

УДК 621.316.13

АНАЛИТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ОСНОВНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОТЕРЬ ЭНЕРГИИ ЧАСТОТНОРЕГУЛИРУЕМОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ПРИ ПОЗИЦИОНИРОВАНИИ

ВОЛКОВ В.А.

канд. техн. наук, докторант Национального горного университета, г. Днепр, Украина, e-mail: green_stone@ukr.net

Цель работы. Получение аналитических зависимостей для расчета основных электромагнитных потерь энергии частотнорегулируемого асинхронного двигателя в режимах позиционирования с малыми перемещениями при различных видах (линейном, параболическом и квазиоптимальном) изменения его скорости.

Методы исследования. Методы подобия, дифференциального и интегрального исчисления, аналитической интерполяции, математического анализа.

Полученные результаты. Получены аналитические зависимости для расчета текущих электромагнитных потерь мощности и основных электромагнитных потерь энергии частотнорегулируемого асинхронного двигателя в режимах позиционирования с малыми перемещениями при различных видах (линейном, параболическом и квазиоптимальном) изменения его скорости. Получен универсальный вид аналитической зависимости для расчета оптимальных времен разгона и торможения частотнорегулируемого асинхронного двигателя при позиционировании с малыми перемещениями, соответствующий минимизации основных электромагнитных потерь энергии этого двигателя при указанном позиционировании для различных видов (линейном, параболическом и квазиоптимальном) изменения его скорости. Выполнена сравнительная количественная оценка изменения: оптимальных значений основных электромагнитных потерь энергии частотнорегулируемого асинхронного двигателя и соответствующих им максимальных значений скорости и оптимальных времен разгона и торможения, – в функции обрабатываемых заданных малых перемещений для рассматриваемых разных видов траекторий скорости двигателя.

Научная новизна. Впервые получены аналитические зависимости для расчета основных электромагнитных потерь энергии частотнорегулируемого асинхронного двигателя при позиционировании с малыми перемещениями в функции заданных значений перемещений вала двигателя и заданных значений его времен разгона и торможения при обработке упомянутых заданных перемещений. Впервые получены зависимости для количественной оценки минимальных основных электромагнитных потерь энергии асинхронного двигателя и соответствующих им максимальных значений скорости и оптимальных времен разгона и торможения в функции обрабатываемых заданных малых перемещений для линейной, параболической и квазиоптимальной траекторий скорости двигателя при позиционировании.

Практическая ценность. Полученные расчетные аналитические зависимости предназначены для количественной оценки основных электромагнитных потерь энергии частотнорегулируемого асинхронного двигателя в режиме малых перемещений. Посредством определения с помощью предложенных аналитических зависимостей максимальных значений скорости и оптимальных времен разгона и торможения частотнорегулируемого асинхронного двигателя достигается минимизация его основных электромагнитных потерь энергии при позиционировании для линейной, параболической и квазиоптимальной траекторий скорости.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, частотное регулирование, электромагнитные потери энергии, позиционирование.

I. ВВЕДЕНИЕ

Исходя из происходящего широкого применения во всех отраслях хозяйства частотнорегулируемых асинхронных электроприводов и наблюдающегося удорожания электрической энергии, в мире и Украине стала актуальной и остро востребованной практикой задача оценки и повышения энергоэффективности указанных электроприводов. Для этого необходимо осуществление количественной оценки в них непрямых потерь энергии (из которых, как известно, наибольшая часть приходится на основные электромагнитные потери энергии в асинхронном двигателе, вызванные основными гармоническими составляющими фазных статорных токов и потоковосцеплений). Для выполнения упомянутой количественной оценки энергоэффективности, в свою очередь,

требуется наличие расчетных зависимостей для основных электромагнитных потерь энергии в частотнорегулируемом асинхронном двигателе (ЧРАД). Причем полученные в аналитическом виде такие зависимости не только упрощают количественные расчеты потерь энергии, но и позволяют решить (с использованием методов математического анализа) в последующем оптимизационную задачу по минимизации непрямых потерь энергии в ЧРАД.

II. АНАЛИЗ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Из известных в отечественной и зарубежной научно-технической литературе публикаций, посвященных расчету энергетических режимов и потерь энергии для ЧРАД, в подавляющем большинстве рассматриваются расчеты применительно к установившимся режимам работы: для средних значений потребляемой

мощности и потерь мощности указанного двигателя [1] – [6] либо текущих (мгновенных) значений этих величин без учета [2], [7] или с учетом [2], [8] несинусоидальной формы фазных статорных токов ЧРАД (при питании от статических преобразователей частоты). При этом лишь в небольшой части из известных работ рассматриваются потери энергии для ЧРАД в динамических режимах: в пускотормозных режимах [9], [10] либо при позиционировании данного двигателя с малыми перемещениями [11] – [13].

Причем в последних упомянутых работах [11] – [13] проводимые в них исследования потерь энергии ЧРАД при позиционировании ограничиваются только нахождением электрических потерь энергии (от действия протекающих токов в статорной и роторной обмотках) двигателя, а магнитные потери энергии в двигателе – не учитываются. Это, очевидно, не позволяет количественно оценить общие электромагнитные потери в ЧРАД (а, следовательно, – дать объективную оценку энергоэффективности функционирования этого двигателя). Кроме того, в работах [11] – [13] определение значений электрических потерь энергии при позиционировании осуществляется путем численного интегрирования потерь электрической мощности данного двигателя, находящейся из соответствующей ей аналитической зависимости. Однако использование численных методов расчета (например, из [14] – [16]), которые стали широко применяться с развитием компьютерной техники, и полученных с их помощью численных результатов расчета потерь энергии имеет свой недостаток. А именно – они не позволяют (по сравнению с аналитическими зависимостями) провести с применением методов математического анализа последующую оптимизацию (минимизацию) указанных потерь энергии.

III. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью статьи является получение аналитических зависимостей для расчета основных электромагнитных потерь энергии частотнорегулируемого асинхронного двигателя в режимах позиционирования с малыми перемещениями при различных существующих видах (линейном, параболическом и квазиоптимальном) изменениях его скорости.

IV. ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА И АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

При дальнейших исследованиях приняты исходные допущения, идентичные рассмотренным в [16]. При этом объектом исследования являются режимы малых перемещений ЧРАД, характеризующиеся отсутствием ограничений основных рабочих координат (статорного тока, электромагнитного момента и скорости) двигателя (величины которых полагаются находящимися в пределах допустимых для них значений). Значения статического момента M_c и момента инерции J привода (приведенные к валу двигателя) в исследуемых режимах малых перемещений принимаются неизменными. Значение модуля потокосцеп-

ления ротора Ψ_r ЧРАД также полагается неизменным и равным своему номинальному значению Ψ_{rn} . Все последующие аналитические зависимости и расчеты приводятся в общепринятой для машин переменного тока системе относительных единиц [2], [6].

С учетом вышеизложенного в качестве исходных математических зависимостей для нахождения основных электромагнитных потерь мощности $\Delta P_{эм}$ и потерь энергии ΔW_p и ΔW_m в режимах малых перемещений используются следующие [16]:

$$\left. \begin{aligned} \Delta P_{эм} &= a + b \cdot [M_c + J \cdot (\alpha'')]^2 + c \cdot (\alpha')^{1,3} \\ \Delta W_p &= \int_0^{t_p} \Delta P_{эм} \cdot dt, \quad \Delta W_m = \int_0^{t_m} \Delta P_{эм} \cdot dt, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где a , b , c – коэффициенты, определяемые через параметры двигателя в виде [9]:

$$\left. \begin{aligned} a &= (\Psi_{rn} / L_m)^2 \cdot (R_s + 0,005 \cdot P_n / \eta_n), \\ b &= (R_s + k^2 R_r + 0,005 \cdot P_n / \eta_n) / (k_r^2 \Psi_{rn}^2), \\ c &= \Delta P_{см.н} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

В данных зависимостях применяются обозначения: ΔW_p и ΔW_m – основные электромагнитные потери энергии (ОЭПЭ) двигателя, соответствующие отработке малого перемещения при режимах разгона (от нулевой до максимальной скорости, обозначенные индексом «р») и торможения (от максимальной до нулевой скорости, обозначенные индексом «т»); $\alpha' = d\alpha / dt$ и $\alpha'' = d^2\alpha / dt^2$ – соответственно первая и вторая производные по времени t от текущего значения положения α вала двигателя; P_n и η_n – номинальные значения соответственно полезной мощности на валу и коэффициента полезного действия двигателя; $\Delta P_{см.н}$ и Ψ_{rn} – номинальные значения соответственно потерь в стали и модуля обобщенного вектора потокосцепления ротора двигателя; R_s и R_r – активные сопротивления соответственно статорной и роторной (приведенной к статору) фазных обмоток двигателя; L_m и k_r – соответственно индуктивность намагничивания и коэффициент связи ротора ЧРАД.

