

ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕЕ УПРАВЛЕНИЕ В ПУСКТОРМОЗНЫХ РЕЖИМАХ ЧАСТОТНОРЕГУЛИРУЕМЫМ СИНХРОННЫМ ДВИГАТЕЛЕМ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ

В. А. Волков

Национальный горный университет

Аннотация. *Исследованы энергосберегающие виды управления скоростью частотнорегулируемого синхронного двигателя с постоянными магнитами, обеспечивающие минимизацию основных электромагнитных потерь энергии этого двигателя в пускотормозных режимах. Установлено наличие оптимальных времен разгона и торможения, при которых потери энергии минимальны.*

Ключевые слова: *частотное регулирование, синхронный двигатель с постоянными магнитами, электромагнитные потери энергии.*

Введение

С освоением промышленного выпуска синхронных двигателей с постоянными магнитами, устанавливаемыми внутри ротора этого двигателя (IPMSM – Interior Permanent Magnet Synchronous Machine) [1], и наблюдающимся в настоящее время их широким применением при частотном способе регулирования скорости в различных отраслях хозяйства, а также, исходя из происходящего в Украине и мире удорожания электрической энергии, становится актуальной и востребованной практикой разработка и исследование энергосберегающего управления указанными частотнорегулируемыми двигателями.

Несмотря на наличие в зарубежной и отечественной научно-технической литературе многочисленных известных публикаций, посвященных энергосберегающему управлению такими частотнорегулируемыми синхронными двигателями с постоянными магнитами (СДПМ), в этих публикациях рассматривается решение задачи энергосберегающего управления только для установленных режимов работы данных двигателей. В частности, в большинстве из этих публикаций (например, [2 – 10]) разрабатываются и исследуются алгоритмы автоматического управления, обеспечивающие минимизацию электрических (тепловых) потерь мощности этого двигателя (что, как показано в этих публикациях, равноценно поддержанию максимального соотношения развиваемого значения электромагнитного момента двигателя к значению модуля обобщенного вектора статорного тока). Однако при указанном управлении не учитываются магнитные потери (в стали) СДПМ, что несколько снижает эффективность данного способа энергосбере-

гающего управления (из-за недостаточного уменьшения при нем непроизводительных потерь энергии в рассматриваемом двигателе).

Оставшаяся небольшая часть из известных публикаций (например, [11 – 14]) рассматривает энергосберегающее управление в установившихся режимах работы СДПМ при минимизации электромагнитных (суммы электрических и магнитных) потерь мощности или общих потерь мощности (суммы электрических, магнитных и механических потерь мощности) этого двигателя. Причем в последних перечисленных известных работах не учитывается фактически нелинейная (выявленная экспериментально в [1]) зависимость потерь в стали данного двигателя от частоты основной гармоники фазных статорных токов или напряжений (как известно, прямо пропорциональной частоте вращения его ротора). Из-за неучитываемой упомянутой нелинейной зависимости, в свою очередь, вносятся неточности в полученные результаты проведенных исследований. Также следует обратить внимание на то, что до настоящего времени в известной научно-технической литературе отсутствуют публикации, посвященные разработке и исследованию энергосберегающего управления СДПМ в пускотормозных режимах его работы.

1. Цель и задачи исследования

Разработка и исследование энергосберегающего управления частотнорегулируемым синхронным двигателем с постоянными магнитами, обеспечивающего уменьшение основных электромагнитных потерь энергии этого двигателя в пускотормозных режимах работы.

2. Материалы исследований

При исследованиях примем допущения:

© Волков В. А., 2018

- учитывалось идеализированное представление СДПМ из [9] при учете в нем нелинейного вида изменения потерь в стали [1];

- рассматривались только основные составляющие для общих электромагнитных потерь мощности $\Delta P_{эм}$ и энергии $\Delta W_{эм}$ двигателя, которые вызваны основными (первыми) гармоническими составляющими фазных статорных токов СДПМ;

- предполагается, что для регулирования СДПМ используются векторные системы автоматического управления (САУ), характеризующиеся регулированием проекций i_{1d} и i_{1q} обобщенного вектора статорного тока \vec{i}_1 (образованного от действия основных гармонических составляющих фазных статорных токов двигателя) по осям ортогональной координатной системы «d-q», связанной вещественной осью «d» с осью магнитного поля ротора двигателя [1, 9];

- пренебрегаем свободными (затухающими) составляющими статорных токов в пускотормозных режимах (что на практике допустимо с учетом высокого быстродействия контуров регулирования проекций статорного тока в современных векторных САУ);

- полагаем идеальное поддержание системой автоматического управления электроприводом заданных алгоритмов частотного управления СДПМ (например, равенства нулю проекций i_{1d} статорного тока: $i_{1d} = 0$, равенства номинальному значению $\Psi_{1н}$ модуля Ψ_1 обобщенного вектора потокосцепления статора: $\Psi_1 = \Psi_{1н}$ или необходимого соотношения между проекциями i_{1d} и i_{1q} обобщенного вектора статорного тока, обеспечивающего создание максимального значения электромагнитного момента двигателя при текущем значении модуля i_1 статорного тока: $M / i_1 = \max$);

- значения момента сопротивления M_c и момента инерции J привода (приведенные к валу двигателя) принимаются неизменными;

- исследованию подлежали режимы: разгона СДПМ от нулевой до номинальной ω_n скорости и торможения от номинальной скорости ω_n до нулевой скорости.

Последующие исследования проводились для параметров СДПМ из [9]: $n_n = 4000$ об/мин; $M_n = 1,8$ Нм; $I_{1нф} = 3,35$ А; $\Psi_f = 0,0844$ Вб; $J = 0,45 \cdot 10^{-3}$ кг·м²; $z_p = 3$; $R_1 = 2,21$ Ом; $R_{доб} = 0,12$ Ом; $L_d = 9,77$ мГн; $L_q = 14,94$ мГн,

- применительно к предложенному энергосберегающему управлению и известным (линейному и параболическому) видам изменения скорости этого двигателя в пускотормозных режимах.

На первом этапе получим расчетные аналитические зависимости для основных электромагнитных потерь мощности и энергии СДПМ, а также приведем математические выражения, описывающие электромеханические процессы для этого двигателя в пускотормозных режимах.

Согласно [1] основные электромагнитные потери мощности $\Delta P_{эм}$ СДПМ находятся в виде суммы электрических $\Delta P_э$ и магнитных (в стали) $\Delta P_{ст}$ потерь мощности:

$$\Delta P_{эм} = \Delta P_э + \Delta P_{ст}, \quad (1)$$

которые находятся из соотношений [1]:

$$\left. \begin{aligned} \Delta P_э &= \frac{3}{2} (R_1 + R_{доб}) \cdot (i_{1d}^2 + i_{1q}^2) \\ \Delta P_{ст} &= m_{ст} (k_h \cdot \omega_1 \cdot B_1^n + k_e \cdot \omega_1^2 \cdot B_1^2) \end{aligned} \right\}, \quad (2)$$

где i_{1d} и i_{1q} – проекции обобщенного вектора статорного тока \vec{i}_1 двигателя на оси ортогональной координатной системы "d-q", ориентированной вещественной осью "d" по магнитной оси ротора: R_1 – активное сопротивление фазной статорной обмотки; $m_{ст}$ – масса стального сердечника статора, кг; $\omega_1 = 2\pi f_1$ – угловая частота фазных статорных токов, рад/с (f_1 – частота статорных токов, Гц); B_1 – амплитуда магнитной индукции в стали сердечника, Тл); k_h – коэффициент удельных потерь в стали, вызванных гистерезисом; k_e – коэффициент удельных потерь в стали, вызванных вихревыми токами; n – постоянная Штейнмеца; $R_{доб} = 0,005 P_{2н} / 3 \cdot \eta_n \cdot I_{1нф}^2$ – эквивалентное активное сопротивление, учитывающее добавочные потери мощности в СДПМ (где $P_{2н}$ и η_n – номинальные значения соответственно полезной мощности на валу и коэффициента полезного действия двигателя; $I_{1нф}$ – номинальное действующее значение фазного тока двигателя).

