

ОПТИМАЛЬНОЕ И КВАЗИОПТИМАЛЬНОЕ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕЕ УПРАВЛЕНИЕ ПОЛОЖЕНИЕМ ЧАСТОТНОРЕГУЛИРУЕМОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Статья посвящена разработке и исследованию оптимального энергосберегающего управления положением ЧРАД при малых перемещениях, с помощью которого бы обеспечивалась минимизация общих электромагнитных потерь энергии в этом двигателе при данном режиме позиционирования.

С использованием метода вариационного исчисления предложены оптимальное и квазиоптимальное виды энергосберегающего управления положением частотнорегулируемого асинхронного двигателя (ЧРАД), которые обеспечивают минимизацию основных электромагнитных потерь энергии (ОЭПЭ) данного двигателя при отработке произвольного значения малого перемещения вала за требуемое время. Получены для предложенных видов энергосберегающего управления аналитические зависимости для изменения положения и скорости от времени, а также для определения максимального значения скорости двигателя. Выполнены расчеты от времени процессов изменения: положения, скорости, электромагнитного момента, модуля обобщенного вектора статорного тока, общих электромагнитных потерь мощности и ОЭПЭ двигателя, – соответствующих предложенным оптимальному и квазиоптимальному энергосберегающим видам управления. Проведено сравнение между собой предложенных и известных (с параболической и линейной зависимостями изменения скорости от времени) видов энергосберегающего управления положением при малых перемещениях ЧРАД. Предложенные оптимальное и квазиоптимальное энергосберегающие виды управления положением рекомендуются для применения в позиционных частотнорегулируемых асинхронных электроприводах (например, на подъемно – транспортных механизмах и поворотных платформах, в городском и железнодорожном электро-транспорте и др.).

Ключевые слова: асинхронный двигатель, частотное регулирование, оптимальное управление положением.

Принимая во внимание происходящее в последние годы широкое применение частотнорегулируемых асинхронных двигателей (ЧРАД) во всех отраслях хозяйства и наблюдающееся в эти годы удорожание электроэнергии, становится очень актуальным и востребованным практикой разработка оптимального энергосберегающего управления указанными двигателями при различных их режимах работы.

Подавляющая часть из существующих многочисленных публикаций в области оптимального энергосберегающего управления ЧРАД рассматривает главным образом установившиеся режимы работы этого двигателя. При этом основополагающие теоретические и практические исследования в части оптимального энергосберегающего частотного управления (по минимуму электромагнитных потерь мощности, по минимуму статорного тока или потребляемой активной мощности, при постоянстве главного магнитного потока или потокосцепления ротора, согласно экономичного закона частотного управления, предложенного академиком М. П. Костенко) для установившихся режимов работы ЧРАД изложены в монографиях известных ученых Булгакова А. А., Костенко М. П., Полякова В. Н., Сандлера А. С., Шрейнера Р. Т. [1–5]

Значительно меньшая часть из известных публикаций посвящается вопросам энергосберегающего управления ЧРАД в его динамических режимах: [6, 7] – при намагничивании и размагничивании этого двигателя; [8]

– энергосберегающему управлению скоростью в пускорезных режимах; [9] – оптимальным тахограммам разгона и торможения ЧРАД.

К сожалению, в известной научно-технической литературе присутствуют лишь единичные работы [10, 11], рассматривающие оптимальное энергосберегающее управление положением ЧРАД. В частности, в указанных монографиях их автор предлагается и исследуется оптимальное энергосберегающее управление при позиционировании ЧРАД в режиме малых перемещений, характеризующееся параболической зависимостью скорости от времени. Однако своим оптимальным управлением данный автор достиг при отработке малых перемещений только минимизации потерь энергии в роторе этого двигателя (не учитывая другие присутствующие потери энергии: электрические и магнитные в статоре, добавочные), что ограничивает область применения такого управления на практике. Кроме того, из [12] известно оптимальное по быстродействию управление положением двигателя при малых перемещениях, использующее (при условии неизменного значения статического момента привода) линейную зависимость изменения скорости от времени, при которой потери энергии в двигателе заметно возрастают по сравнению с энергосберегающим управлением.

Целью предложенной статьи является разработка и исследование оптимального энергосберегающего управления положением ЧРАД при малых перемещениях, по-

средством которого бы обеспечивалась минимизация общих электромагнитных потерь энергии в этом двигателе при данном режиме позиционирования.

При этом под общими электромагнитными потерями энергии (ОЭПЭ) будем понимать сумму электрических (в статорной и роторной обмотках), магнитных в стали и добавочных потерь энергии в частотнорегулируемом асинхронном двигателе.

Напомним, что в рассматриваемом режиме позиционирования под малыми перемещениями понимаются такие относительно небольшие значения изменения положения вала электродвигателя, при которых статорные токи, электромагнитный момент и скорость двигателя не достигают предельно допустимых для них максимальных значений (то есть – допустимых для них ограниченных) [12]. При этом в режиме позиционирования, как известно, вал электродвигателя должен из начального остановленного состояния перейти в конечное остановленное состояние (отличающееся от начального на заданный угол α^* перемещения) за требуемое время отработки τ указанного перемещения [12]. Режим позиционирования при малых перемещениях характерен для большинства позиционных электроприводов (например, применяемых в подъемно-транспортных механизмах, на поворотных платформах, в городском и железнодорожном электротранспорте и др.).

При выполнении поставленной в статье цели примем следующие (аналогичные из [8]) исходные допущения:

- рассматривается только основная составляющая от общих электромагнитных потерь мощности и энергии ЧРАД, создаваемая основными (первыми) гармоническими составляющими фазных статорных токов двигателя;

- системой автоматического управления (САУ) электроприводом идеально поддерживается неизменным значение модуля потокосцепления ротора: $\Psi_r = \text{const}$ (равным его номинальному значению Ψ_{rH});

- в позиционном частотнорегулируемом электроприводе посредством САУ реализуется режим торможения двигателя с возвратом (рекуперацией) накопленной кинетической энергии привода в виде электрической энергии в питающую электрическую сеть;

- пренебрегаем свободными (затухающими) составляющими статорных токов двигателя в пускотормозных режимах при позиционировании, так как влияние указанных составляющих при применении современных быстродействующих САУ (например, с подчиненным регулированием) на практике очень мало;

- во время режима позиционирования значения статического момента M_c и момента инерции J привода (приведенные к валу электродвигателя) принимаются неизменными: $M_c = \text{const}$ и $J = \text{const}$.