После нахождения из (1) упомянутых составляющих ОЭПЭ ΔW_p и ΔW_m (соответствующих режимам разгона и торможения двигателя) значение ΔW_Σ общих ОЭПЭ для ЧРАД при отработке малого перемещения определяется для всех траекторий изменения скорости двигателя в виде суммы указанных составляющих [16]:

$$\Delta W_\Sigma = \Delta W_p + \Delta W_m. \quad (3)$$

На первом этапе выполним для ЧРАД аналитический расчет составляющих ОЭПЭ, соответствующ-

щих в режиме малых перемещений линейному виду изменения скорости ω двигателя [16]:

$$\omega = \alpha'_p = \omega_{mp} \cdot \left(\frac{t}{t_p} \right) \quad \text{и} \quad \omega = \alpha'_m = \omega_{mm} \cdot \left(\frac{t}{t_m} \right) \quad (4)$$

при разгоне и торможении соответственно.

Здесь и далее: α_p и α_m – текущие значения положения вала ЧРАД (измеряемые от нулевых положений, соответствующих началу наступления режимов соответственно разгона и торможения); α'_p и α'_m – производные по времени от указанных выше текущих значений α_p и α_m положения; ω_{mp} и ω_{mm} – максимальные значения текущих скоростей ЧРАД соответственно в режимах разгона и торможения при малых перемещениях его вала; текущее время t при разгоне и торможении, отсчитываемое от начала и на протяжении интервалов разгона или торможения соответственно: $0 \leq t \leq t_p$ и $0 \leq t \leq t_m$ (где t_p и t_m – длительности времен разгона и торможения двигателя соответственно).

Взяв определенные интегралы от правых частей соотношений из (4) в пределах от нуля до текущего значения времени t , получим зависимости для нахождения текущих положений α_p и α_m вала двигателя при линейном виде изменения его скорости:

$$\alpha_p = \int_0^t \omega_{mp} \cdot \left(\frac{t}{t_p} \right) \cdot dt = \frac{\omega_{mp}}{2t_p} \cdot t^2 \quad (5)$$

– при разгоне или

$$\alpha_m = \int_0^t \omega_{mm} \cdot \left(\frac{t_m - t}{t_m} \right) \cdot dt = \frac{\omega_{mm}}{t_m} \cdot \left(t_m t - \frac{t^2}{2} \right) \quad (6)$$

– при торможении.

Для линейного вида изменения скорости заданные (конечные) перемещения α_p^* и α_m^* определяются при подстановке в интегральные соотношения из (5) и (6) величин верхних пределов: $t = t_p$ и $t = t_m$ соответственно и вычисляются из выражений:

$$\alpha_p^* = \frac{1}{2} \omega_{mp} \cdot t_p \quad \text{и} \quad \alpha_m^* = \frac{1}{2} \omega_{mm} \cdot t_m. \quad (7)$$

Обратим внимание на то, что при исходно принятом законе частотного управления (с постоянством потокоцепления ротора: $\Psi_r = \Psi_{rn} = \text{const}$) ЧРАД для всех видов изменения скорости (линейного, параболического и квазиоптимального) ее максимальные значения ω_{mp} и ω_{mm} должно находиться при отработке малых перемещений в следующих диапазонах: $0 \leq \omega_{mp} \leq 1 \text{ о.е.}$ и $0 \leq \omega_{mm} \leq 1 \text{ о.е.}$, – что обусловлено возможностью практической реализации упомянутого

закона частотного управления [2].

Для всех траекторий изменения скорости ЧРАД суммарное отрабатываемое положение α_Σ^* вала двигателя при малом перемещении находится в виде:

$$\alpha_\Sigma^* = \alpha_p^* + \alpha_m^*. \quad (8)$$

Подставив в правые части соотношений (5) и (6) значения максимальных скоростей ω_{mp} и ω_{mm} , выраженные из (7) через значения заданных положений α_p^* и α_m^* , получим зависимости для нахождения текущих значений положений α_p и α_m вала двигателя при линейном виде изменения его скорости:

$$\alpha_p = \alpha_p^* \left(\frac{t}{t_p} \right)^2 \quad (9)$$

– при разгоне или

$$\alpha_m = \alpha_m^* \left(\frac{2t_m \cdot t - t^2}{t_m^2} \right) \quad (10)$$

– при торможении.

Рассчитаем из (9) и (10) значения первых α'_p и α'_m и вторых α''_p и α''_m производных по времени t от текущих значений положений α_p и α_m :

$$\alpha'_p = \frac{2\alpha_p^* \cdot t}{t_p^2} \quad \text{и} \quad \alpha''_p = \frac{2\alpha_p^*}{t_p^2}, \quad (11)$$

$$\alpha'_m = \frac{2\alpha_m^* \cdot (t_m - t)}{t_m^2} \quad \text{и} \quad \alpha''_m = \frac{-2\alpha_m^*}{t_m^2}, \quad (12)$$

соответствующие режимам разгона (обозначены индексом "p") и торможения (обозначены индексом "m") ЧРАД при линейном виде изменения скорости.

После подстановки вычисленных из (11) и (12) первых α'_p и α'_m и вторых α''_p и α''_m производных в первое соотношение из (1) получим аналитическую зависимость для нахождения текущих значений $\Delta P_{эм.p}$ и $\Delta P_{эм.m}$ основных электромагнитных потерь мощности ЧРАД в режиме малых перемещений:

$$\Delta P_{эм.p} = a + b \left(M_c + \frac{2J\alpha_p^*}{t_p^2} \right)^2 + \frac{c \left(2\alpha_p^* \cdot t \right)^{1,3}}{t_p^{2,6}} \quad (13)$$

– при разгоне или

$$\Delta P_{эм.m} = a + b \left(M_c - \frac{2J\alpha_m^*}{t_m^2} \right)^2 + \frac{c \left[2\alpha_m^* \cdot (t_m - t) \right]^{1,3}}{t_m^{2,6}} \quad (14)$$

– при торможении.

Подставив выражения (13) и (14) соответственно во второе и третье соотношения из (1) и вычислив в них определенные интегралы в пределах от нуля до значения времени разгона (или торможения) $t_{p,m}$, получим аналитическую зависимость для расчета ОЭПЭ при разгоне (или торможении) ЧРАД в режиме малых перемещений:

$$\Delta W_{p,m} = \left(a + bM_c^2 \right) t_{p,m} \pm 4bM_c J \frac{\alpha_{p,m}^*}{t_{p,m}} + 4bJ^2 \frac{(\alpha_{p,m}^*)^2}{t_{p,m}^3} + \frac{c(2\alpha_{p,m}^* \cdot t)^{1,3}}{2,3 \cdot t_{p,m}^{0,3}}, \quad (15)$$

соответствующую линейному виду изменения скорости двигателя. В данной зависимости индекс "p" соответствует режиму разгона, а индекс "m" – режиму торможения; из двойных знаков перед третьим слагаемым в квадратные скобки: знак "+" соответствует разгону, а знак "-" торможению.

Анализ выражения (15) свидетельствует о том, что ОЭПЭ в режимах разгона и торможения при отработке ЧРАД малых перемещений содержат четыре слагаемых (составляющих), из которых: первая – прямо пропорционально зависит от значения времени $t_{p,m}$ разгона (или торможения), а вторая, третья и четвертая составляющие зависят обратно пропорционально соответственно от первой и третьей степени, а также от степени, равной 0,3, от значения времени $t_{p,m}$ разгона (или торможения) двигателя. Такой для выражения (15) математический вид (когда при значительном уменьшении или увеличении значений времен $t_{p,m}$ происходит увеличение величины ОЭПЭ $\Delta W_{p,m}$) вызывает наличие экстремума (минимума) ОЭПЭ при определенных (оптимальных) значениях времен разгона (или торможения) двигателя.