Исходя из того, что для применяемых в сердечнике статора СДПМ марок электротехнических сталей значения постоянной Штейнмеца близки к двум (для примера, приведенного в [1], $n = 1,93$), в ряде публикаций [12, 14] значение этой постоянной при расчетах потерь в стали СДПМ принимается равным: $n = 2$. Учитывая

это, преобразуем второе соотношение из (2) к следующему виду:

$$\Delta P_{\text{ст}} \approx m_{\text{ст}} \cdot B_1^2 \cdot (k_h \cdot \omega_1 + k_e \cdot \omega_1^2). \quad (3)$$

Разделив левую и правую части выражения (3) на номинальное значение $\Delta P_{\text{ст.н}}$ потерь в стали (соответствующее номинальным значениям магнитной индукции $B_{1н}$ и угловой частоты $\omega_{1н}$ статора), получим выражение для относительных потерь в стали СДПМ:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\Delta P_{\text{ст}}}{\Delta P_{\text{ст.н}}} &\approx \left(\frac{B_1}{B_{1н}} \right)^2 \cdot A(\omega_1), \\ A(\omega_1) &= \frac{k_h \cdot \omega_1 + k_e \cdot \omega_1^2}{k_h \cdot \omega_{1н} + k_e \cdot \omega_{1н}^2} \end{aligned} \right\}, \quad (4)$$

В этом выражении, состоящем из произведения двух сомножителей, первый из них задает зависимость относительных потерь в стали СДПМ от амплитуды магнитной индукции B_1 в статоре, а второй сомножитель $A(\omega_1)$ – определяет зависимость этих потерь от угловой частоты ω_1 статора. Причем, в выражении (4) угловая частота статорных токов ω_1 , как известно, для СДПМ прямо пропорциональна угловой частоте вращения (скорости) ω ротора.

Учитывая это и исходя из полученной в [1] экспериментальной графической зависимости для потерь мощности $\Delta P_{\text{ст}}$ от скорости ω ротора (приведенной применительно к номинальному значению магнитной индукции $B_{1н}$ статора двигателя), рассчитаем (путем деления всех полученных экспериментально значений потерь мощности $\Delta P_{\text{ст}}$ и скорости ω на их соответствующие номинальные значения $\Delta P_{\text{ст.н}}$ и $\omega_{н}$) относительные потери мощности $A(\omega/\omega_{н})$ в стали статора двигателя и изобразим их сплошной линией на рис. 1. Затем интерполируем указанную (изображенную сплошной линией) на рис. 1 зависимость для относительных потерь мощности в стали аналитической зависимостью вида

$$A(\omega/\omega_{н}) = (\omega/\omega_{н})^\lambda, \quad (5)$$

в которой: ω [рад/с] = n [об/мин] / 9,55 и $\omega_{н}$ [рад/с] = $n_{н}$ [об/мин] / 9,55 – соответственно текущие и номинальные значения угловой частоты вращения (скорости) ротора СДПМ.

Установлено, что при математической интерполяции согласно (5) наименьшее среднеквадратичное отклонение (равное 0,61 %) между экспериментальной (показанной сплошной ли-

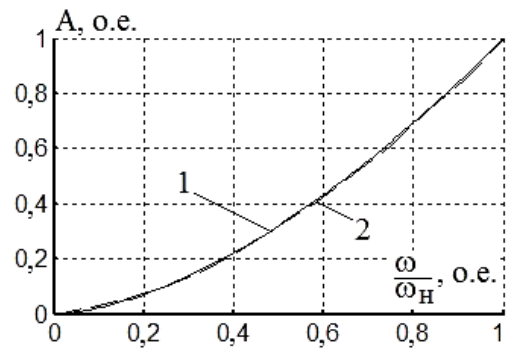


Рис. 1 Экспериментальная (показанная сплошной линией 1) и интерполированная (изображенная пунктирной линией 2) зависимости $A(\omega/\omega_{н})$

нией) и интерполированной кривой (показанной пунктиром на рис. 1) достигается при значении коэффициента: $\lambda = 1,64$.

Принимая во внимание прямо пропорциональную зависимость модуля обобщенного вектора потокосцепления статора Ψ_1 СДПМ от амплитуды магнитной индукции B_1 статора, после эквивалентной замены в выражении (4) сомножителя $A(\omega_1)$ на сомножитель $A(\omega/\omega_{н})$ из (5) получим удобную для дальнейшего расчета аналитическую зависимость для нахождения потерь мощности $\Delta P_{\text{ст}}$ в стали СДПМ:

$$\Delta P_{\text{ст}} = \Delta P_{\text{ст.н}} \cdot (\Psi_1/\Psi_{1н})^2 \cdot (\omega/\omega_{н})^\lambda, \quad (6)$$

где $\Delta P_{\text{ст}}$ и $\Delta P_{\text{ст.н}}$ – соответственно текущее и номинальное (соответствующее номинальному режиму работы) значения потерь в стали СДПМ.

С учетом (6) и первого соотношения из (2) преобразуем зависимость (1) для основных электромагнитных потерь мощности СДПМ к виду:

$$\begin{aligned} \Delta P_{\text{эм}} = & \frac{3}{2} (R_1 + R_{\text{доб}}) \cdot (i_{1д}^2 + i_{1q}^2) + \\ & + \Delta P_{\text{ст.н}} \cdot (\Psi_1/\Psi_{1н})^2 \cdot (\omega/\omega_{н})^\lambda \end{aligned} \quad (7)$$

Основные электромагнитные потери энергии (ОЭПЭ) для СДПМ в режимах разгона и торможения находятся с учетом (7) соответственно из соотношений:

$$\Delta W_p = \int_0^{t_p} \Delta P_{\text{эм}} \cdot dt \quad \text{и} \quad \Delta W_T = \int_0^{t_T} \Delta P_{\text{эм}} \cdot dt \quad (8)$$

где t_p и t_T – длительности времен разгона (от нулевой до номинальной скорости) и торможения (номинальной скорости до нуля).

Переходные электромеханические процессы в СДПМ с векторным управлением описываются зависимостями [1, 9]:

$$\left. \begin{aligned} u_{1d} &= i_{1d} \cdot R_1 + L_d \frac{di_{1d}}{dt} - \omega_1 L_q i_{1q}, \\ u_{1q} &= i_{1q} \cdot R_1 + L_q \frac{di_{1q}}{dt} + \omega_1 L_d i_{1d} + \omega_1 \Psi_f, \\ M &= \frac{3z_p}{2} [\Psi_f \cdot i_{1q} + (L_d - L_q) \cdot i_{1d} \cdot i_{1q}], \\ \Psi_1 &= [(\Psi_f + L_d \cdot i_{1d})^2 + (L_q \cdot i_{1q})^2]^{0.5}, \\ M - M_c &= J \frac{d\omega}{dt}, \\ \omega_1 &= z_p \cdot \omega, \quad u_1 = (u_{1d}^2 + u_{1q}^2)^{0.5}, \quad i_1 = (i_{1d}^2 + i_{1q}^2)^{0.5} \end{aligned} \right\} (9)$$

где Ψ_f – магнитный поток ротора, создаваемый постоянными магнитами; u_1 и i_1 – модули обобщенных векторов статорных напряжения и тока соответственно; z_p – число пар полюсов статорной обмотки двигателя; t – здесь и далее текущее время, отсчитываемое от начала и на протяжении рассматриваемых временных интервалах: разгона ($0 \leq t \leq t_p$) или торможения ($0 \leq t \leq t_T$).

