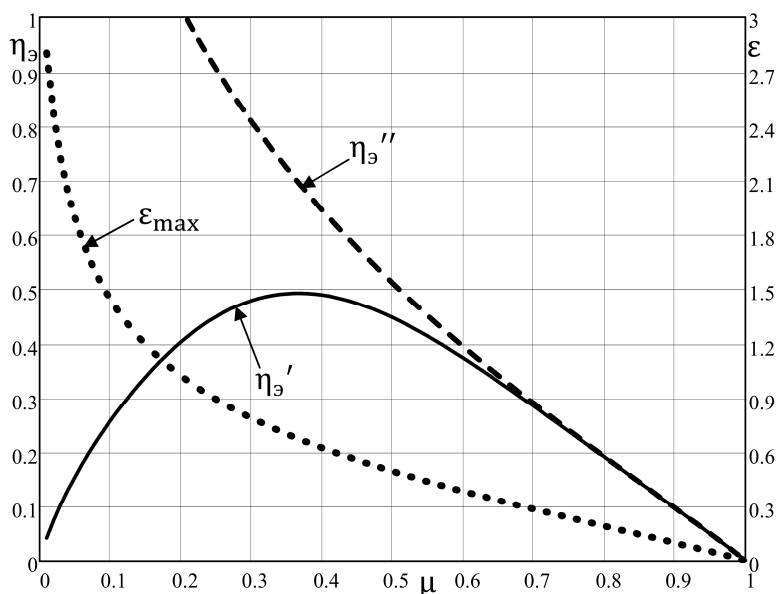


Рис. 3. Зависимости электромагнитного к.п.д. от момента при различной настройке угла коммутации

магничивающее воздействие и способствует расширению диапазона скоростей привода.

Заключение

Таким образом, поставленные в исследовании задачи решены и получены относительно простые аналитические выражения для регулирования угла коммутации в процессе векторного управления электроприводом:

– из условия обеспечения максимального момента – выражение (2);

– из условия обеспечения максимального к.п.д. по полной потребляемой мощности – выражение (4);

– из условия обеспечения максимального электромагнитного к.п.д. – выражение (7);

– из условия обеспечения максимальной скорости вращения при известном нагрузочном моменте – выражение (14).

Кроме этого, получены следующие аналитические зависимости:

– формула для расчёта угла коммутации, при котором для известных напряжения и момента сопротивления обеспечивается требуемое значение скорости – выражение (12);

– формула для расчёта скорости при заданных параметрах двигателя, нагрузочном моменте и напряжении – выражение (13).

Все предлагаемые в исследовании теоретические положения подкреплены конкретными расчётами и компьютерным моделированием.

Литература

1. Пат. 2529382 Российская Федерация. Способ исследования кинестетической чувствительности и система для его осуществления / С.А. Гордеев, С.Г. Воронин // Б.И. – 2013. – № 27.

2. Model reference adaptive backstopping based direct torque control of PM synchronous motor drives / L. Hai, W.-S. Yan, H. Li, Y. Wei // 4th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications,

ICIEA. – 2009. – Art. no. 5138380. – С. 1173–1178.

3. Speed-sensorless direct torque control system of permanent magnet synchronous motor / X. Wang, Y. Xing, Y. Liu, D. Yang // Dongbei Daxue Xuebao/Journal of Northeastern University. – 2012 – No. 33 (5) – P. 618–621.

4. Paulus, D. Sensor less control of synchronous machines based on direct speed and position estimation in polar stator-current coordinates / D. Paulus, J.-F. Stumper, R. Kennel // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2013. – No. 28 (5), art. no. 6257501. – P. 2503–2513.

5. Воронин, С.Г. Некоторые схемы и алгоритмы векторного управления синхронными двигателями с возбуждением от постоянных магнитов / С.Г. Воронин, Д.А. Курносов, А.С. Кульмухаметова // Электротехника. – 2013. – № 10. – С. 50–54.

6. Определение электромагнитного момента и момента сопротивления на валу синхронного электродвигателя с возбуждением от постоянных магнитов / С.Г. Воронин, Д.А. Курносов, Д.В. Коробатов и др. // Электротехника. – М.: Знак, 2012. – № 2. – С. 2–5.

7. Микродвигатели для систем автоматики / под ред. Э.А. Лодочникова, Ю.М. Юферова. – М.: Энергия, 1969. – 272 с.