Для нахождения экстремального (минимального) значения ОЭПЭ в режимах разгона и торможения при отработке малых перемещений ЧРАД возьмем производную от выражения (15) по времени $t_{p,m}$ разгона (или торможения) и приравняем к нулю:

$$\frac{d(\Delta W_{p,m})}{d(t_{p,m})} = y_{\lambda} \mp 4bM_c J \frac{\alpha_{p,m}^*}{t_{p,m}^2} - 12bJ^2 \frac{(\alpha_{p,m}^*)^2}{t_{p,m}^4} = 0, \quad (16)$$

$$\text{где } y_{\lambda} = a + bM_c^2 - \frac{3c}{23} \cdot \frac{(2\alpha_{p,m}^*)^{1,3}}{t_{p,m}^{1,3}}. \quad (17)$$

Преобразуем выражение (16) к виду уравнения второго порядка относительно переменной $t_{p,m}^2$:

$$t_{p,m}^4 \mp \left(\frac{4bM_c J \alpha_{p,m}^*}{y_{\lambda}} \right) \cdot t_{p,m}^2 - \left[\frac{12bJ^2 (\alpha_{p,m}^*)^2}{y_{\lambda}} \right] = 0. \quad (18)$$

Из решения уравнения (18) получим аналитическое расчетное выражение для определения оптимальных времен разгона (или торможения) двигателя:

$$t_{p,m}^o = \sqrt{\frac{J \alpha_{p,m}^*}{y_{\lambda}}} \cdot \left[\pm 2bM_c + \sqrt{(2bM_c)^2 + 12b \cdot y_{\lambda}} \right]^{0,5}, \quad (19)$$

соответствующих отработке малых перемещений $\alpha_{p,m}^*$ при линейном виде изменения скорости ЧРАД.

При этом для примененных двойных знаков в формулах (15), (16), (18), (19): верхний знак соответствует режиму разгона, а нижний знак – режиму торможения двигателя. Оптимальные (минимальные) значения составляющих ОЭПЭ $\Delta W_{p,m}^o$ в режимах разгона (или торможения) ЧРАД при отработке заданного малого перемещения $\alpha_{p,m}^*$ находятся путем подстановки рассчитанного из (19) оптимального значения времени разгона (или торможения) $t_{p,m}^o$ в зависимость (15).

На *втором этапе* проведем для ЧРАД аналитический расчет составляющих ОЭПЭ, соответствующих в режиме малых перемещений параболическому виду изменения скорости ω двигателя [10]:

$$\left. \begin{aligned} \omega &= \alpha'_p = \omega_{mp} \left[1 - \left(\frac{t_p - t}{t_p} \right)^2 \right], \\ \omega &= \alpha'_m = \omega_{mm} \cdot \frac{t_m^2 - t^2}{t_m^2} \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

при разгоне и торможении соответственно.

Взяв определенные интегралы от правых частей соотношений из (20) в пределах от нуля до текущего значения времени t , рассчитаем текущие положения α_p и α_m вала двигателя при параболическом виде изменения его скорости:

$$\alpha_p = \int_0^t \omega_{mp} \cdot \left[1 - \left(\frac{t_p - t}{t_p} \right)^2 \right] \cdot dt = \frac{\omega_{mp}}{t_p^2} \cdot \left(t_p t^2 - \frac{t^3}{3} \right) \quad (21)$$

– при разгоне или

$$\alpha_m = \int_0^t \omega_{mm} \cdot \left(\frac{t_m^2 - t^2}{t_m^2} \right) \cdot dt = \frac{\omega_{mm}}{t_m^2} \cdot \left(t_m^2 t - \frac{t^3}{3} \right) \quad (22)$$

– при торможении.

Заданные (конечные) перемещения α_p^* и α_m^* для параболического вида изменения скорости опре-

деляются при подстановке в соотношения (21) и (22) величин верхних пределов: $t = t_p$, $t = t_m$ и вычисляются соответственно из выражений:

$$\alpha_p^* = \frac{2}{3} \omega_{mp} \cdot t_p \text{ и } \alpha_m^* = \frac{2}{3} \omega_{mm} \cdot t_m. \quad (23)$$

Подставив в правые части соотношений (21) и (22) значения максимальных скоростей ω_{mp} и ω_{mm} , выраженные из (23) через значения заданных положений α_p'' и α_m'' , получим аналитические зависимости для нахождения текущих значений положений α_p и α_m вала двигателя при параболическом виде изменения его скорости:

$$\alpha_p = \alpha_p^* \left[\frac{1,5 \cdot t_p \cdot t^2 - 0,5 \cdot t^3}{t_p^3} \right] - \quad (24)$$

при разгоне;

$$\alpha_m = \alpha_m^* \left[\frac{1,5 \cdot t_m^2 \cdot t - 0,5 \cdot t^3}{t_m^3} \right] - \quad (25)$$

при торможении.

Определим из (24) и (25) значения первых α_p' и α_m' и вторых α_p'' и α_m'' производных по времени t от текущих значений положения α_p и α_m :

$$\left. \begin{aligned} \alpha_p' &= \frac{d(\alpha_p)}{dt} = \frac{3\alpha_p^*}{2t_p} \left[1 - \left(\frac{t_p - t}{t_p} \right)^2 \right], \\ \alpha_m' &= \frac{d(\alpha_m)}{dt} = \frac{3\alpha_m^*}{2t_m} \left(\frac{t_m^2 - t^2}{t_m^2} \right) \end{aligned} \right\}, \quad (26)$$

$$\left. \begin{aligned} \alpha_p'' &= \frac{d^2(\alpha_p)}{dt^2} = \frac{3\alpha_p^* (t_p - t)}{t_p^3}, \\ \alpha_m'' &= \frac{d^2(\alpha_m)}{dt^2} = -\frac{3\alpha_m^*}{t_m^3} \cdot t \end{aligned} \right\}, - \quad (27)$$

соответствующие разгону (обозначены индексом "p") и торможению (обозначены индексом "m") ЧРАД или параболическом виде изменения его скорости.

После подстановки вычисленных из (26) и (27) первых α_p' и α_m' и вторых α_p'' и α_m'' производных в первое соотношение из (1) получим аналитические зависимости для нахождения текущих значений $\Delta P_{эм,p}$ и $\Delta P_{эм,m}$ основных электромагнитных потерь мощности ЧРАД в режиме малых перемещений:

$$\Delta P_{эм,p} = a + b \left[M_c + \frac{3J\alpha_p^* (t_p - t)}{t_p^3} \right]^2 +$$

$$+ c \cdot \left(\frac{3\alpha_p}{2t_p} \right)^{1,3} \cdot \left[1 - \left(\frac{t_p - t}{t_p} \right)^2 \right]^{1,3} \quad (28)$$

- при разгоне или

$$\Delta P_{эм,m} = a + b \left[M_c - \frac{3J\alpha_m^*}{t_m^3} t \right]^2 + c \cdot \left(\frac{3\alpha_m}{2t_m} \right)^{1,3} \cdot \left(\frac{t_m^2 - t^2}{t_m^2} \right)^{1,3} \quad (29)$$

- при торможении.

Подставив выражения (28) и (29) соответственно во второе и третье соотношения из (1) и вычислив в них определенные интегралы в пределах от нуля до значения времени разгона (или торможения) $t_{p,m}$, получим аналитическую зависимость для расчета ОЭПЭ при разгоне (или торможении) ЧРАД при режиме малых перемещений:

$$\Delta W_{p,m} = \left(a + bM_c^2 \right) t_{p,m} \pm 3bM_c J \frac{\alpha_{p,m}^*}{t_{p,m}} + 3bJ^2 \frac{(\alpha_{p,m}^*)^2}{t_{p,m}^3} + c \left(\frac{3\alpha_{p,m}^*}{2 \cdot t_{p,m}} \right)^{1,3} \cdot I_{p,m}, \quad (30)$$

соответствующую параболическому виду изменения скорости двигателя. В данной зависимости индекс "p" соответствует режиму разгона, а индекс "m" – режиму торможения; из двойных знаков: верхний знак соответствует разгону, а нижний знак – торможению.