Наиболее известными и широко применяемыми на практике траекториями изменения скорости частотнорегулируемого СДПМ в пускотормозных режимах являются линейная (описываемая для режимов разгона и торможения зависимостями соответственно:

$$\omega = \omega_n (t/t_p) \quad \text{и} \quad \omega = \omega_n [(t_T - t)/t_T] \quad (10)$$

и параболическая траектория (характеризующаяся для режимов разгона и торможения зависимостями соответственно:

$$\omega = \omega_n (t/t_p)^2 \quad \text{и} \quad \omega = \omega_n [(t_T - t)/t_T]^2 \quad (11)$$

Вычислим из (10) и (11) производные $\omega' = d\omega/dt$ скоростей для линейных траекторий при разгоне и торможении соответственно:

$$\omega' = \omega_n / t_p \quad \text{и} \quad \omega' = -\omega_n / t_T, \quad (12)$$

а также для параболической траектории при разгоне и торможении соответственно:

$$\omega' = 2\omega_n t / t_p^2 \quad \text{и} \quad \omega' = -2\omega_n (t_T - t) / t_T^2. \quad (13)$$

С учетом (12) и (13) из предпоследнего соотношения системы (9) определяется текущее значение электромагнитного момента двигателя

$$M = M_c + J \cdot \omega' \quad (14)$$

необходимое для воспроизведения заданных траекторий скорости в пускотормозных режимах.

На *втором этапе* исследуем ОЭПЭ в пускотормозных режимах СДПМ при алгоритме управления им с поддержанием нулевого значения проекции $i_{1d} = 0$ статорного тока (назовем это «управлением 1»).

Данному управлению соответствует согласно (9) и с учетом (14) следующие математические соотношения для электромагнитного момента M и проекций i_{1d} , i_{1q} статорного тока:

$$\left. \begin{aligned} M &= 1,5 \cdot z_p \cdot \Psi_f \cdot i_{1q}, \quad i_{1d} = 0, \\ i_{1q} &= \frac{2 \cdot M}{3 \cdot z_p \cdot \Psi_f} = \frac{2}{3} \cdot \frac{M_c + J \cdot \omega'}{z_p \cdot \Psi_f} \end{aligned} \right\} (15)$$

Подставив в (7) окончательное выражение последней формулы системы (15), получим расчетную зависимость для основных электромагнитных потерь мощности СДПМ в пускотормозных режимах, соответствующую управлению 1:

$$\Delta P_{эм} = b [M_c^2 + 2M_c J \cdot \omega' + J^2 (\omega')^2] + c \cdot \omega^\lambda, \quad (16)$$

в которой постоянные коэффициенты b и c находятся (причем последний коэффициент – при допущении: $\Psi_1 / \Psi_{1н} \approx 1$) из соотношений:

$$\left. \begin{aligned} b &= \frac{2}{3} \cdot \frac{(R_l + R_{доб})}{z_p^2 \cdot \Psi_f^2}, \\ c &= \Delta P_{ст.н} / \omega_n^\lambda, \quad \text{где} \quad \lambda = 1,64 \end{aligned} \right\} (17)$$

Для рассматриваемого управления основные электромагнитные потери энергии СДПМ при разгоне и торможении рассчитываются из соотношений (8) при подстановке в них зависимости (16). Из теории вариационного исчисления известно, что оптимизация (минимизация) ОЭПЭ:

$$\Delta W_p = \Delta W_p^o = \min \quad \text{и} \quad \Delta W_T = \Delta W_T^o = \min, \quad (18)$$

описываемых интегральными зависимостями (8) от функции $\Delta P_{эм}$ из (16), зависящей от переменных величин: скорости ω и ее производной ω' по времени, – осуществляется при временных функциях для скорости ω , отвечающих уравнению Эйлера [15]:

$$\frac{\partial^2(\Delta P_{эм})}{\partial \omega' \cdot \partial \omega'} \cdot \omega'' + \frac{\partial^2(\Delta P_{эм})}{\partial \omega \cdot \partial \omega'} \cdot \omega' + \frac{\partial^2(\Delta P_{эм})}{\partial \omega \cdot \partial t} - \frac{\partial(\Delta P_{эм})}{\partial \omega} = 0, \quad (19)$$

где $\omega'' = d^2\omega/d^2t$ – вторая производная скорости по времени.

После вычисления входящих в уравнение Эйлера (19) частных производных:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial(\Delta P_{эм})}{\partial\omega} &= 1,64c \cdot \omega^{0,64}, & \frac{\partial^2(\Delta P_{эм})}{\partial\omega \cdot \partial\omega'} &= 0, \\ \frac{\partial^2(\Delta P_{эм})}{\partial\omega' \cdot \partial\omega'} &= 2bJ^2, & \frac{\partial^2(\Delta P_{эм})}{\partial\omega \cdot \partial t} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

и подстановки в уравнение (19) преобразуем уравнение Эйлера к виду нелинейного дифференциального уравнения второго порядка:

$$\omega'' = K \cdot \omega^{0,64}, \quad K = 0,82c / bJ^2, \quad (21)$$

которое не имеет точного аналитического решения и решается только численными методами.

Как показано в [16], приближенными решениями подобных (21) нелинейных дифференциальных уравнений являются зависимости вида:

$$\left. \begin{aligned} \omega &= \omega_n \cdot \left[\frac{sh(\xi \cdot \sqrt{K} \cdot t)}{sh(\xi \cdot \sqrt{K} \cdot t_p)} \right], \\ \omega &= \omega_n \cdot \left\{ \frac{sh[\xi \cdot \sqrt{K} \cdot (t_T - t)]}{sh(\xi \cdot \sqrt{K} \cdot t_T)} \right\} \end{aligned} \right\}, \quad (22)$$

соответствующие режимам разгона и торможения двигателя. Посредством вычисления от зависимостей из (22) для скорости их текущих производных по времени:

$$\left. \begin{aligned} \omega' &= \xi \cdot \sqrt{K} \cdot \omega_n \cdot \left[\frac{ch(\xi \cdot \sqrt{K} \cdot t)}{sh(\xi \cdot \sqrt{K} \cdot t_p)} \right], \\ \omega' &= -\xi \cdot \sqrt{K} \cdot \omega_n \cdot \left\{ \frac{ch[\xi \cdot \sqrt{K} \cdot (t_T - t)]}{sh(\xi \cdot \sqrt{K} \cdot t_T)} \right\} \end{aligned} \right\}, \quad (23)$$

а затем подстановки их в (7), находят из (8) для СДПМ значения ОЭПЭ ΔW_p и ΔW_T в режимах разгона и торможения.

Согласно [16] известно, что если варьировать значение поправочного коэффициента ξ в зависимостях (22), то можно при сохранении их принадлежности к функциям гиперболического синуса несколько изменять их форму (а, следовательно, и значение ОЭПЭ в пускотормозных режимах при заданных значениях времен разгона и торможения). Для параметров рассматриваемого двигателя это иллюстрируется (на примере длительности времен разгона и торможения, равных: $t_p = t_T = 1$ с) графиками изменения скоростей, представленными на рис. 2.

На этом рисунке показаны пунктирными линиями траектории изменения скоростей СДПМ для разгона и торможения при варьировании поправочного коэффициента ξ , а сплошной линией показаны траектории скоростей, ко-

торые при варьировании коэффициента ξ характеризуются рассчитанными из (7) и (8) минимальными значениями ОЭПЭ ΔW_p и ΔW_T в пускотормозных режимах и достигающимися при оптимальных значениях ξ^* указанного поправочного коэффициента ξ . С учетом вышеизложенного квазиоптимальные траектории изменения скорости частотнорегулируемого СДПМ при разгоне и торможении характеризуются соответственно зависимостями:

$$\left. \begin{aligned} \omega &= \omega_n \cdot \left[\frac{sh(\xi^* \cdot \sqrt{K} \cdot t)}{sh(\xi^* \cdot \sqrt{K} \cdot t_p)} \right], \\ \omega &= \omega_n \cdot \left\{ \frac{sh[\xi^* \cdot \sqrt{K} \cdot (t_T - t)]}{sh(\xi^* \cdot \sqrt{K} \cdot t_T)} \right\} \end{aligned} \right\}. \quad (24)$$

Для параметров рассматриваемого двигателя рассчитаны при управлении 1 из выражений (7), (8), (12) – (14) и построены на рис. 3 в виде графиков зависимости ОЭПЭ ΔW_p и ΔW_T для СДПМ в функции длительностей времен разгона t_p и торможения t_T на холостом ходу и с номинальной нагрузкой при линейной из (10), параболической из (11) и квазиоптимальной из (24) траекторий изменения скорости в пускотормозных режимах.