Все последующие аналитические зависимости и расчеты приводятся к общепринятой для машин переменной тока системе относительных единиц [5].

Согласно [8] и с учетом принятых выше допущений

общие электромагнитные потери мощности $\Delta P_{эм}$ для ЧРАД могут быть для статических и динамических режимов определены из выражения:

$$\Delta P_{эм} = a + b(M_c + J\omega')^2 + c\omega^{1,3}, \tag{1}$$

где постоянные коэффициенты рассчитываются, исходя из номинальных параметров ЧРАД, согласно соотношениям:

$$\left. \begin{aligned} a &= (\Psi_{гн}/L_m)^2 \cdot (R_s + 0,005P_H/\eta_H); \\ b &= (R_s + k_r^2 R_r + 0,005P_H/\eta_H)/(k_r^2 \Psi_{гн}^2); \\ c &= \Delta P_{ст.н}. \end{aligned} \right\} \tag{2}$$

В зависимостях (1) и (2) используются следующие обозначения:

P_H и η_H – номинальные значения соответственно полезной мощности на валу и коэффициента полезного действия двигателя;

$\Delta P_{ст.н}$ и $\Psi_{гн}$ – номинальные значения соответственно потерь в стали и модуля обобщенного вектора потокосцепления ротора двигателя;

ω и $\omega' = d\omega/dt$ – текущие значения соответственно скорости и производной скорости по времени;

R_s и R_r – активные сопротивления соответственно статорной и роторной (приведенной к статору) обмоток двигателя;

L_m и k_r – соответственно индуктивность намагничивания и коэффициент связи ротора двигателя.

Принимая во внимание поставленную в статье цель, связанную с осуществлением оптимального управления положением ЧРАД, произведем в выражении (1) замену переменной величины в виде скорости ω на переменную величину в виде угла положения α вала двигателя:

$$\omega = \frac{d\alpha}{dt} = \alpha'. \tag{3}$$

С учетом (3) преобразуем исходное выражение (1) для ОЭПЭ к следующему виду:

$$\Delta P_{эм} = a + b(M_c + J\alpha')^2 + c(\alpha')^{1,3}, \tag{4}$$

где вторая производная α'' от угла положения α по времени t равна первой производной ω' от скорости ω по времени:

$$\alpha'' = \frac{d^2\alpha}{dt^2} = \frac{d(\alpha')}{dt} = \frac{d\omega}{dt} = \omega'. \tag{5}$$

Поскольку в предлагаемой статье рассматривается отработка положения при малых перемещениях, харак-

теризующаяся, как известно, поочередным наступлением двух следующих режимов: разгона от нулевого значения скорости до максимального ее значения (в течение времени разгона t_p) и торможения от указанного максимального значения скорости до нулевого значения скорости (в течение времени торможения t_T), то полные ОЭПЭ ΔW для ЧРАД при такой обработке положения находятся из зависимости:

$$\Delta W = \Delta W_p + \Delta W_T, \quad (6)$$

где ΔW_p и ΔW_T – составляющие ОЭПЭ для ЧРАД, выделяемые в упомянутых режимах (соответственно разгона и торможения) при позиционировании этого двигателя.

Исходя из (4), рассчитывается составляющая ΔW_p ОЭПЭ в ЧРАД, соответствующая режиму разгона:

$$\Delta W_p = \int_0^{t_p} \Delta P_{эм} dt, \quad (7)$$

и составляющая ΔW_T ОЭПЭ, соответствующая режиму торможения данного двигателя:

$$\Delta W_T = \int_0^{t_T} \Delta P_{эм} dt. \quad (8)$$

При этом полное время τ обработки заданного малого перемещения находится, очевидно, в виде суммы времен разгона t_p и торможения t_T :

$$\tau = t_p + t_T. \quad (9)$$

Учитывая наличие в функции общих электромагнитных потерь мощности $\Delta P_{эм}$ из (4) высшей производной (а именно, второй производной α'' по времени от угла положения α), согласно теории вариационного исчисления [13] оптимизация (минимизация) потерь энергии ΔW_p при разгоне из (7) и ΔW_T при торможении из (8):

$$\left. \begin{aligned} \Delta W_p = \Delta W_{p0} = \min, \\ \Delta W_T = \Delta W_{T0} = \min \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

может быть проведена путем нахождения экстремалей для функционалов (7) и (8) с помощью уравнения Эйлера-Пуассона [13]:

$$F_\alpha - \frac{d}{dt}[F_{\alpha'}] + \frac{d^2}{dt^2}[F_{\alpha''}] = 0. \quad (11)$$

В последнем уравнении: F_α , $F_{\alpha'}$ и $F_{\alpha''}$ – частные производные от подынтегральной функции $\Delta P_{эм}$ в функционалах (7) и (8), которые применительно к виду функции $\Delta P_{эм}$ из (4) рассчитываются в виде:

$$\left. \begin{aligned} F_\alpha &= \frac{\partial(\Delta P_{эм})}{\partial \alpha} = 0, \\ F_{\alpha'} &= \frac{\partial(\Delta P_{эм})}{\partial \alpha'} = 1,3c(\alpha')^{0,3}, \\ F_{\alpha''} &= \frac{\partial(\Delta P_{эм})}{\partial \alpha''} = 2bM_c J + 2bJ^2(\alpha''), \\ \frac{d}{dt}[F_{\alpha''}] &= \frac{d}{dt}[2bM_c J + 2bJ^2(\alpha'')] = 2bJ^2(\alpha'''). \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

С учетом нулевого значения $F_\alpha = 0$ из (12), преобразуем уравнение (11) к виду:

$$\frac{d}{dt}[F_{\alpha'}] = \frac{d^2}{dt^2}[F_{\alpha''}]. \quad (13)$$

Интегрируя левую и правую часть уравнения (13), приведем его к следующему дифференциальному уравнению:

$$F_{\alpha'} = \frac{d}{dt}[F_{\alpha''}]. \quad (14)$$

Подставив рассчитанные значения из (12) для частных производных $F_{\alpha'}$ и $F_{\alpha''}$ в формулу (14), получим аналитическое выражение для дифференциального уравнения:

$$\alpha''' = \frac{0,65c}{bJ^2} \cdot (\alpha')^{0,3}, \quad (15)$$

описывающего экстремали для функционалов ΔW_p и ΔW_T из (7) и (8).