Входящий в последнее слагаемое из (30) сомножитель $I_{p,m}$ вычисляется из соотношений:

$$I_p = \int_0^{t_p} \left[1 - \left(\frac{t_p - t}{t_p} \right)^2 \right]^{1,3} \cdot dt - \quad (31)$$

при разгоне или

$$I_m = \int_0^{t_m} \left(\frac{t_m^2 - t^2}{t_m^2} \right)^{1,3} \cdot dt - \quad (32)$$

при торможении.

Вычисленные из (31) и (32) в функции времени $t_{p,m}$ и равные между собой (при одинаковых величинах времен разгона и торможения $t_p = t_m = t_{p,m}$) значения сомножителя $I_p = I_m = I_{p,m}$ показаны сплошной линией в виде графика на рис.1. На этом же рисунке пунктиром был показан график интерполированной кривой (совпавший со сплошной линией), рассчитываемой из аналитической зависимости:

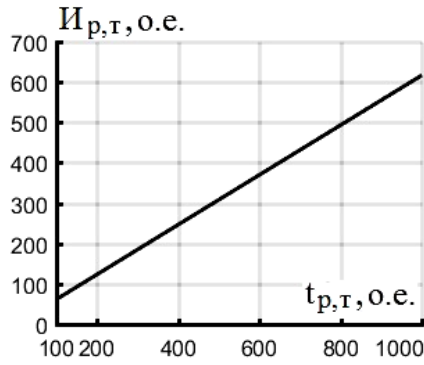


Рисунок 1. Расчетная зависимость $I_{p,m}(t_{p,m})$

$$I_{p,m} \approx 0,6127 \cdot t_{p,m} \quad (33)$$

Выявлено, что отклонения между вычисленными из (31), (32) и интерполированными из (33) значениями $I_{p,m}$ не превышают 0,001 о.е.

Для нахождения экстремального (минимального) значения ОЭПЭ в режимах разгона и торможения при отработке малых перемещений ЧРАД возьмем с учетом (33) производную от выражения (30) по времени $t_{p,m}$ разгона (или торможения) и приравняем ее нулю:

$$\frac{d(\Delta W_{p,m})}{d(t_{p,m})} = y_n \mp 3bM_c J \frac{\alpha_{p,m}^*}{t_{p,m}^2} - 9bJ^2 \frac{(\alpha_{p,m}^*)^2}{t_{p,m}^4} = 0, \quad (34)$$

где

$$y_n = a + bM_c^2 + c \cdot \left(\frac{3}{2} \alpha_{p,m}^*\right)^{1,3} \cdot \frac{d}{d(t_{p,m})} \left[\frac{I_{p,m}}{(t_{p,m})^{1,3}} \right] \approx \\ \approx a + bM_c^2 - 0,1838 \cdot c \cdot \frac{(1,5 \cdot \alpha_{p,m}^*)^{1,3}}{(t_{p,m})^{0,3}}. \quad (35)$$

Преобразуем выражение (34) к виду уравнения второго порядка относительно переменной $t_{p,m}^2$:

$$t_{p,m}^4 \mp \left(\frac{3bM_c J \alpha_{p,m}^*}{y_n} \right) \cdot t_{p,m}^2 - \left[\frac{9bJ^2 (\alpha_{p,m}^*)^2}{y_n} \right] = 0. \quad (36)$$

Из решения уравнения (36) получим аналитическое расчетное выражение для определения оптимальных времен разгона (или торможения):

$$t_{p,m}^o = \sqrt{\frac{J \alpha_{p,m}^*}{y_n}} \cdot \left[\pm 1,5bM_c + \sqrt{(1,5bM_c)^2 + 9b \cdot y_n} \right]^{0,5}, \quad (37)$$

соответствующих отработке малых перемещений $\alpha_{p,m}^*$ при параболической тахограмме ЧРАД.

При этом для двойных знаков в формулах (34), (36) и (37): верхний знак соответствует режиму разгона, а нижний знак – режиму торможения. Оптималь-

ные (минимальные) значения составляющих ОЭПЭ $\Delta W_{p,m}^o$ в режимах разгона (или торможения) ЧРАД при отработке заданного малого перемещения $\alpha_{p,m}^*$ находятся путем подстановки рассчитанного из (37) оптимального значения времени разгона (или торможения) $t_{p,m}^o$ в зависимость (30).

На *третьем этапе* осуществим для ЧРАД аналитический расчет составляющих ОЭПЭ, соответствующих в режиме малых перемещений квазиоптимальному виду изменения скорости ω двигателя [10]:

$$\omega = \alpha'_p = \omega_{mp} \left\{ 1 - \frac{sh \left[\xi^* \sqrt{K} (t_p - t) \right]}{sh \left(\xi^* \sqrt{K} \cdot t_p \right)} \right\}, \quad (38)$$

$$\omega = \alpha'_m = \omega_{mm} \left\{ 1 - \frac{sh \left(\xi^* \sqrt{K} \cdot t \right)}{sh \left(\xi^* \sqrt{K} \cdot t_m \right)} \right\}$$

при разгоне и торможении соответственно.

Взяв определенные интегралы от правых частей соотношений из (38) в пределах от нуля до текущего значения времени t , рассчитаем текущие положения α_p и α_m вала двигателя при квазиоптимальном виде изменения его скорости:

$$\alpha_p = \omega_{mp} \left\{ t + \frac{ch \left[\xi^* \sqrt{K} (t_p - t) \right] - ch \left[\xi^* \sqrt{K} \cdot t_p \right]}{\left(\xi^* \sqrt{K} \right) \cdot sh \left(\xi^* \sqrt{K} \cdot t_p \right)} \right\} - (39)$$

при разгоне или

$$\alpha_m = \omega_{mm} \left\{ t - \frac{ch \left[\xi^* \sqrt{K} \cdot t \right] - l}{\left(\xi^* \sqrt{K} \right) \cdot sh \left(\xi^* \sqrt{K} \cdot t_m \right)} \right\} - (40)$$

при торможении.

Заданные (конечные) перемещения α_p^* и α_m^* для квазиоптимальной тахограммы определяются при подстановке в соотношения из (39) и (40) значений $t = t_p$ и $t = t_m$ и вычисляются из выражений:

$$\alpha_p^* = z_p \cdot \omega_{mp} \cdot t_p \quad \text{и} \quad \alpha_m^* = z_m \cdot \omega_{mm} \cdot t_m, \quad (41)$$

где значения коэффициентов z_p и z_m равны:

$$z_p = 1 + \frac{1 - ch \left[\xi^* \sqrt{K} \cdot t_p \right]}{\left(\xi^* \sqrt{K} \cdot t_p \right) \cdot sh \left(\xi^* \sqrt{K} \cdot t_p \right)}, \quad (42)$$

$$z_m = 1 + \frac{1 - ch \left[\xi^* \sqrt{K} \cdot t_m \right]}{\left(\xi^* \sqrt{K} \cdot t_m \right) \cdot sh \left(\xi^* \sqrt{K} \cdot t_m \right)}$$

При этом, в отличие от постоянных значений коэффициентов (равных 1/2 и 2/3) согласно зависимостям (7) и (23) для линейного и параболического изменения скорости, при квазиоптимальном изменении скорости ЧРАД коэффициенты z_p и z_m в зависимо-

стях (41) и (42) переменны и зависят от длительностей времен разгона t_p и торможения t_m двигателя. На рис.2 построена рассчитанная из (42) для параметров электродвигателя АДО–2000-6000-12У1 графическая зависимость указанных коэффициентов: $z_{p,m} = z_p = z_m$ (равных между собой при одинаковых значениях времен разгона и торможения) в функции изменения указанных времен $t_{p,m}$ или параметра:

$\xi^* \sqrt{K} \cdot t_{p,m}$. В последнем случае данная зависимость является, очевидно, универсальной для всех типов ЧРАД, с помощью которой определяются из (41) максимальные значения скоростей ω_{mp} и ω_{mt} при квазиоптимальной траектории скорости двигателя.