На *третьем этапе* выполним исследование ОЭПЭ в пускотормозных режимах для управления СДПМ при модуле Ψ_1 потокосцепления статора, равном его номинальному $\Psi_{1н}$ значению:

$$\Psi_1 = \Psi_{1н} = \sqrt{\Psi_f^2 + (L_q \cdot I_{1qn})^2} = const, \quad (25)$$

где $I_{1qn} = 2M_n / 3z_p \Psi_f$ – номинальное значение проекции I_{1q} статорного тока двигателя, соответствующее (согласно (15) при $i_{1d} = 0$) номинальному значению M_n развиваемого двигателем электромагнитного момента. Этот алгоритм управления СДПМ назовем "управлением 2". Согласно приведенному в (9) расчетному соотношению для модуля Ψ_1 обобщенного вектора $\bar{\Psi}_1$ потокосцепления статора, этот вектор характеризуется следующими ортогональными проекциями Ψ_{1d} и Ψ_{1q} на оси вращающейся ортогональной координатной системы "d-q":

$$\left. \begin{aligned} \Psi_{1d} &= \Psi_f + L_d \cdot i_{1d} = \sqrt{\Psi_1^2 - (L_q \cdot I_{1q})^2}, \\ \Psi_{1q} &= L_q \cdot I_{1q} \end{aligned} \right\}. \quad (26)$$

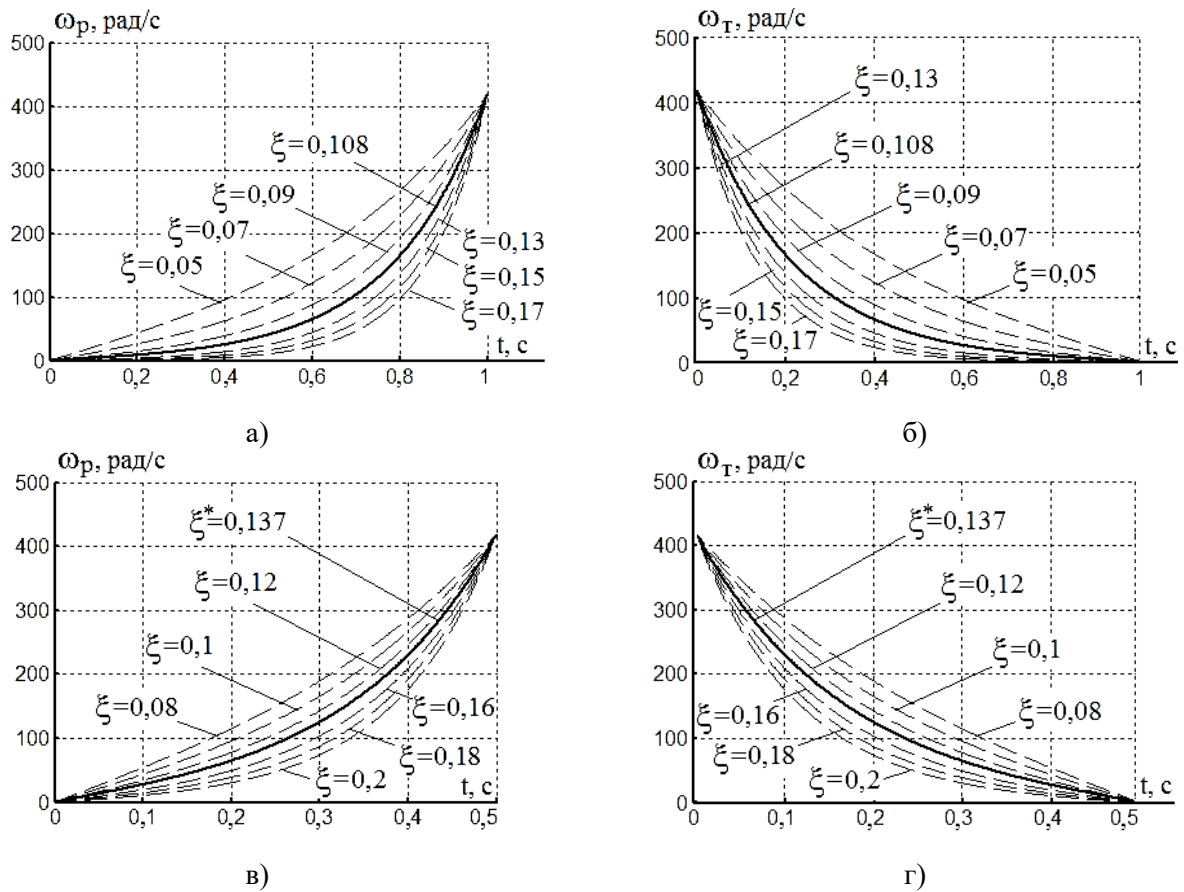


Рис. 2 Графики траекторий скорости из (22) для режимов разгона (а, в) и торможения (б, г):
 а, б – при $M_c = 0$, в, г – при $M_c = M_n$

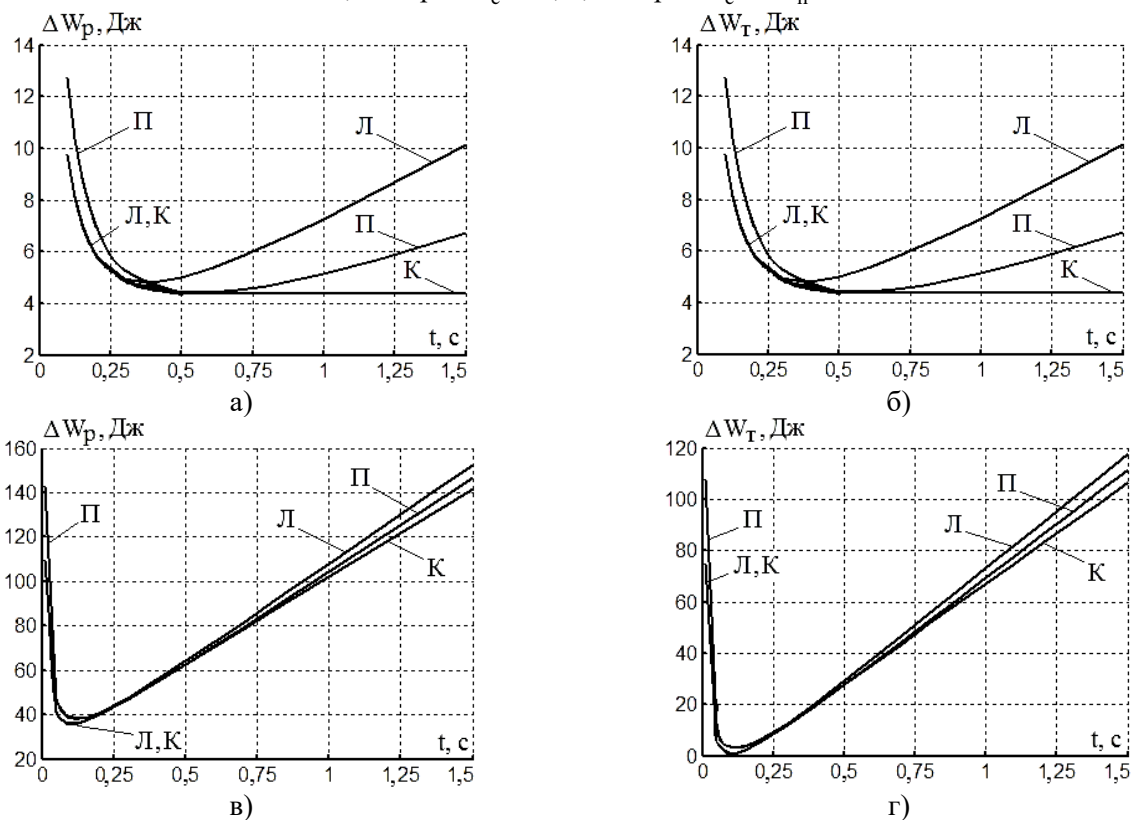


Рис. 3 – Зависимости ОЭПЭ для СДПМ с управлением 1 в режимах разгона (а, в) и торможения (б, г) при изменении длительностей этих режимов (а, б – при $M_c = 0$, в, г – при $M_c = M_n$; Л, П, К – соответственно для линейной, параболической и квазиоптимальной траекторий скорости)