Для упрощения процесса получения аналитической временной зависимости, являющейся решением нелинейного дифференциального уравнения (15), с помощью подстановки соотношения (3) в уравнение (15) перейдем обратно от переменной величины в виде угла управления α к переменной величине в виде скорости ω двигателя:

$$\omega'' = K \cdot \omega^{0,3}, \quad (16)$$

где постоянный коэффициент K рассчитывается из соотношения:

$$K = \frac{0,65c}{bJ^2} = \frac{0,65\Delta P_{ст.н} k_r^2 \Psi_{гн}^2}{(R_s + k_r^2 R_r + 0,005P_H/\eta_H)J^2}. \quad (17)$$

Анализ вида дифференциального уравнения экстремали (16) и зависимости из (17) для постоянного коэффициента K в этом уравнении свидетельствует о том, что они полностью идентичны дифференциальному уравнению и постоянному коэффициенту K в нем, полученным в статье [9] применительно к экстремалам,

обеспечивающим минимизацию ОЭПЭ для ЧРАД при разгоне и торможении до установившейся скорости $\omega_{уст}$.

С учетом этого проведенными автором статьи исследованиями установлено, что, *во-первых*, частными решениями дифференциального уравнения (16), обеспечивающими минимизацию функционалов из (10), являются временные функции следующего вида для режимов разгона и торможения соответственно:

$$\omega_{po}(t) = \omega_M \left[1 - \left(\frac{t_{po} - t}{t_{po}} \right)^{\frac{20}{7}} \right], \quad (18)$$

$$\omega_{to}(t) = \omega_M \left[1 - \left(\frac{t}{t_{to}} \right)^{\frac{20}{7}} \right], \quad (19)$$

которые согласно [9] соответствуют только конкретным значениям времен разгона t_{po} и торможения t_{to} , рассчитанным из соотношения:

$$t_{po} = t_{to} = \left[\frac{260}{49} \cdot \frac{\omega_M^{0,7}}{K} \right]^{0,5}. \quad (20)$$

Применительно к параметрам асинхронного электродвигателя АДО–2000–600012У1 мощностью 2000 кВт (приведенным в [9]) и для значения скорости $\omega_M = 0,681$ о.е. = 35,65 рад/с указанные выше времена разгона и торможения составляют: $t_{po} = t_{to} = 900$ о.е. = 2,866 с, а значение постоянного коэффициента K равно $5,005 \cdot 10^{-6}$.

Обратим внимание на то, что приведенные выше аналитические соотношения (18) и (19) описывают оптимальные изменения скорости $\omega_{po}(t)$ и $\omega_{to}(t)$ ЧРАД при режимах разгона и торможения во время позиционирования при малых перемещениях для значений времен t_{po} и t_{to} из (20), где ω_M – максимальное значение скорости при отработке положения.

С учетом этого соответствующие изменениям скорости из (18) и (19) аналитические зависимости, описывающие изменение угла положения α при оптимальном энергосберегающем управлении положением ЧРАД, определяются при разгоне и торможении в виде соответственно:

$$\alpha_{po}(t) = \int_0^t \omega_{po}(t) \cdot dt = \omega_M \left[t + \frac{7}{27(t_{po})^{20/7}} \cdot (t_{po} - t)^{27/7} - \frac{7}{27} t_{po} \right], \quad 0 \leq t \leq t_{po}; \quad (21)$$

$$\alpha_{to}(t) = \int_0^t \omega_{to}(t) \cdot dt =$$

$$= \omega_M \left[t - \frac{7}{27(t_{to})^{20/7}} (t_T)^{27/7} \right], \quad 0 \leq t \leq t_{to}. \quad (22)$$

Исходя из отмеченного в (20) равенства между собой времен разгона t_{po} и торможения t_{to} , определим из зависимостей (21) и (22) начальные (при $t = 0$) и конечные (при $t = t_{po} = t_{to}$) значения для углов положения ЧРАД при разгоне:

$$\begin{cases} \alpha_{po}(0) = 0, \\ \alpha_{po}(t_{po}) = \frac{20}{27} \omega_M t_{po} \end{cases} \quad (23)$$

и торможении

$$\begin{cases} \alpha_{to}(0) = 0, \\ \alpha_{to}(t_{to}) = \frac{20}{27} \omega_M t_{to}. \end{cases} \quad (24)$$

При этом из полученных в (23) и (24) соотношений для конечного $\alpha_{po}(t_{po})$ при разгоне и конечного $\alpha_{to}(t_{to})$ при торможении значений углов положения рассчитывается максимальное значение скорости ω_M ЧРАД

$$\omega_M = \frac{27\alpha_{po}(t_{po})}{20t_{po}} = \frac{27\alpha_{to}(t_{to})}{20t_{to}} \quad (25)$$

применительно к рассматриваемому оптимальному энергосберегающему управлению положением, соответствующему зависимостям (21) и (22).

Во-вторых, с учетом предложенного в [9] квазиоптимального управления скоростью ЧРАД проведенными исследованиями установлено, что при произвольных значениях времен разгона t_p и торможения t_T , в том числе равных и отличных от значений из (20), осуществляется изменение скорости ЧРАД при квазиоптимальном управлении положением с малыми перемещениями при режимах разгона и торможения согласно зависимостям соответственно:

$$\omega_p(t) = \omega_{Mp} \cdot \left\{ 1 - \frac{\text{sh}[\xi^* \cdot \sqrt{K} \cdot (t_p - t)]}{\text{sh}(\xi^* \cdot \sqrt{K} \cdot t_p)} \right\}, \quad (26)$$

$$\omega_T(t) = \omega_{MT} \cdot \left[1 - \frac{\text{sh}(\xi^* \cdot \sqrt{K} \cdot t)}{\text{sh}(\xi^* \cdot \sqrt{K} \cdot t_T)} \right], \quad (27)$$

где ω_{Mp} и ω_{MT} – максимальные значения скорости ЧРАД, соответствующие отработке малых перемещений в ре-

жимах разгона и торможения соответственно; ξ^* – оптимальное значение поправочного коэффициента, рассчитанное в [9] и обеспечивающее наилучшую точность приближенного аналитического решения нелинейного дифференциального уравнения (16) в виде упомянутых зависимостей (26) и (27).