Подставив в правые части соотношений (39) и (40) значения максимальных скоростей ω_{mp} и ω_{mt} , выраженные из (41) через значения заданных положений α_p^* и α_m^* , получим аналитические зависимости для нахождения текущих значений положений α_p и α_m вала двигателя при квазиоптимальном изменении его скорости:

$$\alpha_p = \frac{\alpha_p^*}{z_p} \left\{ \frac{t}{t_p} + \frac{ch[\xi^* \sqrt{K} \cdot (t_p - t)] - ch[\xi^* \sqrt{K} \cdot t_p]}{(\xi^* \sqrt{K} \cdot t_p) \cdot sh(\xi^* \sqrt{K} \cdot t_p)} \right\} - (43)$$

при разгоне или

$$\alpha_m = \frac{\alpha_m^*}{z_m} \left\{ \frac{t}{t_m} - \frac{ch[\xi^* \sqrt{K} \cdot t] - 1}{(\xi^* \sqrt{K} \cdot t_m) \cdot sh(\xi^* \sqrt{K} \cdot t_m)} \right\} - (44)$$

при торможении.

Вычислив из (43) и (44) первые α'_p и α'_m :

$$\left. \begin{aligned} \alpha'_p &= \frac{\alpha_p^*}{z_p \cdot t_p} \left\{ 1 - \frac{sh[\xi^* \sqrt{K} \cdot (t_p - t)]}{sh(\xi^* \sqrt{K} \cdot t_p)} \right\}, \\ \alpha'_m &= \frac{\alpha_m^*}{z_m \cdot t_m} \left\{ 1 - \frac{sh[\xi^* \sqrt{K} \cdot t]}{sh(\xi^* \sqrt{K} \cdot t_m)} \right\} \end{aligned} \right\} - (45)$$

и вторые производные α''_p и α''_m :

$$\left. \begin{aligned} \alpha''_p &= \frac{\alpha_p^* (\xi^* \sqrt{K})}{z_p \cdot t_p} \cdot \left\{ \frac{ch[\xi^* \sqrt{K} \cdot (t_p - t)]}{sh(\xi^* \sqrt{K} \cdot t_p)} \right\}, \\ \alpha''_m &= \frac{\alpha_m^* (\xi^* \sqrt{K})}{z_m \cdot t_m} \cdot \left\{ \frac{ch[\xi^* \sqrt{K} \cdot t]}{sh(\xi^* \sqrt{K} \cdot t_m)} \right\} \end{aligned} \right\} - (46)$$

по времени t от текущих положений α_p и α_m и подставив их первые соотношения из (1), получим аналитические зависимости для нахождения при квазиоптимальном виде изменения скорости двигателя текущих значений $\Delta P_{эм,p}$ и $\Delta P_{эм,m}$ основных электро-

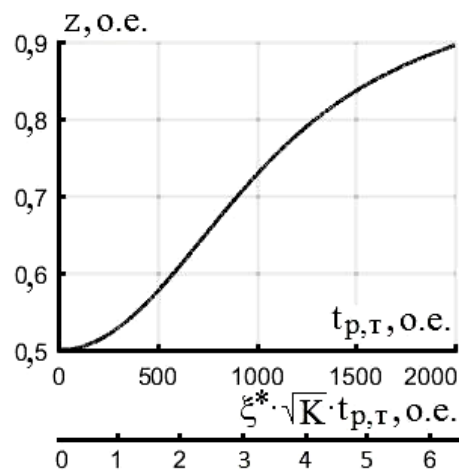


Рисунок 2. Расчетная зависимость $z_{p,m}(t_{p,m})$

магнитных потерь мощности ЧРАД при разгоне и торможении в режиме малых перемещений (из-за чрезмерной сложности и громоздкости полученных зависимостей они не приводятся).

Путем последующего интегрирования из второго и третьего соотношения из (1) в пределах от нуля до заданных времен разгона t_p и торможения t_m с применением численных методов интегрирования [17] (вследствие упомянутой сложности и громоздкости полученных зависимостей для $\Delta P_{эм,p}$ и $\Delta P_{эм,m}$) рассчитываются численные значения составляющих ΔW_p и ΔW_m ОЭПЭ для ЧРАД в режиме малых перемещений, соответствующие разгону и торможению при квазиоптимальном виде изменения скорости двигателя. По причине отмеченной сложности аналитических выражений для текущих потерь мощности $\Delta P_{эм,p}$ и $\Delta P_{эм,m}$ и вынужденного использования численного расчета составляющих ΔW_p и ΔW_m ОЭПЭ для ЧРАД становится невозможным аналитически (с применением методов математического анализа) точно определить оптимальные значения времен разгона и торможения при малых перемещениях вала двигателя, соответствующие экстремальным (минимальным) значениям его указанных составляющих ОЭПЭ.

На четвертом этапе предложено, исходя из предыдущего, упрощенное аналитическое определение оптимальных времен разгона и торможения ЧРАД в режиме малых перемещений при квазиоптимальном виде изменения его скорости. Оно основано на использовании метода подобия [18]. В данном случае подобие аналитических зависимостей (19) и (37) для расчета оптимальных значений времен разгона (или торможения) $t_{p,m}^o$ в режиме отработки малых перемещений при линейном и параболическом видах изменения скорости ЧРАД состоит в схожести общего вида этих зависимостей, какие могут быть представлены следующими универсальными выражениями:

$$\left. \begin{aligned} t_{p,m}^o &= \sqrt{\frac{J\alpha_{p,m}^*}{y}} \cdot \left[\pm pbM_c + \sqrt{(pbM_c)^2 + qb \cdot y} \right]^{0,5}, \\ y &= a + bM_c^2 - \frac{s \cdot c \cdot (p \cdot \alpha_{p,m}^*)^{1,3}}{(t_{p,m}^o)^{1,3}}. \end{aligned} \right\} (47)$$

В формулах (47) из используемых двойных знаков: верхний знак соответствует режиму разгона, и нижний знак – режиму торможения.

Отличие между собой в указанных зависимостях (19) и (37) или в (47) заключается только в различных численных значениях коэффициентов p , q и s . В частности, для линейного вида изменения скорости двигателя присущи значения: $p = 2$, $q = 12$, $s = 3/23$; а для параболического: $p = 1,5$, $q = 9$, $s = 0,1838$.

Данное подобие, очевидно, объясняется общими свойствами исследуемого объекта – ЧРАД. Исходя из метода подобия будем полагать, что универсальный вид зависимостей (47) сохранится и в случае определения из нее оптимальных времен разгона (или торможения) $t_{p,m}^o$ при квазиоптимальном виде изменения скорости двигателя, а отличие при этом будет состоять лишь в других численных значениях коэффициентов p , q и s в зависимостях (47).

Предлагается следующая методика нахождения указанных коэффициентов применительно к квазиоптимальному виду изменения скорости ЧРАД при отработке малых перемещений:

1) подставив ранее рассчитанные из первого соотношения в (1) текущие значения основных электромагнитных мощностей $\Delta P_{эм.p}$ и $\Delta P_{эм.m}$ во второе и третье соотношения из (1) и варьируя значения времен $t_{p,m}$, вычислим численными методами для режима холостого хода (при $M_c = 0$), при половине номинальной нагрузки (для $M_c = 0,5M_n$) и для номинальной нагрузки (при $M_c = M_n$) соответствующие заданному обрабатываемому положению $\alpha_{p,m}^*$ и этим значениям времен и нагрузок величины составляющих ОЭПЭ $\Delta W_p(t_p)$ и $\Delta W_m(t_m)$ ЧРАД;

2) в результате указанного варьирования значений времен $t_{p,m}$ находим такие их оптимальные значения ($t_{p,m.xx}^o$ – для режимов разгона и торможения на холостом ходу; $t_{p,m}^o$ – для режимов разгона и торможения с половинной номинальной нагрузкой; $t_{p,m.n}^o$ – для режимов разгона и торможения с номинальной нагрузкой), при которых рассчитанные составляющие ОЭПЭ ΔW_p и ΔW_m минимальны (то есть, равны своим оптимальным значениям);

3) подставив в левую и правую части первой зависимости из (47) значения оптимального времени