Подставив окончательное выражение из первой формулы в (26) в соотношения из (9) для модуля Ψ_1 потокосцепления статора и для развиваемого электромагнитного момента M двигателя, получим следующие расчетные зависимости для ортогональных проекций i_{1d} и i_{1q} статорного тока СДПМ при управлении 2:

$$\left. \begin{aligned} i_{1d} &= \frac{I}{L_d} \left[\sqrt{\Psi_{1н}^2 - (L_q \cdot i_{1q})^2} - \Psi_f \right], \\ i_{1q} &= \frac{2M}{3z_p \left[\sqrt{\Psi_{1н}^2 - (L_q \cdot i_{1q})^2} - L_q \cdot i_{1d} \right]} \end{aligned} \right\}. \quad (27)$$

С использованием последних выражений предложена методика расчета ОЭПЭ для пускотормозных режимов СДПМ при управлении 2:

1) для заданных (линейной, параболической или квазиоптимальной) траекторий изменения скорости ω и вычисленных из (12), (13) или (23) текущих значений производных скорости рассчитывается из (14) развиваемое значение M электромагнитного момента двигателя;

2) путем подстановки выражения для проекции i_{1d} статорного тока из первого во второе уравнение системы (27), а также после подстановки в это уравнение рассчитанного выше значения M электромагнитного момента, численными методами вычисляются из (27) значения проекций i_{1d} , i_{1q} статорного тока, соответствующие созданию данного текущего значения момента M двигателя;

3) определяются из (7) текущие значения $\Delta P_{эм}$ основных электромагнитных потерь мощности двигателя;

4) рассчитываются из (8) значения основных электромагнитных потерь энергии ΔW_p и ΔW_t для СДПМ в пускотормозных режимах.

По результатам выполненных расчетов для управления 2 и параметров рассматриваемого двигателя построены на рис. 4 в виде графиков зависимости ОЭПЭ ΔW_p и ΔW_t в функции длительностей времени разгона t_p и торможения t_t при линейной, параболической и квазиоптимальной траекториях скорости.

На четвертом этапе проведем исследование ОЭПЭ в пускотормозных режимах СДПМ при алгоритме управления, обеспечивающем минимизацию статорного тока I_1 при заданном значении M развиваемого электромагнитного момента двигателя:

$$(i_1 / M) = \min \quad (28)$$

(назовем это «управлением 3»).

Для осуществления анализа данного управления преобразуем уравнение для электромагнитного момента M из системы (9), разделив левую и правую части этого уравнения на проекцию i_{1q} , к соотношению:

$$\frac{M}{i_{1q}} = k_m \left[\Psi_f + (L_d - L_q) \cdot i_{1d} \right], \text{ где } k_m = \frac{3}{2} z_p. \quad (29)$$

Из этого соотношения найдем выражение для расчета проекции i_{1d} статорного тока:

$$i_{1d} = \frac{I}{L_d - L_q} \cdot \left[\frac{M}{k_m \cdot I_{1q}} - \Psi_f \right]. \quad (30)$$

С учетом (30) рассчитаем квадратную степень от значения i_1 модуля статорного тока:

$$i_1^2 = i_{1d}^2 + i_{1q}^2 = \frac{I^2}{k_m^2 \Delta L^2} \cdot \left[\frac{M^2}{i_{1q}^2} - \frac{2k_m M \Psi_f}{i_{1q}} + k_m^2 \cdot \Psi_f^2 \right] + i_{1q}^2, \text{ где } \Delta L = L_d - L_q. \quad (31)$$

Разделив левую и правую части выражения (31) на M^2 , вычислим соотношение i_1^2 / M^2 :

$$\frac{i_1^2}{M^2} = \frac{I^2}{k_m^2 \Delta L^2} \cdot \left[\frac{1}{i_{1q}^2} - \frac{2k_m \Psi_f}{M \cdot i_{1q}} + \frac{k_m^2 \cdot \Psi_f^2}{M^2} \right] + \frac{i_{1q}^2}{M^2}. \quad (32)$$

Пологая неизменным значение электромагнитного момента M , возьмем производные по переменной i_{1q} от левой и правой частей уравнения (32) и приравняем их к нулю:

$$\frac{d}{di_{1q}} \left(\frac{i_1^2}{M^2} \right) = \frac{-I^2}{k_m^2 \Delta L^2} \cdot \left[\frac{2}{i_{1q}^3} - \frac{2k_m \Psi_f}{M \cdot i_{1q}^2} \right] + \frac{2i_{1q}}{M^2} = 0, \quad (33)$$

что, как известно, соответствует нахождению экстремального значения соотношения i_1^2 / M^2 .

После эквивалентных математических преобразований приведем уравнение (33) к виду:

$$i_{1q}^4 + \frac{\Psi_f \cdot M}{k_m \Delta L^2} \cdot i_{1q} - \frac{M^2}{k_m^2 \Delta L^2} = 0, \quad (34)$$

в котором найденное численными методами расчета значение проекции i_{1q} статорного тока соответствует осуществлению управления 3.

Нахождение проекции i_{1d} статорного тока, соответствующей управлению 3 (с минимизацией соотношения между модулем статорного тока и электромагнитным моментом) осуществляется из приведенного ранее выражения (30).

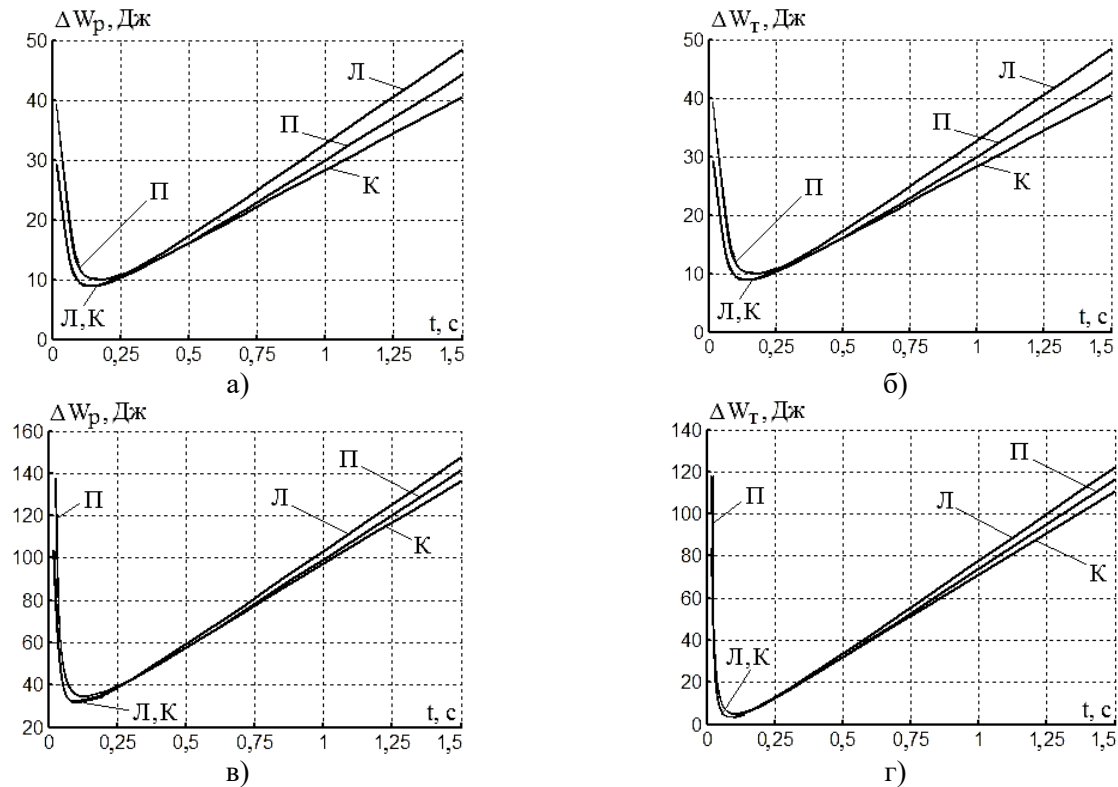


Рис. 4 – Зависимости ОЭПЭ для СДПМ с управлением 2 в режимах разгона (а, в) и торможения (б, г) при изменении длительностей этих режимов (а, б – при $M_c = 0$, в, г – при $M_c = M_n$; Л, П, К – соответственно для линейной, параболической и квазиоптимальной траекторий скорости)