При этом в статье [9] установлено, что оптимальные значения поправочного коэффициента ξ^* (определенные применительно к упомянутому асинхронному двигателю АД0–2000–6000–У1) составляют: 1,197 при $t_p = t_T = 0,5$ с; 1,28 при $t_p = t_T = 1$ с; 1,32 при $t_p = t_T = 2$ с; 1,51 при $t_p = t_T = 3$ с, – и обеспечивают среднеквадратичные отклонения рассчитанных из (26) и (27) тахограмм от их точных решений из (16) с ошибкой менее 0,1 %.

Путем интегрирования зависимостей (26) и (27) рассчитаем соответствующие им аналитические зависимости для квазиоптимального энергосберегающего управления положением α при малых перемещениях при разгоне

$$\alpha_p(t) = \int_0^t \omega_p(t) \cdot dt = \omega_{MP} \left\{ t - \frac{\text{ch}(\xi^* \sqrt{K} \cdot t_p) - \text{ch}[\xi^* \sqrt{K} \cdot (t_p - t)]}{\xi^* \sqrt{K} \cdot \text{sh}(\xi^* \sqrt{K} t_p)} \right\}, \quad 0 \leq t \leq t_p \quad (28)$$

и торможении

$$\alpha_T(t) = \int_0^t \omega_T(t) \cdot dt = \omega_{MT} \left\{ t - \frac{\text{ch}(\xi^* \sqrt{K} \cdot t) - 1}{\xi^* \sqrt{K} \cdot \text{sh}(\xi^* \sqrt{K} \cdot t_T)} \right\}, \quad 0 \leq t \leq t_T. \quad (29)$$

Для общего случая (когда $\omega_{MP} \neq \omega_{MT}$) найдем из зависимостей (28) и (29) начальные (при $t = 0$) и конечные (при $t = t_p$ или $t = t_T$) условия для углов положения ЧРАД при разгоне

$$\begin{cases} \alpha_p(0) = 0, \\ \alpha_p(t_p) = \omega_{MP} \left[t_p - \frac{1}{\xi^* \sqrt{K}} \cdot \frac{[\text{ch}(\xi^* \sqrt{K} \cdot t_p) - 1]}{\text{sh}(\xi^* \sqrt{K} t_p)} \right] \end{cases} \quad (30)$$

и торможении

$$\begin{cases} \alpha_T(0) = 0, \\ \alpha_T(t_T) = \omega_{MT} \left[t_T - \frac{1}{\xi^* \sqrt{K}} \cdot \frac{[\text{ch}(\xi^* \sqrt{K} \cdot t_T) - 1]}{\text{sh}(\xi^* \sqrt{K} t_T)} \right]. \end{cases} \quad (31)$$

В том же случае, если при позиционировании с малыми перемещениями задаются равными между собой времена разгона и торможения ($t_p = t_T$), то в соответствии с соотношениями (30) и (31) также оказываются равными между собой значения обрабатываемых положений в режимах разгона и торможения:

$$\alpha_p(t_p) = \alpha_T(t_T) \quad (32)$$

при рассматриваемом квазиоптимальном энергосберегающем управлении, соответствующем зависимостям (28) и (29).

При этом, как следует из (28) и (29), становятся тоже равными между собой максимальные значения скорости ЧРАД при позиционировании в режимах разгона и торможения, которые рассчитываются из соотношений:

$$\omega_M = \omega_{MP} = \omega_{MT} = \alpha_p(t_p) / \lambda = \alpha_T(t_T) / \lambda, \quad (33)$$

где коэффициент λ вычисляется в виде:

$$\begin{aligned} \lambda &= t_p - \frac{1}{\xi^* \sqrt{K}} \cdot \frac{[\text{ch}(\xi^* \sqrt{K} \cdot t_p) - 1]}{\text{sh}(\xi^* \sqrt{K} t_p)} = \\ &= t_T - \frac{1}{\xi^* \sqrt{K}} \cdot \frac{[\text{ch}(\xi^* \sqrt{K} \cdot t_T) - 1]}{\text{sh}(\xi^* \sqrt{K} t_T)}. \end{aligned} \quad (34)$$

Общий вид аналитической зависимости, описывающей изменение угла положения $\alpha(t)$ при симметричном (для $t_p = t_T$) оптимальном и квазиоптимальном энергосберегающем управлении с малыми перемещениями, имеет следующий вид:

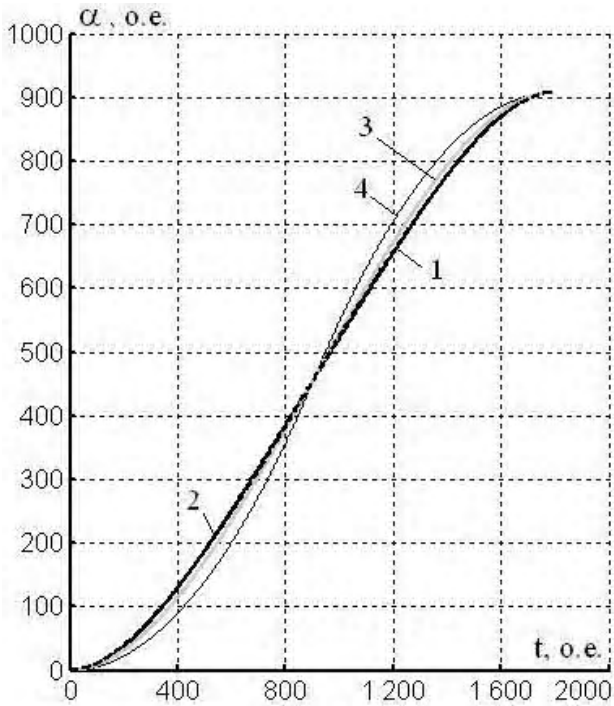
$$\alpha(t) = \begin{cases} \alpha_p(t) & \text{при } 0 \leq t \leq 0,5\tau; \\ \alpha_p(0,5\tau) + \alpha_T(t) & \text{при } 0,5\tau < t \leq \tau, \end{cases} \quad (35)$$

где общее время τ отработки малого перемещения при предложенном симметричном управлении находится с учетом (9) в виде:

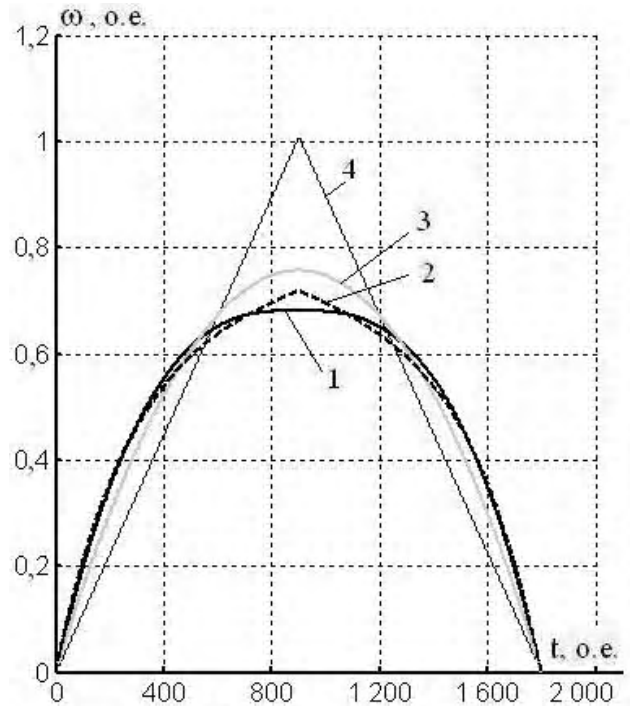
$$\tau = 2t_p = 2t_T. \quad (36)$$

Для определения текущего значения электромагнитного значения M и модуля обобщенного вектора статорного тока I_1 ЧРАД служат известные зависимости [9]:

$$\begin{cases} M = M_c + J\omega', \\ I_1 = \left[(\Psi_{гн} / L_m)^2 + M_c^2 / (k_r \Psi_{гн})^2 \right]^{0,5}. \end{cases} \quad (37)$$

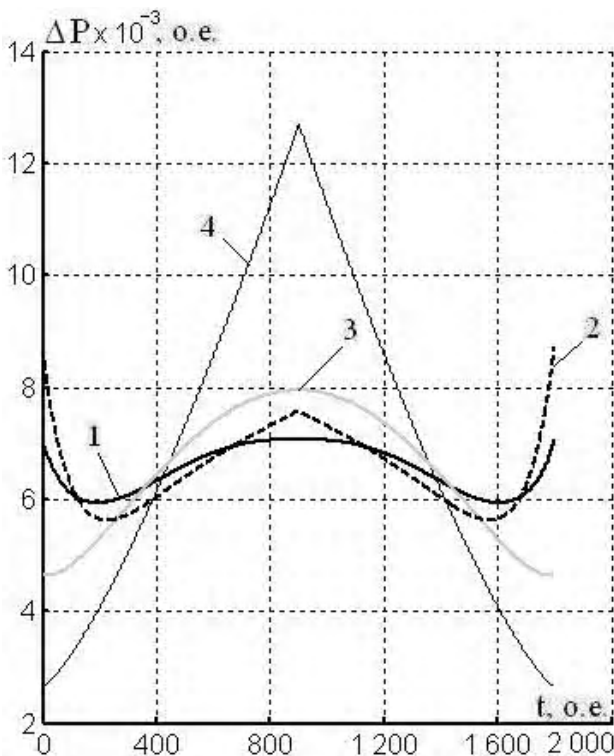


а)

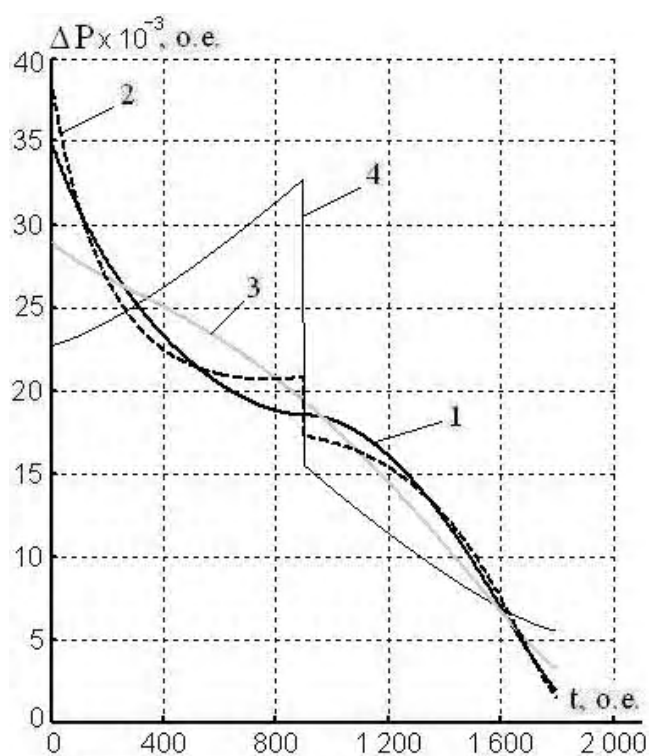


б)

Рисунок 1 – Графики изменения положения (а) и скорости (б) ЧРАД

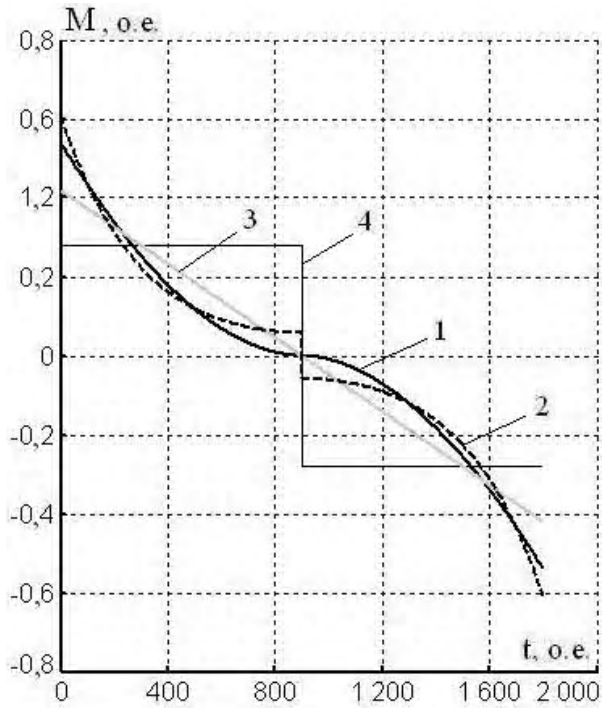


а)