8. Вентильные двигатели малой мощности для промышленных роботов / В.Д. Косулин, Г.Б. Михайлов, В.В. Омельченко и др. – Л.: Энергоатомиздат, Ленинградское отделение, 1988. – 184 с.

9. Юферов, Ф.М. Электрические машины автоматических устройств: учеб. для студентов вузов, обучающихся по специальности «Электро-механика» / Ф.М. Юферов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1988. – 479 с.

10. Сизякин, А. Без датчика положения ротора: решения компании IR для управления вентильными двигателями / А. Сизякин, М. Румянцев // Новости электроники (Электронный журнал). – 2011. – № 10. – Статья 6.

Воронин Сергей Григорьевич, д-р техн. наук, профессор, кафедра «Электромеханика и электромеханические системы», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; voroninsg@susu.ac.ru.

Курносов Дмитрий Александрович, канд. техн. наук, доцент, кафедра «Электромеханика и электромеханические системы», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; da.kurnosov@gmail.com.

Поступила в редакцию 15 ноября 2014 г.

REGULATION OF MECHANICAL COORDINATES OF THE SWITCHING CONTROL SYNCHRONOUS MOTOR BY METHOD OF VECTOR CONTROL

S.G. Voronin, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation;
voroninsg@susu.ac.ru,

D.A. Kurnosov, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation;
da.kurnosov@gmail.com

The article is devoted to regulation of speed and torque of Synchronous Motor with Permanent Magnet. The law of change of switching angle is received from conditions of support of the preset value of adjustable coordinates or the maximum value of electromagnetic efficiency. Qualitative and quantitative difference of electromagnetic efficiency from full efficiency is received. Theoretical provisions are supported by specific calculations and computer simulation.

Keywords: Permanent Magnet Synchronous Motor (PMSM), vector control, electromagnetic efficiency, at full power consumption efficiency, energy efficiency.

References

1. Gordeev S.A., Voronin S.G. *Sposob issledovaniya kinestatcheskoi chuvstvitelnosti i sistema dlya ego oshestvleniya* [Method Study Kinesthetic Sensitivity and System for its Implementation]. Patent RF, no. 2529382, 2013.
2. Hai L., Yan W.-S., Li H., Wei Y. Model Reference Adaptive Backstopping Based Direct Torque Control of PM Synchronous Motor Drives. *4th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, ICIEA*, 2009, art. no. 5138380, pp. 1173–1178.
3. Wang X., Xing Y., Liu Y., Yang D. Speed-Sensorless Direct Torque Control System of Permanent Magnet Synchronous Motor. *Dongbei Daxue Xuebao/Journal of Northeastern University*, 2012, no. 33 (5), pp. 618–621.
4. Paulus D., Stumper J.-F., Kennel R. Sensor less Control of Synchronous Machines Based on Direct Speed and Position Estimation in Polar stator-Current Coordinates. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2013, no. 28 (5), art. no. 6257501, pp. 2503–2513.
5. Voronin S.G., Kurnosov D.A., Kul'mukhametova A.S. Vector Control of Permanent-Magnet Synchronous Motors. *Russian Electrical Engineering*, 2013, vol. 84, iss. 10, pp. 581–585.
6. Voronin S.G., Kurnosov D.A., Korobatov 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.
7. Lodochnikov E.A., Yuferov F.M. *Mikrodvigateli dlya system avtomatiki* [Micromotors for Automation Systems]. Moscow, 1969. 272 p.
8. Kosulin V.D., Michajlov V.V. *Ventilny dvigateli maloi moshnosti dlja promyshlennyh robotov* [SMPM of Low Power for Industrial Robots]. Leningrad, 1988. 184 p.
9. Yuferov F.M. *Elektricheskie mashini avtomaticheskikh ustroystv* [Electrical Machines of Automatic Devices]. Moscow, 1988. 479 p.
10. Sizyakin A., Rumyanzev M. [Without Rotor Position Sensor: IR's Solution to Control Brushless Motors]. *Novosti elektroniki*, 2011, no. 10, article 6. (in Russ.)

Received 15 November 2014

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Воронин, С.Г. Регулирование механических координат вентиляльного электропривода методом векторного управления / С.Г. Воронин, Д.А. Курносов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2015. – Т. 15, № 3. – С. 52–58. DOI: 10.14529/power150307

FOR CITATION

Voronin S.G., Kurnosov D.A. Regulation of Mechanical Coordinates of the Switching Control Synchronous Motor by Method of Vector Control. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2015, vol. 15, no. 3, pp. 52–58. (in Russ.) DOI: 10.14529/power150307