Из выражений (30) и (34) при варьировании значения электромагнитного момента M (в пределах от $-2,2M_n$ до $+2,2M_n$) рассчитаны и построены на рис. 5, а, б, в в виде графиков (обозначенных цифрой 3) зависимости проекций i_{1d} , i_{1q} и модуля i_1 статорного тока для рассматриваемого СДПМ при варианте управления 3. На этих же рисунках изображены для сравнения те же величины (i_{1d} , i_{1q} и i_1) в виде графиков, обозначенных цифрами 1 и 2 соответственно для управления 1 (при $i_{1d} = 0$) и управления 2 (при $\Psi_1 = \Psi_{1n} = const$). На рис. 5, г показаны рассчитанные из выражения, приведенного в (9), значения модуля Ψ_1 статорного потокосцепления СДПМ в зависимости от развиваемого значения электромагнитного момента M двигателя, обозначенные цифрами 1, 2 и 3 соответственно для вариантов управления 1, 2 и 3.

Для нахождения проекций i_{1d} и i_{1q} статорного тока используем предложенную на третьем этапе методику (в которой применительно к управлению 3 изменяется только второй пункт). А именно, для управления 3 проекции i_{1d} и i_{1q} вычисляются через значение развиваемого электромагнитного момента M из следующих других выражений: (30) и (34). По результатам про-

веденных расчетов применительно к параметрам рассматриваемого двигателя и управления 3 построены на рис. 6 графические зависимости ОЭПЭ ΔW_p и ΔW_t в функции длительностей времен разгона t_p и торможения t_t при линейной, параболической и квазиоптимальной траекториях изменения скорости.

Выводы

1. Предложена расчетная зависимость (6), позволяющая при относительной простоте определить текущие основные потери мощности в стали СДПМ с учетом нелинейного характера их изменения от скорости ротора и впоследствии ее использовать при решении оптимизационной задачи методами вариационного исчисления.

2. Полученная аналитическая зависимость (7) позволяет рассчитать текущие основные электромагнитные потери мощности в СДПМ при разных алгоритмах управления им и для различных траекторий изменения скорости в пускотормозных режимах.

3. Предложенный согласно (24) квазиоптимальный вид траектории скорости СДПМ обеспечивает наименьшие основные электромагнитные потери энергии двигателя при пускотормозных режимах в сравнении с известными (линейным и параболическим) видами этих траекторий.

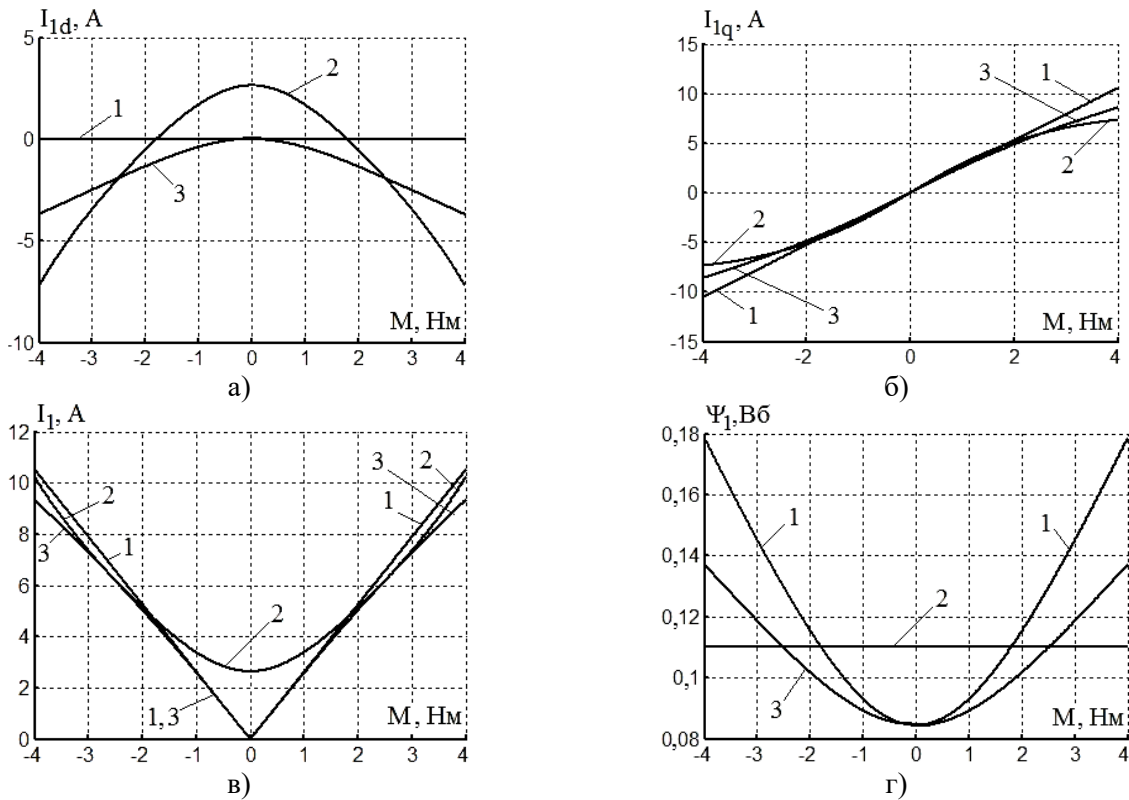


Рис. 5 Зависимости $i_{1d}(M)$, $i_{1q}(M)$, $i_1(M)$ и $\Psi_1(M)$ при алгоритмах управления 1, 2 и 3 соответственно