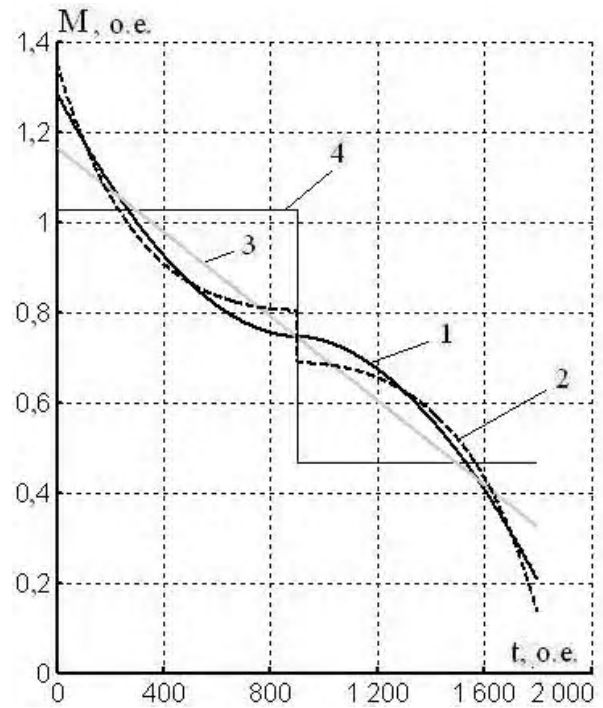


б)

Рисунок 2 – Графики изменения потерь мощности ЧРАД
(а – на холостом ходу; б – с номинальной нагрузкой)

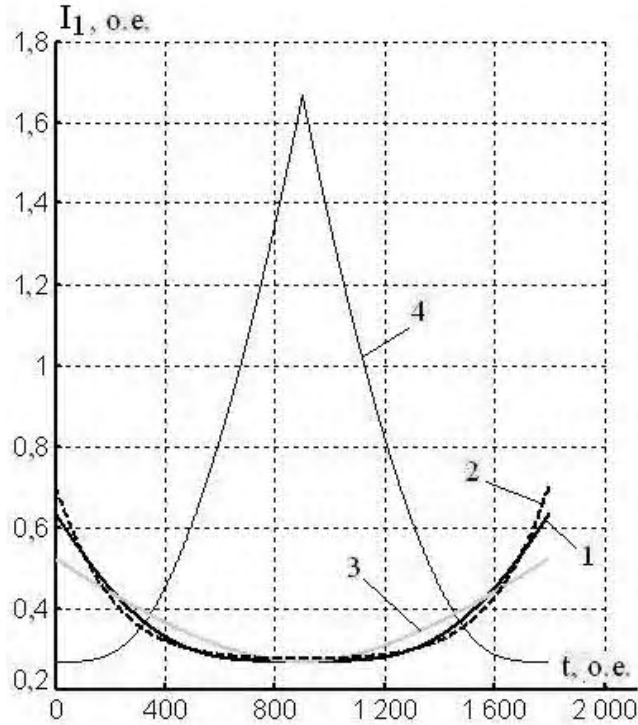


а)

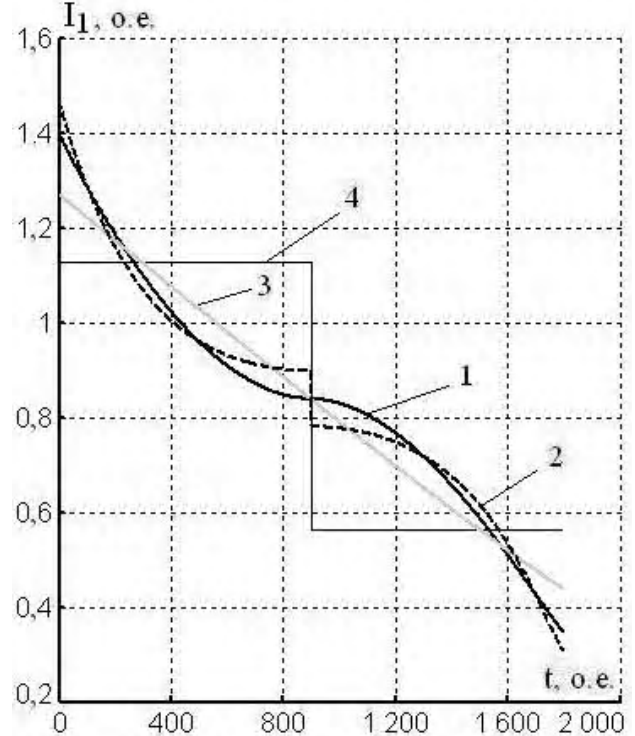


б)

Рисунок 3 – Графики изменения электромагнитного момента ЧРАД
(а – на холостом ходу; б – с номинальной нагрузкой)



а)



б)

Рисунок 4 – Графики изменения модуля обобщенного вектора статорного тока ЧРАД
(а – на холостом ходу; б – с номинальной нагрузкой)

Таблица 1 – Аналитические зависимости для изменения положения ЧРАД и данные расчета ОЭПЭ при отработке положения ($\alpha^* = 908 \text{ рад} = 24,1 \text{ оборота}$ за время $\tau = 5,73 \text{ с}$) этим двигателем

№ п/п	Вид управления положением	Режим	Расчетная зависимость для изменения положения	Макс. скорость ω_M , о.е.	Значения ОЭПЭ ΔW , кДж	
					х.х.	н.н.
1	оптимальный	Р	формула (21)	0,681	25,19	91,92
		Т	формула (22)			
2	квазиоптимальный	Р	формула (28)	0,719	25,26	93,23
		Т	формула (29)			
3	С параболическим изменением скорости	Р	$\alpha_P(t) = \frac{3}{4} \alpha^* \left[\left(\frac{t}{t_P} \right)^2 - \frac{1}{3} \left(\frac{t}{t_P} \right)^3 \right]$	0,756	25,30	94,34
		Т	$\alpha_T(t) = \frac{3}{4} \alpha^* \left[\left(\frac{t}{t_T} \right) - \frac{1}{3} \left(\frac{t}{t_T} \right)^3 \right]$			
4	С линейным изменением скорости	Р	$\alpha_P(t) = \frac{\alpha^*}{2} \left(\frac{t}{t_P} \right)^2$	1,009	27,16	104,61
		Т	$\alpha_T(t) = \alpha^* \left[\left(\frac{t}{t_T} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{t}{t_T} \right)^2 \right]$			