$t_{p,m.xx}^o$ и статического момента $M_c = 0$ (соответствующие холостому ходу) и повторив аналогичные подстановки в левую и правую части первой зависимости из (47) для: оптимального времен $t_{p,m}^o$ и статического момента: $M_c = 0,5M_n$ (соответствующих половине номинальной нагрузки), а также оптимального времени $t_{p,m.n}^o$ и статического момента $M_c = M_n$ (соответствующих номинальной нагрузке), – получим алгебраическую систему нелинейных уравнений третьего порядка, в которой неизвестными переменными величинами являются искомые коэффициенты: p , q , s ;

4) преобразуем полученную алгебраическую систему уравнений к виду, удобному для вычисления искомых коэффициентов:

$$\left. \begin{aligned} p &= \left[\frac{(t_{p,m.n}^o)^4 y_n^2}{J^2 (\alpha_{p,m}^*)^2} + q \cdot b \cdot y_n \right] \cdot \frac{J \cdot \alpha_{p,m}^*}{2M_n \cdot b \cdot (t_{p,m.n}^o)^2 \cdot y_n}, \\ q &= \frac{1}{b \cdot y} \left[\frac{(t_{p,m}^o)^4 y^2}{J^2 (\alpha_{p,m}^*)^2} - \frac{2p(0,5M_n) \cdot b \cdot (t_{p,m}^o)^2 \cdot y}{J \cdot \alpha_{p,m}^*} \right], \\ s &= \left[a - \frac{q \cdot b \cdot J^2 (\alpha_{p,m}^*)^2}{(t_{p,m.xx}^o)^4} \right] \cdot \frac{(t_{p,m.xx}^o)^{1,3}}{c \cdot (p \cdot \alpha_{p,m}^*)^{1,3}}, \end{aligned} \right\} (48)$$

где значения параметров y и y_n рассчитывались из второй зависимости в (47) для значений статического момента M_c , равных $0,5M_n$ и M_n соответственно.

При этом обратим внимание на то, что анализ расчетных для оптимальных времен $t_{p,m}^o$ зависимостей (19), (37), (47) и (48) свидетельствует о том, что данные алгебраические уравнения и системы уравнений содержат переменные величины в левой и правой частях уравнений, а потому они решаются с использованием численных методов решения нелинейных алгебраических уравнений (метода итераций) [17].

В результате сравнения между собой значений оптимальных времен разгона (или торможения) $t_{p,m}^o$, вычисленных из аналитических зависимостей (19), (37), (47), и рассчитанных численными методами (при варьировании времен разгона и торможения, определении из (1) значений ОЭПЭ и нахождении соответствующих минимуму ОЭПЭ оптимальных времен разгона (торможения) для электродвигателя АДО-2000-6000-12У1 мощностью 2000 кВт), установлено, что их среднеквадратичное отклонение (при изменении значения статического момента M_c в диапазоне от нуля до номинального значения двигателя) не превышает 2%, что на практике вполне допустимо для инженерных расчетов.

На пятом этапе с использованием полученных

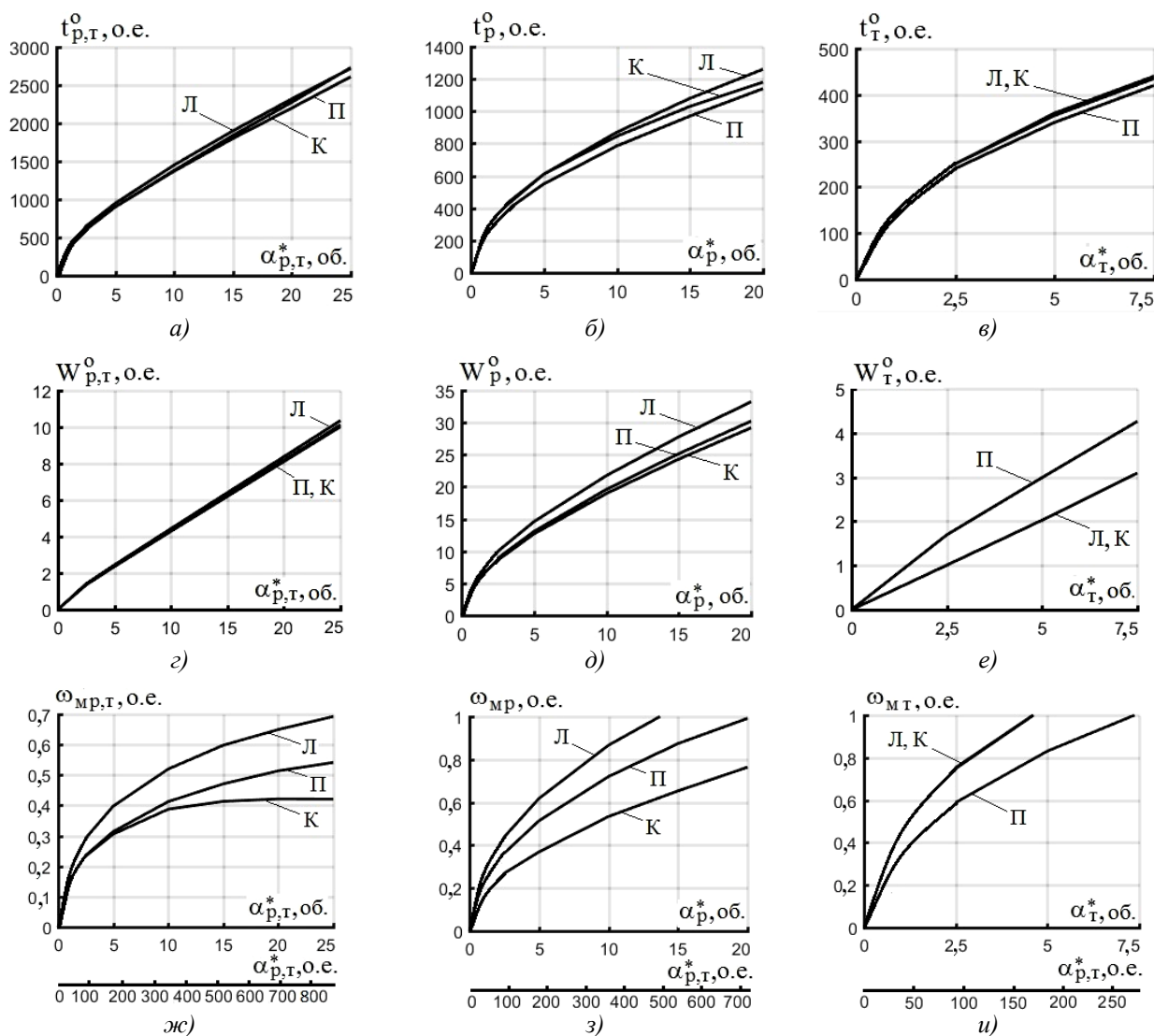


Рисунок 3. Зависимости: а,б,в – оптимальных времен $t_{p,m}^o$; г,д,е – основных электромагнитных потерь энергии $\Delta W_{p,m}^o$; ж,з,и – значений максимальных скоростей $\omega_{mp,m}$ ЧРАД, – при отработке малых перемещений (а,г,ж – при разгоне и торможении для $M_c = 0$; б,д,з – при разгоне для $M_c = M_n$; в,е,и – при торможении для $M_c = M_n$; Л, П, К – линейный, параболический и квазиоптимальный виды изменения скорости соответственно)

аналитических зависимостей (1), (15), (30) определим изменения оптимальных значений $\Delta W_{p,m}^o$ ОЭПЭ, а с применением соотношений (19), (37), (47) – соответствующих им оптимальных времен $t_{p,m}^o$ разгона (торможения) в функции отрабатываемых малых перемещений α_p^* и α_m^* при линейном, параболическом и квазиоптимальном изменении скорости ЧРАД. На этом же этапе после подстановки найденных значений оптимальных времен $t_{p,m} = t_{p,m}^o$ в полученные аналитические зависимости (7), (23), (42) определим максимальные значения ω_{mp} и ω_{mt} скоростей ЧРАД в

функции отрабатываемых перемещений α_p^* и α_m^* при линейном, параболическом и квазиоптимальном видах изменения его скорости.