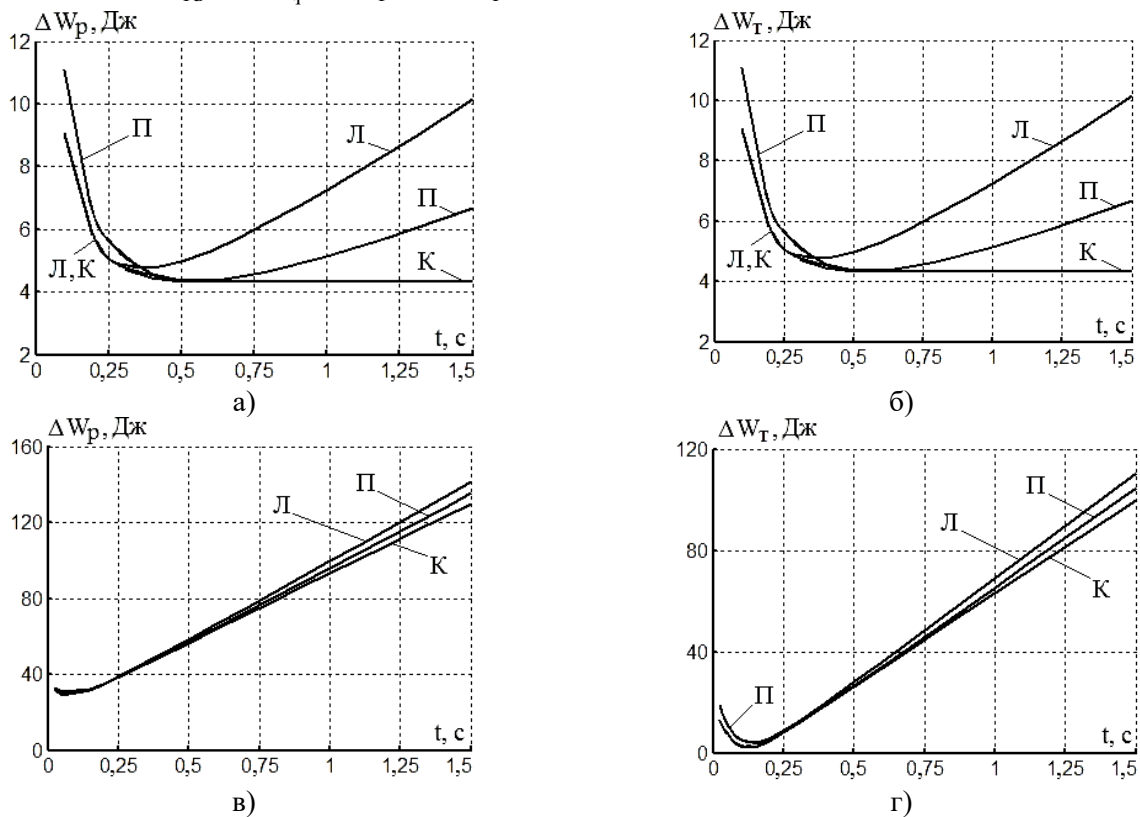


Рис. 6 – Зависимости ОЭПЭ для СДПМ с управлением 3 в режимах разгона (а, в) и торможения (б,г) при изменении длительностей этих режимов (а,б – при $M_c = 0$, в, г – при $M_c = M_H$; Л, П, К – соответственно для линейной, параболической и квазиоптимальной траекторий скорости)

4. Как свидетельствует анализ графических зависимостей ОЭПЭ, показанных на рис. 3, рис. 4, и рис. 5, наименьшие значения ОЭПЭ в

пускотормозных режимах СДПМ присущи управлению 3 (для $i_1/M = \min$), а наибольшие – управлению 2 (для $\Psi_1 = \Psi_{1H} = const$). Однако,

при этом, согласно зависимостям из рис. 5, при управлении 1 и 3 со значениями электромагнитного момента более его номинального значения наблюдается увеличение модуля статорного потокосцепления Ψ_1 значительно выше его номинального значения (равного 0,11 Вб), что требует, во избежание насыщения магнитного сердечника статора, увеличения его размеров. Это совершение не требуется при управлении 2, так как модуль магнитного потокосцепления статора при этом управлении остается всегда неизменным и равным своему номинальному значению.

5. Для всех рассмотренных видов управления и траекторий (линейной, параболической и квазиоптимальной) изменения скорости СДПМ в пускотормозных режимах основные электромагнитные потери энергии в этом двигателе, согласно рис. 3, рис. 4 и рис. 6 имеют U-образный вид, характеризующийся наличием минимальных значений указанных потерь энергии при определенных (оптимальных) значениях длительностей времен разгона и торможения двигателя. Это позволяет за счет задания оптимальных длительностей времен разгона и торможения СДПМ максимально уменьшить непроизводительные потери энергии в этом двигателе при пускотормозных режимах.

Список использованной литературы

1. Krishnan, R. Permanent Magnet Synchronous and Brushless DC Motor Drives [Text]. – CRC Press, 2010.–564p.
2. Vas, Peter. Sensorless Vector and Direct Torque Control [Text] / Peter Vas – New York: Oxford University Press Inc. 1998. – 367p.
3. Inoue, Y. Comparative Study of IPMSM Control Strategies for Torque Ripple Reduction [Text] / Yukinori Inoue, Shigeo Morimoto, Masayuki Sanada // Power Electronics and Applications.–2007.–P.1–9.
4. Перельмутер, В. М. Прямое управление моментом и током двигателей переменного тока [Текст] / В.М. Перельмутер. –Х.:Основы, 2004.–210с.
5. Толочко, О. І. Дослідження електроприводів на основі синхронного двигуна з постійними магнітами при оптимальному керуванні за максимумом моменту на ампер [Текст] / О. І. Толочко, В. В. Божко // Взрывозащищенное оборудование: сб. научн. тр. Украины НИИВЭ. – 2010. – Донецк: ООО «АИР». – С.242–247.
6. Morimoto, Shigeo. High performance servo drive system of salient pole permanent magnet synchronous motor [Text] / S. Morimoto, K. Hatanaka, Y. Tong, Y. Takeda, T. Hirasa // Industry Applications. – 1991. – Vol. 1. – P.463–468.
7. Толочко, О. І. Квазиоптимальне керування синхронним двигуном з постійними магнітами при використанні стратегії «максимальний момент на ампер» [Текст] / О. І. Толочко, А. А. Бугрів // Наукові праці ДонНТУ. Сер.: «Електротехніка і енергетика».– 2015.– № 1(17). –С.49–54.
8. Толочко, О. І. Уніфікований алгоритм керування синхронними двигунами без електричного збудження [Текст] / О. І. Толочко, В. В. Божко // Наукові праці ДонНТУ. Сер.: «Електротехніка і енергетика». – 2011. – № 11 (186). – С.392–395.
9. Толочко, О. І. Поліпшення динаміки електроприводу на базі синхронного двигуна з постійними магнітами при використанні оптимальних стратегій керування [Текст] / О. І. Толочко, А. А. Бугровий // Технічна електродинаміка. – 2016. – № 5. – С.35–37.
10. Schröder, Dierk. Electische Antriebe – Regelung von Antriebssystemen [Text] / Dierk Schröder. – Berlin, Heidelberg Springer, 2009. – 1336p.
11. Morimoto, Shigeo. Loss minimization control of permanent magnet synchronous motor drives [Text] / Shigeo Morimoto, Yi Tong, Yoji Takeda, Takao Hirasa // IEEE Transactions on industrial electronics. – 1994. – Vol. 41, N.5. – P.511–517.
12. Babayomi, O. Loss Minimizing Control of PMSM for Electric Power Steering [Text] / Oluleke Babayomi, Adeola Balogun // 17th UKSIM-AMSS International Conference on Modeling and Simulation. – 2015. – P.438–443.
13. Chuntig, C. M. Minimization of Iron Losses of Permanent Magnet Synchronous Machines [Text] / Chris Mi Chunting, R. Slemmon Gordon, Richard Bonert // IEEE Transactions on energy conversion. – 2005. – Vol. 20, N.1. – P.121–127.
14. Cavallaro, C. Efficiency Enhancement of Permanent-Magnet Synchronous Motor Drives by Online Loss Minimization Approaches [Text] / Calogero Cavallaro, Antonino Oscar Di Tommaso, Rosario Miceli // IEEE Transactions of industrial electronics. – 2005. – Vol.52, N.4. – P.1153–1160.
15. Андреева, В. А. Вариационное исчисление и методы оптимизации [Текст] / Е. А. Андреева, В. М. Цирулева. – М.: Высш. шк., 2006. – 584с.
16. Волков, В. А. Исследование квазиоптимального управления скоростью частотно-регулируемого асинхронного двигателя в пускотормозных режимах [Текст] / В. А. Волков // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – 2017. – Вип.3 (39). – С. 23–37.