С использованием полученных аналитических зависимостей: (6) – (8), (26) – (29), (35) и (37), – выполнены (для параметров электродвигателя АДО–2000–6000–12У1) расчеты текущих значений скорости $\omega(t)$ и положения $\alpha(t)$, общих электромагнитных потерь мощности $\Delta P(t)$, электромагнитного момента $M(t)$ и модуля обобщенного вектора статорного тока $I_1(t)$, а также значений ОЭПЭ ΔW для предложенных оптимального и квазиоптимального энергосберегающего управления положением, результаты которых представлены (для $t_p = t_T = 900 \text{ о.е.} = 2,87 \text{ с}$) в виде графиков на рис. 1 – рис. 4 (кривая 1 – для оптимального, кривая 2 – квазиоптимального управления) и в виде численных значений потерь энергии ΔW в табл. 1. При этом задавалась отработка малого перемещения α^* вала ЧРАД, равная $908 \text{ о.е.} = 151 \text{ рад} = 24,1 \text{ оборота}$.

Для сравнения на тех же рисунках и в той же таблице приведены графики упомянутых величин ЧРАД и численные значения полных ОЭПЭ при отработке того же значения малого перемещения (при том же значении времени отработки), соответствующие другим известным способам управления положением этого ЧРАД: с параболическим из [10, 11] (показаны кривой 3) и линейным (показаны кривой 4) изменениям скорости двигателя. При этом на всех рисунках режиму разгона двигателя соответствует интервал времени от нуля до 900 о.е. , а режиму торможения – от 900 до 1800 о.е.

ВЫВОДЫ

1. С использованием метода вариационного исчисления предложено оптимальное и квазиоптимальное энергосберегающее управление ЧРАД, которое обеспечивает минимизацию общих электромагнитных потерь энергии данного двигателя при отработке произвольного значения малого перемещения за требуемое время отработки τ . Указанные виды энергосберегающего управления положением не только позволяет снизить потери электроэнергии в пускотормозных режимах ЧРАД, но и за счет этого уменьшить нагрев двигателя, что позволяет продлить его сроки службы в эксплуатации.

2. Установлено, что предложенное оптимальное энергосберегающее управление положением может быть реализовано: зависимостями (18) и (19) в виде степенных временных функций применительно к значению времени отработки, определяемому из соотношения (20), а квазиоптимальное управление – зависимостями (26) и (27) в виде участков из функций гиперболического косинуса (для произвольных значений времен отработки положения).

3. Выявлено, что при постоянном статическом моменте ($M_c = \text{const}$) предложенные оптимальное и квазиоптимальное энергосберегающее управление положением ЧРАД характеризуются кривой изменения положения $\alpha(t)$ и тахограммой скорости $\omega(t)$, не зависящими (то есть – инвариантными) от значения статического момента M_c привода, что упрощает реализацию данных видов энергосберегающего управления на практике.

4. Впервые получены зависимости (25) или (33) и (34), которыми устанавливается взаимосвязь максимального значения скорости ω_m при малых перемещениях от значения угла и времени обрабатываемого положения, что позволяет оценить аналитически упомянутое максимальное значение скорости.

5. Применение предложенных оптимального и квазиоптимального энергосберегающего управления положением ЧРАД позволяет в режимах малых перемещений уменьшить ОЭПЭ в данном двигателе на 3 % и 14 % по сравнению с известными и применяемыми на практике видами энергосберегающего управления: с параболическим и линейным изменениями скорости соответственно. При этом отличие между собой в потерях энергии при оптимальном и квазиоптимальном управлении составляет менее: 0,3 % – на холостом ходу или 1,5 % – при номинальной нагрузке ЧРАД.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Булгаков А. А. Частотное управление асинхронными электродвигателями / А. А. Булгаков. – М. : Наука, 1966. – 298 с.
2. Костенко М. П. Электрические машины : Специальная часть / М. П. Костенко. – Л. : Госэнергоиздат, 1949. – 708 с.
3. Поляков В. Н. Экстремальное управление электрическими двигателями / В. Н. Поляков, Р. Т. Шрейнер. – Екатеринбург : УГТУ – УПИ, 2006. – 420 с.
4. Сандлер А. С. Автоматическое частотное управление асинхронным двигателем / А. С. Сандлер, Р. С. Сарбатов. – М. : Энергия, 1974. – 328 с.
5. Шрейнер Р. Т. Оптимальное частотное управление асинхронными электроприводами / Р. Т. Шрейнер, Ю. А. Дмитренко. – Кишинев : Штиинца, 1982. – 224 с.
6. Толочко О. И. Управление процессами намагничивания и размагничивания асинхронного двигателя в

- системах векторного управления / О. И. Толочко, П. И. Розкаряка, Г. С. Чекавский, А. К. Кушель // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. Щоквартальний науково-видавничий журнал. – Кременчук : КрНУ, 2011. – Вип. 3/2011(15). – С. 79–82.
7. Волков В. А. Оптимизация режимов намагничивания и размагничивания частотно-регулируемого асинхронного двигателя / В. А. Волков // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Сер. Електромеханіка і енергетика. – Донецьк : ДНТУ. – 2013. – Вип. 2(15). – С. 64–69.
8. Волков А. В. Энергосберегающее управление скоростью частотно-регулируемого асинхронного двигателя в пускотормозных режимах / А. В. Волков, А. А. Колесников // Електротехніка. – 2013. – № 5. – С. 2–9.
9. Волков В. А. Расчет оптимальных тахограмм разгона и торможения частотно-регулируемого асинхронного двигателя / В. А. Волков // Електротехніка та електроенергетика. – 2015. – № 2. – С. 55–64.
10. Петров Ю. П. Оптимальное управление электроприводом / Ю. П. Петров. – М.–Л.: Госэнергоиздат, 1961. – 187 с.
11. Петров Ю. П. Оптимальное управление электрическим приводом с учетом ограничений по нагреву / Ю. П. Петров. – Л.: Энергия, 1971. – 144 с.
12. Башарин А. В. Управление электроприводами / А. В. Башарин, В. А. Новиков, Г. Г. Соколовский. – Л.: Энергоиздат, 1992. – 392 с.
13. Андреева Е. А. Вариационное исчисление и методы оптимизации / Е. А. Андреев, В. М. Цирулева. – М. : Высш.шк., 2006. – 584 с.
14. Тиховод С. М. Усовершенствование итерационных методов решения систем нелинейных уравнений состояния магнитоэлектрических схем замещения / С. М. Тиховод // Електротехніка та електроенергетика. – 2015. – № 1. – С. 46–49.