На рис.3 представлены построенные на основе выполненных расчетов (для параметров электродвигателя АДО-2000-6000-12У1) графические зависимости упомянутых величин: $\Delta W_{p,m}^o$, $t_{p,m}^o$, ω_{mp} и ω_{mt} , – в функции отрабатываемых заданных перемещений α_p^* и α_m^* (показанных в оборотах (об.), где 1 об. = 37,7 о.е.) соответственно при разгоне и торможении двигателя. Для нахождения абсолютных значений представленных на рис.3 величин следует умножить полученные значения в относительных единицах на

соответствующие базисные величины (равные: $0,01/\pi$ рад./с – для времени; 8,5885 кДж – для энергии; $50\pi/3$ рад./с – для скорости).

В. ВЫВОДЫ

1. Полученные в аналитическом виде зависимости (13) – (15) и (28) – (30) позволяют осуществить расчеты основных электромагнитных потерь мощности и энергии ЧРАД при обработке малых перемещений для линейного и параболического видов изменения скорости двигателя.

2. Полученные аналитические зависимости (45), (46) для вычисления значений первой и второй производных от текущего положения вала двигателя при квазиоптимальном виде изменения скорости ЧРАД позволяют путем подстановки их в соотношения из (1) рассчитать численными методами основные электромагнитные потери мощности и энергии этого двигателя при обработке малых перемещений с указанным видом изменения скорости.

3. На основе упомянутых полученных аналитических зависимостей для расчета основных электромагнитных потерь энергии ЧРАД определены в аналитическом виде математические соотношения (19), (37) и (47), позволяющие рассчитать оптимальные значения времен разгона и торможения ЧРАД, при которых обеспечиваются минимальные значения ОЭПЭ при обработке малых перемещений в режимах разгона и торможения для линейного, параболического и квазиоптимального видов изменения скорости этого двигателя.

4. На основе полученных аналитических зависимостей впервые выполнено для линейного, параболического и квазиоптимального изменения скорости двигателя сравнительная количественная оценка изменения: оптимальных значений ОЭПЭ двигателя и соответствующих им максимальных значений скорости и оптимальных времен разгона и торможения, – в функции отрабатываемых заданных малых перемещений, что позволяет выбрать рациональный вид тахограммы ЧРАД при режимах его позиционирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1]. Булгаков А.А. Частотное управление асинхронными электродвигателями / А.А. Булгаков. – М.: Наука 1996. – 298с.
- [2]. Пивняк Г.Г. Современные частотно-регулируемые асинхронные электроприводы с широтно-импульсной модуляцией / Г.Г. Пивняк, А.В. Волков. – Днепропетровск: Национальный горный университет, 2006. – 470с.
- [3]. Поляков В.Н. Экстремальное управление электрическим двигателями / В.Н. Поляков, Р.Т. Шрейнер. – Екатеринбург: УГТУ–УПИ, 2006 – 420с.
- [4]. Радин В.И. Электрические машины: асинхронные машины: Учеб. для электромех. спец. вузов / В.И. Радин, Д.Э. Брускин, А.Е. Зорохович: Под.ред. И.П. Копылова. – М.: Высш.шк., 1988. – 328с.
- [5]. Сандлер А.С. Автоматическое частотное управление асинхронными двигателями / А.С. Сандлер, Р.С. Сарбатов. – М.: Энергия, 1974. – 328с.
- [6]. Шрейнер Р.Т. Оптимальное частотное управление асинхронными электроприводами / Р.Т. Шрейнер, Ю.А. Дмитренко. – Кишинев: Штиинца, 1982. – 224с.
- [7]. Ковач К.П., Рац И. Переходные процессы в машинах переменного тока / Пер. с нем. яз. – М.: Госэнергоиздат, 1963. – 744с.
- [8]. Мэрфи Дж. Тиристорное управление двигателями переменного тока / Дж. Мэрфи. – М., Энергия, 1979. – 256с.
- [9]. Волков А.В. Энергосберегающее управление скоростью частотно-регулируемого асинхронного двигателя в пускотормозных режимах / А.В. Волков, А.А. Колесников / Электротехника. – 2013. – № 5. – С.2 – 9.
- [10]. Волков В.А. Энергосбережение в частотно-регулируемых асинхронных электроприводах посредством оптимизации времен их разгона и торможения / В.А. Волков / Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – 2017. – № 27 (1249). – С.258 – 263.
- [11]. Петров Ю.П. Оптимальное управление электроприводом / Ю.П. Петров. – М.–Л.: Госэнергоиздат, 1961. – 187с.
- [12]. Петров Ю.П. Оптимальное управление электроприводом с учетом ограничений по нагреву / Ю.П. Петров. – Л.: Энергия, 1971. – 144с
- [13]. Толочко В.И. Оптимизация электропотребления позиционного электропривода с векторным управлением асинхронным двигателем / В.И. Толочко, П.И. Розкаряка, Г.С. Чекавский // Наукові праці Донецького національного технічного університету. – 2011. – № 11 (186). – С. 396 – 406.
- [14]. Тиховод С.М. Усовершенствование итерационных методов решения систем нелинейных уравнений состояния магнитоэлектрических схем замещения / С.М. Тиховод // Електротехніка та електроенергетика. – 2015. – № 1. – С.30 – 46. DOI: <http://dx.doi.org/10.15588/1607-6761-2015-1-8>
- [15]. Тиховод С.М. Метод ускоренного численного расчета переходных процессов в электрических цепях на основе аппроксимации решения алгебраическими полиномами / С.М. Тиховод, Т.М. Корнус, Д.Г. Паталах // Електротехніка та електроенергетика. – 2015. – № 2. – С.48 – 54. DOI: <http://dx.doi.org/10.15588/1607-6761-2015-2-7>
- [16]. Волков В.А. Оптимальное и квазиоптимальное энергосберегающее управление положением частотнорегулируемого асинхронного двигателя / В.А. Волков // Електротехніка та електроенергетика. – 2016. – № 1. – С. 25–34. DOI: <http://dx.doi.org/10.15588/1607-6761-2016-1-4>

[17]. Кальницький Л.А. Специальный курс высшей математики для вузов. Учеб. пособие / Л.А. Кальницький, Д.А. Добротин, В.Ф. Жевержев. – М.: Высш.шк., 1976. – 389с.

[18]. Веников В.А. Теория подобия и моделирования / В.А. Веников. – М.: Высш.шк., 1976. – 479с.

Стаття надійшла до редакції 07.12.2017

АНАЛІТИЧНИЙ РОЗРАХУНОК ОСНОВНИХ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ВТРАТ ЕНЕРГІЇ ЧАСТОТНОРЕГУЛЬОВАНОГО ДВИГУНА ПРИ ПОЗИЦІЮВАННІ

ВОЛКОВ В.О.

канд. техн. наук, докторант Національного гірничого університету, г. Дніпро, Україна, e-mail: green_stone@ukr.net

Мета роботи. Отримання аналітичних залежностей для розрахунку основних електромагнітних втрат енергії частотнорегульованого асинхронного двигуна в режимах позиціонування з малими переміщеннями при різних видах (лінійному, параболічному і квазіоптимальному) зміни його швидкості.

Методи дослідження. Методи подібності, диференціального та інтегрального числення, аналітичної інтерполяції, математичного аналізу.

Отримані результати. Отримано аналітичні залежності для розрахунку поточних електромагнітних втрат потужності і основних електромагнітних втрат енергії частотнорегульованого асинхронного двигуна в режимах позиціонування з малими переміщеннями при різних видах (лінійному, параболічному і квазіоптимальному) зміни його швидкості. Отримано універсальний вид аналітичної залежності для розрахунку оптимальних часів розгону і гальмування частотнорегульованого асинхронного двигуна при позиціонуванні з малими переміщеннями, яка відповідає мінімізації основних електромагнітних втрат енергії цього двигуна при зазначеному позиціонуванні для різних видів (лінійному, параболічному і квазіоптимальному) зміни його швидкості. Виконана порівняльна кількісна оцінка зміни: оптимальних значень основних електромагнітних втрат енергії частотнорегульованого асинхронного двигуна та відповідних їм максимальних значень швидкості і оптимальних часів розгону і гальмування, – в функції заданих малих переміщень, що відпрацьовуються, для розглянутих різних траєкторій швидкості двигуна.