References

1. Krishnan, R. (2010) Permanent Magnet Synchronous and Brushless DC Motor Drives [CRC Press]. – 564p.
2. Vas, Peter. (1998) Sensorless Vector and Direct Torque Control [Oxford University Press Inc]. – New York. – 367p.
3. Inoue, Y., Morimoto, Sh., Sanada M. (2007) Comparative Study of IPMSM Control Strategies for Torque Ripple Reduction [Power Electronics and Applications]. – P. 1–9.
4. Perel'muter, V. M. (2004) Direct torque and current control of AC engine [Pryamoye upravleniye momentom i tokom dvigateley peremennogo toka], Osnovy, Kharkov, 210p.
5. Tolochko, O. I., Bozhko V. V. (2010) Research of electric drives on the basis of a synchronous motor with permanent magnets at optimum control at the maximum moment on an ampere [Doslidzhennya yeлектроprivo-div na osnovi sinkhronnogo dviguna z postiynimi magnitami pri optimal'nomu keruvanni za maksimumom momentu na amper], Vzryvozhchishchennoye oborudovaniye: sb. nauchn. tr. Ukrainy NIIVE], Donetsk: OOO «AIR», P.242–247.
6. Morimoto, S., Hatanaka K., Tong Y., Takeda Y., Hirasu T. (1991) High performance servo drive system of salient pole permanent magnet synchronous motor [Industry Applications]. – Vol.1. – P.463–468.
7. Tolochko, O. I., Bugriv, A. A. (2015) Quasi-optimal control of the synchronous motor with permanent magnets using the strategy of "maximum moment to ampere" [Kvazi-optimal'ne keruvannya sinkhronnim dvigunom z postiynimi magnitami pri vikoristanni strategii «maksimal'niy moment na amper»], Naukovi pratsi DonNTU. Ser.: «Yeletekhnika i yenergetika», N 1 (17), P.49–54.
8. Tolchko, O. I. (2011) Unified algorithm for controlling synchronous motors without electrical excitation [Unifikovaniy algoritm keruvannya sinkhronnimi dvigunami bez yelektrichnogo zbudzhennya], Naukovi pratsi DonNTU, Ser.: «Yeletekhnika i yenergetika», N 11 (186), P.392–395.
9. Tolochko, O. I., Bugrovii, A. A. (2016) Improvement of electric drive dynamics based on synchronous motor with permanent magnets using optimal control strategies [Polipshennya dinamiki yeлектроprivo-du na bazi sinkhronnogo dviguna z postiynimi magnitami pri vikoristanni optimal'nikh strategiy keruvannya], Tekhnichna yeletekrodinamika, N 5, P.35–37.
10. Schröder, Dierk (2009) Electische Antriebe – Regelung von Antriebssystemen. – Berlin, Heidelberg Springer, – 1336p.
11. Morimoto, Sh., Tong, Y., Takeda, Y., Hirasu T. (1994) Loss minimization control of permanent magnet synchronous motor drives [IEEE Transactions on industrial electronics]. – Vol. 41, N.5. – P.511–517.
12. Babayomi, O., Balogum, A. (2015) Loss Minimizing Control of PMSM for Electric Power Steering [17th UKSIM-AMSS International Conference on Modeling and Simulation]. – P.438–443.
13. Chuntig, C. M. Slemon, R. S., Bonert, R. (2005) Minimization of Iron Losses of Permanent Magnet Synchronous Machines [IEEE Transactions on energy conversion]. – Vol. 20, N.1.– P.121–127.
14. Cavallaro, C., Tommaso, A. O. D., Miceli, R. (2005) Efficiency Enhancement of Permanent-Magnet Synchronous Motor Drives by Online Loss Minimization Approaches [IEEE Transactions of industrial electronics].– Vol.52, N.4. – P.1153–1160.
15. Andreyeva, V. A., Tsiroleva, V. M. (2006) Variational calculus and optimization methods [Variatsionnoye ischisleniye i metody optimizatsii], Vyssh. shk., Moscow, 584p.
16. Volkov, V. A. (2017) Investigation of quasi-optimal speed control of frequency-regulated asynchronous engine in idling regimes [Issledovaniye kvazi-optimal'nogo upravleniya skorost'yu chastotno-reguliruyemogo asinkhronnogo dvigatelya v pusko-tormoznykh rezhimakh], Yeletekromekhanichni i yener-gozberigayuchi sistemi, N.3 (39), P.23–37.

**ENERGY-SAVING CONTROL IN START-BRAKING REGIMES BY
FREQUENCY-REGULATED PERMANENT MAGNETS SYNCHRONOUS MACHINE**

V. A. Volkov

National Mining University

Abstract. *The article is devoted to the research of energy-saving control of a frequency-controlled permanent magnet synchronous machine, which provides reduction of the main electro-magnetic energy losses of this engine in the start-braking regimes. In the studies carried out, methods were used: variational calculus, mathematical analysis and mathematical interpolation, computer and simulation modeling. An analytical dependence is proposed for calculating the main power losses in the steel of this engine, taking into account the nonlinear nature of their variation from the rotor speed and convenient for solving optimization*

problems. A close to the optimal (called "quasi-optimal") trajectory of the change in the speed of a frequency-controlled synchronous machine is proposed and investigated, at which the lowest values of the electromagnetic losses of the engine in the start-braking regimes are ensured. The proposed results include the proposed quasi-optimal trajectory of the speed of the this machine in the start-braking regimes, which ensures the lowest (in comparison with other trajectories) values of electromagnetic energy lost in these regimes. Also, for the first time, the dependences for the main electromagnetic losses of energy of this engine on the duration of acceleration and deceleration times were applied for various types of control algorithms for this engine (with the zero value of the longitudinal projection of the stator current vector on the axis of the rotor magnetic field with the nominal modulus of the vector of the stator or by maintaining the maximum ratio of the electromagnetic moment of the motor to the modulus of the vector of its stator current) with linear, parabolic and quasi-optimal trajectories of speed variation in the start-braking regimes. The practical value of the obtained results consists in the quantitative estimation of non-productive energy losses for the considered engine in the start-braking regimes and in the reduction of energy losses in it due to the use of optimal acceleration and deceleration times for linear, parabolic and quasi-optimal velocity trajectories.

Keywords: frequency control, synchronous machine with permanent magnets, electromagnetic energy losses.

ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧЕ КЕРУВАННЯ В ПУСКОГАЛЬМІВНИХ РЕЖИМАХ ЧАСТОТНОРЕГУЛЬОВАНИМ СИНХРОННИМ ДВИГУНОМ З ПОСТІЙНИМИ МАГНІТАМИ

В. О. Волков

Національний гірничий університет

Анотація. Стаття присвячена дослідженню енергозберігаючого керування частотнорегульованим синхронним двигуном з постійними магнітами, що забезпечує зменшення основних електромагнітних втрат енергії цього двигуна в пускогальмівних режимах. При проведенні дослідженнях використовувалися методи: варіаційного обчислення, математичного аналізу і математичної інтерполяції, комп'ютерного та імітаційного моделювання. Запропонована аналітична залежність для розрахунку основних втрат потужності в сталі даного двигуна, що враховує нелінійний характер їх зміни від швидкості ротора двигуна і зручна при вирішенні оптимізаційних задач. Запропонована і досліджена близька до оптимальної (названа «квазіоптимальною») траєкторія зміни швидкості частотнорегульованого синхронного двигуна з постійними магнітами, при якій досягаються найменші значення основних електромагнітних втрат енергії цього двигуна в пускогальмівних режимах. При різних відомих алгоритмах керування цим частотнорегульованим синхронним двигуном (з підтримкою нульового значення поздовжньої проекції вектора статорного струму на вісь магнітного поля ротора, з номінальним значенням модуля статорної поточосцеплення або з максимальним співвідношенням електромагнітного моменту синхронного двигуна з постійними магнітами і модуля вектора його статорної струму) досліджено залежності основних електромагнітних втрат енергії в ньому від тривалості часів розгону і гальмування для лінійної, параболічної і квазіоптимальної траєкторій швидкості в пускогальмівних режимах. Практична цінність отриманих результатів полягає в кількісній оцінці непродуктивних втрат електричної енергії для частотнорегульованого синхронного двигуна з постійними магнітами в пускогальмівних режимах, а також в зниженні електромагнітних втрат енергії в ньому за рахунок використання оптимальних тривалостей часів розгону і гальмування для лінійної, параболічної і квазіоптимальної траєкторій швидкості.

Ключові слова: частотне регулювання, синхронний двигун з постійними магнітами, електромагнітні втрати енергії.

Получено 15.03.2018



Волков Владимир Александрович, кандидат технических наук, доцент, докторант Национального горного университета. Просп. Дмитрия Яворницкого, 19, г. Днепр, Украина, E-mail: green_stone@ukr.net, тел. +38-068-180-20-45

Volkov Volodymyr, PhD, associate Professor, Doctoral Candidate National Mining University, Dmytriy Yavornytsky Avenue, 19, Dnepr, Ukraine E-mail: green_stone@ukr.net, тел. +38-068-180-20-45

ORCID ID: 0000-0003-1262-3988