Волков В. О.

Канд.техн.наук, Запорізька державна інженерна академія, Україна

ОПТИМАЛЬНЕ І КВАЗІОПТИМАЛЬНЕ ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧЕ УПРАВЛІННЯ ПОЛОЖЕННЯМ ЧАСТОТНОРЕГУЛЬОВАНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГУНА

Стаття присвячена розробці й дослідженню оптимального енергозберігаючого керування положенням ЧРАД при малих переміщеннях, за допомогою якого б забезпечувалася мінімізація загальних електромагнітних втрат енергії в цьому двигуні при даному режимі позиціонування.

З використанням методу варіаційного числення запропоновані оптимальне і квазіоптимальне види енергозберігаючого управління становищем частотнорегульованого асинхронного двигуна (ЧРАД), які забезпечують мінімізацію основних електромагнітних втрат енергії (ОЕВЕ) даного двигуна при відпрацюванні довільного значення малого переміщення вала за необхідний час. Отримано для запропонованих видів енергозберігаючого управління аналітичні залежності для зміни положення і швидкості від часу, а також для визначення максимального значення швидкості двигуна. Виконано розрахунки від часу процесів зміни: положення, швидкості, електромагнітного моменту, модуля узагальненого вектора статорного струму, загальних електромагнітних втрат потужності і ОЕВЕ двигуна, – відповідних запропонованим оптимальному і квазіоптимальному енергозберігаючим видам управління. Проведено порівняння між собою запропонованих і відомих (з параболическої і лінійної залежностями зміни швидкості від часу) видів енергозберігаючого управління становищем при малих переміщеннях ЧРАД. Запропоновані оптимальне і квазіоптимальне енергозберігаючі види управління

становищем рекомендуються для застосування в позиційних частотнорегульованих асинхронних електроприводах (наприклад, на підйомно-транспортних механізмах і поворотних платформах, в міському та залізничному електротранспорті і ін.).

Ключові слова: асинхронний двигун, частотне регулювання, оптимальне регулювання положення.

Volkov V.A.

Ph.D., Zaporozhye State Engineering Academy, Ukraine

OPTIMAL AND QUASI-ENERGY-SAVING CONTROL POSITION VARIABLE FREQUENCY ASYNCHRONOUS MOTORS

The article is devoted to developing and researching the best energy-saving control position FCIM with small movements with the help of which would be provided to minimize the total electromagnetic energy losses in the engine when this positioning mode.

Using the method of the calculus of variations to offer optimal and quasi-optimal types of energy-saving variable frequency control the position of the induction motor (FCIM), which provide basic minimization of electromagnetic energy loss (BEEL) of the engine when developing an arbitrary value of a small displacement of the shaft in the required time. Obtained for the proposed types of energy-saving control analytical dependencies to change the position and speed of the time, as well as to determine the maximum value of the engine speed. Calculations of the time change process: position, speed, electromagnetic torque, modulus of the generalized vector of the stator current, general electromagnetic power loss and engine BEEL – relevant proposals and quasi optimal energy-saving type of control. A comparison between a proposed and known (parabolic and linear dependence of the velocity on the time change) types of energy-saving position control with small movements FCIM. Proposed optimal and quasi-optimal types of energy-saving position control are recommended for use in positional variable frequency asynchronous electric drive (for example, lifting-transport mechanisms and rotary platforms, urban and railway electric transport, etc.).

Keywords: asynchronous motor, frequency regulation, an optimal position control.

REFERENCES

1. Bulgakov A. A. Chastotnoe upravlenie asinchronniv electrodvigatelem. Moscow, Nauka, 1966, 298 S.
2. Kostenko M. P. Elektricheskie mashini: Specialnaya chast. L, Gosenergoizdat, 1949, 708 S.
3. Polyakov V. N., Shreyner R. T. Ekstremalnoe upravlenie elektricheskim dvigatelem. Ekaterinburg, UGTU-UPI, 2006, 420 S.
4. Sandler A. S., Sarbatov R. S. Avtomaticheskoe chastotnoe upravlenie asinchronnim dvigatelev. M, Energiya, 1974, 328 S.
5. Shreyner R. T., Dmitrenko U. A. Optimalnoe chastotnoe upravlenie asinchronnimi electoprivodami. Kishinev: Shtiica, 1982, 224 S.
6. Tolochko O. I., Rozkaryaka P. I., Chekavsky G. S., Kushel A. K. Upravlenie processami namagnichivaniya I razmagnichivania asinchronnogo dvigatelya v sistemah vectornogo upravleniya. Kremenchuk:KrNU, 2011, Vip. 3, S.79–82.
7. Volkov V. A. Optimizacia regimov namagnichivania I razmagnichivania chastotno-reguliruemogo asinchronnogo dvigatelya. Doneck: DNTU, 2013, Vip.2, S. 64–69.
8. Volkov A. V., Kolesnikov A. A. Energozberegaushee upravlenie skorostyu chastotno-reguliruemogo asinchronnogo dvigatelya v puskotormoznih regimah. *Electrotechnika*, 2013, No 5, S. 2–9.
9. Volkov V. A. Raschet optimalnih tahogram razgona I tormogeniya chastotno-reguliruemogo asinchronnogo dvigatelya. *Electrotechnika ta electroenergetika*, 2015, No 2, S. 55–64.
10. Petrov U. P. Optimalnoe upravlenie electroprivodov. M-L, Gosenergoizdat, 1961, 187 S.
11. Petrov U. P. Optimalnoe upravlenie elektricheskim privodom s uchetom ogranicheniy po nagrevu. L, Energiya, 1971, 144 S.
12. Basharin A. V., Novikov V. A., Sokolovsky G. G. Upravlenie electroprivodami. L, Energoizdat, 1992, 392 S.
13. Andreeva E. A., Ciruleva V. M. Variacionnoe ischiclenie i metodi optimizacii. M, 2006, 584 S.
14. Tihovod S. M. Usovershenstvovanie metodov resheniya system nelineynih uravneniy sostoyaniya magnitoelektricheskikh shem zameheniya. *Electrotechnika ta electroenergetika*, 2015, No 1, S. 46–49.