Наукова новизна. Вперше отримано аналітичні залежності для розрахунку основних електромагнітних втрат енергії частотнорегульованого асинхронного двигуна при позиціонуванні з малими переміщеннями в функції заданих значень переміщень вала двигуна і заданих значень його часів розгону і гальмування при відпрацюванні згаданих заданих переміщень. Вперше отримані залежності для кількісної оцінки мінімальних основних електромагнітних втрат енергії асинхронного двигуна і відповідних їм максимальних значень швидкості і оптимальних часів розгону і гальмування в функції заданих малих переміщень, що відпрацьовуються, для лінійної, параболічної і квазіоптимальної траєкторії швидкості двигуна при позиціонуванні.

Практична цінність. Отримані розрахункові аналітичні залежності призначені для кількісної оцінки основних електромагнітних втрат енергії частотнорегульованого асинхронного двигуна в режимі малих переміщень. За допомогою визначення з використанням запропонованих аналітичних залежностей максимальних значень швидкості і оптимальних часів розгону і гальмування частотнорегульованого асинхронного двигуна досягається мінімізація його основних електромагнітних втрат енергії при позиціонуванні для лінійної, параболічної і квазіоптимальної траєкторій швидкості.

Ключові слова: асинхронний двигун, частотне регулювання, електромагнітні втрати енергії, позиціонування.

ANALYTICAL CALCULATION OF THE BASIC ELECTROMAGNETIC LOSSES OF THE ENERGY OF THE FREQUENCY-REGULATED ASYNCHRONOUS ENGINE IN POSITIONING

VOLKOV V.A.

PhD., Associate Professor, Doctoral Candidate of National Mining University, Dnepr, Ukraine, e-mail: green_stone@ukr.net

Purpose. Obtaining analytical dependencies for the calculation of the main electromagnetic energy losses of a frequency-controlled induction motor in positioning modes with small displacements for various types (linear, parabolic and quasi-optimal) of its velocity variation.

Methodology. Similarity methods, differential and integral calculus, analytical interpolation, mathematical analysis.

Findings. Analytical dependencies for calculation of current electromagnetic power losses and basic electromag-

netic energy losses of a frequency-controlled asynchronous motor in the modes of positioning with small displacements for various types (linear, parabolic and quasi-optimal) of its velocity are obtained. A universal form of the analytical dependence for calculating the optimal acceleration and deceleration times for a frequency-controlled asynchronous motor for positioning with small displacements, corresponding to minimization of the main electromagnetic energy losses of this engine with the indicated positioning for various species (linear, parabolic and quasi-optimal), is obtained. A comparative quantitative assessment of the change is made: the optimum values of the main electromagnetic energy losses of the frequency-controlled asynchronous engine and the corresponding maximum speed and optimal acceleration and deceleration times, in the function of the set prescribed small displacements for the various engine speed trajectories under consideration.

Originality. *For the first time, analytical dependencies for the calculation of the main electromagnetic energy losses of a frequency-controlled asynchronous motor are obtained for positioning with small displacements as a function of the set values of the movement of the motor shaft and the set values of its acceleration and deceleration times for the specified specified displacements. For the first time, dependences are obtained for a quantitative estimate of the minimum fundamental electromagnetic energy losses of an induction motor and the corresponding maximum speed and optimal acceleration and deceleration times in the function of the set given small displacements for a linear, parabolic and quasi-optimal trajectory of the engine speed during positioning.*

Practical value. *The calculated analytical dependencies obtained are intended for a quantitative estimation of the main electromagnetic energy losses of a frequency-controlled induction motor in the small-displacement mode. By determining, using the proposed analytical dependencies of the maximum speed values and the optimum acceleration and deceleration times of the frequency-controlled asynchronous motor, minimization of its main electromagnetic energy losses is achieved by positioning for linear, parabolic and quasi-optimal velocity trajectories.*

Keywords: *asynchronous motor, frequency regulation, electromagnetic energy losses, positioning.*

REFERENCES

- [1]. Bulgakov A.A. (1966). Chastotnoye upravleniye asin-khronnymi elektrodvigatelyami, Moscow, Nauka, 1966, 298.
- [2]. Pivnyak G.G., Volkov A.V. (2006). Sovremennyye chastotno-reguliruyemye asinkhronnyye elektropri-vody s shirotnoimpulsnoy modulyatsiyey, Dnepropetrovsk: Natsionalnyy gornyy universitet, 470.
- [3]. Polyakov V.N. (2006). Ekstremal'noye upravleniye elek-tricheskimi dvigatelyami, Yekaterinburg: UGTU–UPI, 420.
- [4]. Radin V.I., Bruskin D.E., Zorokhodich A.Ye. (1988). Elektricheskyye mashiny: asin-khronnyye mashiny: Ucheb. dlya elektromekh. spets. Vuzov, Pod red. N.P. Kopylova, Moscow, Vyssh.shk., 328.
- [5]. Sandler A.S., Sarbatov R.S. Avtomaticheskoye chas-totnoye upravleniye asinkhronnymi dvigatelyami, Moscow, Energiya, 1974, 328.
- [6]. Shreyner R.T., Dmitrenko YU.A. (1982). Opti-mal'noye chastotnoye upravleniye asinkhronnymi elektropriivodami, Kishinev: Shtiintsa, 224.
- [7]. Kovach K.P., Rats I. (1963). Perekhodnyye protsessy v mashinakh peremennogo toka, Per. s nem. yaz., Moscow: Gosenergoizdat, 744.
- [8]. Merfi Dzh. (1979). Tiristornoye upravleniye dvigate-lyami peremennogo toka, Moscow, Energiya, 256.
- [9]. Volkov A.V., Kolesnikov A.A. (2013). Energoberegayushcheye upravleniye skorost'yu chastotno-reguliruyemogo asinkhronnogo dvigatelya v pusko-tormoznykh rezhimakh, Elektrotehnika, 5, 2 – 9.
- [10]. Volkov V.A. (2017). Elektroberezheniye v chas-totno-reguliruyemykh asinkhronnykh elektropriivodakh posred-stvom optimizatsii vremen ikh razgona i tormozheniya, Visnik Natsional'nogo tekhnichnogo uni-versitetu «Kharkivskiy politekhnichnyi institut», 27 (1249), 258-263.
- [11]. Petrov YU.P. (1961). Optimal'noye upravleniye elek-troprivodom, Moscow-Leningrad, Gosenergoiz-dat, 187.
- [12]. Petrov YU.P. (1971). Optimal'noye upravleniye elektropriivodom s uchetom ogranicheniy po nagrevu, Leningrad, Energiya, 144.
- [13]. Tolochko V.I., Rozkaryaka P.I., Chekavskiy G.S. (2011). Optimizatsiya elektropotreble-niya pozitsion-nogo elektropriivoda s vektornym upravleniyem as-inkhronnym dvigatelem, Naukovy pratsi Donets'kogo natsional'nogo tekhnichnogo universitetu, 11 (186), 396 – 406.
- [14]. Tikhovod S.M. (2015). Usovershenstvovaniye it-eratsionnykh metodov resheniya sistem nelineynykh uravneniy sostoyaniya magnitoelektricheskikh skhem zameshcheniya, Elektrotehnika ta elektroenergetika, 1, 30 – 46. DOI: <http://dx.doi.org/10.15588/1607-6761-2015-1-8>
- [15]. Tikhovod S.M., Kornus T.M., Patalakh D.G. (2015). Metod uskorenno chislennogo rascheta perekhodnykh protsessov v elektricheskikh tsepyakh na os-nove approksimatsii resheniya algebricheskimi poli-nomami, Elektrotehnika ta elektroenergetika, 2, 48 – 54. DOI: <http://dx.doi.org/10.15588/1607-6761-2015-2-7>
- [16]. Volkov V.A. (2016). Optimalnoye i kvazioptimal-noye energoberegayushcheye upravleniye polozhe-niyem chastotnoreguliruyemogo asinkhronnogo dvi-gatelya, Elektrotehnika ta elektroyenergetika, 1, 25 – 34. DOI: <http://dx.doi.org/10.15588/1607-6761-2016-1-4>.
- [17]. Kalnitskiy L.A., Dobrotin D.A., Zheverzhev V.F. (1976). Spetsialnyy kurs vysshey matematiki dlya vuzov, ucheb. Posobiye, Moscow, 389.
- [18]. Venikov V.A. (1976). Teoriya podobiya i modeliro-vaniya. Moscow, 479.