

## ОПТИМИЗАЦИЯ ВРЕМЕН РАЗГОНА И ТОРМОЖЕНИЯ ПОЗИЦИОННЫХ ЧАСТОТНОРЕГУЛИРУЕМЫХ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ

**Цель работы.** Получение аналитических зависимостей для расчета оптимальных времен разгона и торможения частотнорегулируемого асинхронного двигателя (ЧРАД), обеспечивающих минимизацию основных электромагнитных потерь энергии (ОЭПЭ) двигателя при малых перемещениях его вала, а также – оценка влияния упомянутых оптимальных времен разгона и торможения на значение ОЭПЭ в ЧРАД при различных видах тахограмм двигателя (с линейной и параболической формами или формой гиперболического синуса).

**Методы исследования.** Методы оптимального управления и имитационного моделирования.

**Полученные результаты.** Получены аналитические зависимости и предложена графоаналитическая методика для расчета оптимальных времен разгона и торможения ЧРАД, обеспечивающих минимизацию ОЭПЭ двигателя при малых перемещениях его вала. Выполнена оценка влияния упомянутых оптимальных времен разгона и торможения на значение ОЭПЭ в ЧРАД при различных видах тахограмм двигателя (с линейной и параболической формами или формой гиперболического синуса).

**Научная новизна.** Впервые получены аналитические зависимости для расчета оптимальных времен разгона и торможения при малых перемещениях ЧРАД, посредством которых обеспечивается минимизация электромагнитных потерь в двигателе. Впервые разработана графоаналитическая методика для определения указанных оптимальных времен разгона и торможения ЧРАД при обработке малых перемещений.

**Практическая ценность.** Предложен подход к энергосбережению в позиционных частотнорегулируемых асинхронных электроприводах посредством оптимизации их времен разгона и торможения, что позволяет на практике без существенных капитальных затрат снизить потери электроэнергии в этих электроприводах.

**Ключевые слова:** асинхронный двигатель, частотное регулирование, позиционирование, оптимальное энергосберегающее управление, графоаналитическая методика.

### ВВЕДЕНИЕ

Принимая во внимание в последние годы в мире и Украине широкое внедрение во всех отраслях хозяйства частотнорегулируемых асинхронных электроприводов (ЧРАЭП) и наблюдающееся удорожание электрической энергии, становится актуальной и востребованной практикой задача энергосбережения в указанных электроприводах (в том числе – при режимах их позиционирования) за счет уменьшения в них непроизводительных потерь электроэнергии.

### АНАЛИЗ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Известные эффективные направления энергосбережения для ЧРАЭП основаны на использовании оптимальных законов частотного управления для частотнорегулируемых асинхронных двигателей (ЧРАД) в установившихся [1–5] и динамических режимах их работы. При этом, несмотря на очевидную востребованность, до настоящего времени вопросы энергосбережения для ЧРАЭП в динамических режимах в отечественной и зарубежной научно-технической литературе исследованы очень недостаточно.

Один из таких подходов к энергосбережению в указанных электроприводах в динамических режимах зак-

лючается в формировании определенного вида (параболической формы или в форме гиперболического синуса) энергосберегающих тахограмм разгона и торможения ЧРАД при обработке заданных значений скорости [6, 7] или положения [8–10]. Причем при применении в динамических режимах разгона и торможения ЧРАД параболического вида тахограмм минимизируются только электрические потери в данном двигателе [8, 9], а при использовании тахограмм с формой гиперболического синуса – минимизируется сумма электрических и магнитных потерь (т. е. – электромагнитные потери) энергии в двигателе [6, 7, 10].

Другим подходом к энергосбережению в позиционных ЧРАЭП (обычно характеризующихся относительно продолжительными временными паузами между соседними перемещениями) является предложенные в статье [11] размагничивание ЧРАД в течение времени указанной паузы и последующее его намагничивание (до номинального магнитного потока) перед очередным перемещением. В этой статье для дополнительного снижения непроизводительных потерь энергии в таких ЧРАЭП также предлагается осуществлять указанные намагничивание и размагничивание ЧРАД с траекторией изменения потокосцепления ротора в виде гиперболического синуса.

В предлагаемой же статье представлен совершенно иной (отличающийся от известных) подход к осуществ-

лению энергосбережения в ЧРАЭП, а именно – за счет определения и последующего задания оптимальных значений времен разгона и торможения ЧРАД, минимизирующих электромагнитные потери энергии этого двигателя при отработке перемещений его вала.

**ЦЕЛЬ РАБОТЫ**

Целью предложенной статьи является получение аналитических зависимостей для расчета оптимальных времен разгона и торможения ЧРАД, обеспечивающих минимизацию основных электромагнитных потерь энергии (ОЭПЭ) двигателя при малых перемещениях его вала, а также – оценка влияния упомянутых оптимальных времен разгона и торможения на значение ОЭПЭ в ЧРАД при различных видах тахограмм двигателя (с линейной и параболической формами или формой гиперболического синуса).

**ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА**

При дальнейших исследованиях приняты следующие исходные допущения:

- рассматриваются только основные составляющие от общих электромагнитных потерь мощности и энергии ЧРАД, создаваемые основными гармоническими составляющими фазных статорных токов двигателя;
- системой автоматического управления (САУ) электроприводом идеально поддерживается неизменным значение модуля потокоцепления ротора:  $\Psi_r = \text{const}$  (равное его номинальному значения  $\Psi_{гн}$ );
- в ЧРАЭП 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, так как влияние указанных составляющих при применении современных быстродействующих САУ на практике очень мало;
- значения статического момента  $M_c$  и момента инерции  $J$  привода (приведенные к валу электродвигателя) в исследуемых динамических режимах разгона и торможения принимаются неизменными;
- все аналитические зависимости и расчеты приводятся в общепринятой для машин переменного тока системе относительных единиц (о.е.);
- 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).

На *первом этапе* исследований получены аналитические зависимости, описывающие математически из-

менения скорости  $\omega(t)$ , положения  $\alpha(t)$  и производной  $\omega'(t)$  скорости ЧРАД, которые для режимов разгона (Р) с временами разгона  $t_p$  и торможения (Т) с временем торможения  $t_t$  представлены в табл.1 при упомянутых различных видах тахограмм. При этом, согласно [7, 10], в табл. 1 под квазиоптимальной понимается тахограмма, описываемая математически с применением функции гиперболического синуса от времени, в которой коэффициент  $K$  определяется через параметры электродвигателя, а значение поправочного коэффициента  $\xi^*$  (в расчетах принятого равным 1,3 о.е. при разгоне и 0,2 при торможении) соответствует минимальному среднему квадратичному отклонению между упомянутой квазиоптимальной тахограммой и фактически оптимальной тахограммой (определенной численными методами расчета [7]).

При этом представленные в табл.1 две разновидности («а» и «б») тахограмм  $\omega(t)$  ЧРАД (применительно к их параболической форме и форме в виде гиперболического синуса) характеризуются между собой следующими отличиями: при разновидности «а» с увеличением модуля скорости двигателя увеличивается модуль производной скорости, а при разновидности «б» – с увеличением модуля скорости модуль ее производной, наоборот, уменьшается.

На *втором этапе* исследований из зависимостей [7, 10]:

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

рассчитывались текущие значения основных электромагнитных потерь мощности  $\Delta P_{эм}$  ЧРАД и вычислялись основные электромагнитные потери энергии (ОЭПЭ)  $\Delta W_p$  и  $\Delta W_t$  двигателя за время разгона  $t_p$  и торможения  $t_t$  соответственно. В зависимостях (1) используются обозначения:  $\omega$  и  $\omega'$  – текущие значения скорости и производной скорости соответственно;  $a, b, c$  – коэффициенты, определяемые через параметры двигателя [10]:

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

где  $P_n$  и  $\eta_n$  – 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 обобщен-

ного вектора потокосцепления ротора двигателя;  $R_s$  и  $R_r$  – активные сопротивления соответственно статорной и роторной фазных обмоток двигателя;  $L_m$  и  $k_r$  – соответственно индуктивность намагничивания и коэффициент связи ротора двигателя.

На данном этапе исследований задавались режимы обработки малых перемещений вала двигателя  $\alpha_p$  и  $\alpha_T$  соответственно при разгоне и торможении, равные  $\alpha_p = \alpha_T = 753,6$  о.е. (что соответствовало 20 оборотам вала исследуемого двигателя); при этом режим разгона осуществлялся от нулевой до максимальной скорости  $\omega_{mp}$ , а режим торможения характеризовался изменением скорости от максимального значения  $\omega_{MT}$  до нуля.

Эти исследования проводились для наиболее распространенного на практике линейного вида тахограммы и известных упомянутых энергосберегающих (параболической формы и в форме гиперболического синуса) видов тахограмм ЧРАД на основе параметров электродвигателя типа АДО-2000-6000-12У1 мощностью 2000 кВт и напряжением 6кВ (приведенных в [10]).

Путем варьирования значений времен разгона  $t_p$  и торможения  $t_T$  ЧРАД (в диапазоне от 1000 до 4000 о.е.) рассчитаны из (1) для всех видов рассматриваемых тахограмм зависимости ОЭПЭ  $\Delta W_p(t_p)$  и  $\Delta W_T(t_T)$ , которые построены в виде соответствующих графиков на рис. 1 (а – для  $M_c = 0$ ; б – для номинального значения момента сопротивления  $M_c = M_n = 0,745$  о.е.).

Таблица 1 – Аналитические зависимости для рабочей координат (положения, скорости и производной скорости) ЧРАД

Режим	Аналитические зависимости для:		
	положения $\alpha(t)$	скорости $\omega(t)$	производной скорости $\omega'(t)$
Квазиоптимальная тахограмма, график 1а			
P	$\alpha_p \left[ \frac{\text{ch}(\xi^* \sqrt{K} \cdot t) - 1}{\text{ch}(\xi^* \sqrt{K} \cdot t_p) - 1} \right]$	$\alpha_p (\xi^* \sqrt{K}) \left[ \frac{\text{sh}(\xi^* \sqrt{K} \cdot t)}{\text{ch}(\xi^* \sqrt{K} \cdot t_p) - 1} \right]$	$\alpha_p (\xi^* \sqrt{K})^2 \left[ \frac{\text{ch}(\xi^* \sqrt{K} \cdot t)}{\text{ch}(\xi^* \sqrt{K} \cdot t_p) - 1} \right]$
T	$\alpha_T \left\{ \frac{\text{ch}[\xi^* \sqrt{K} \cdot (t_T - t)] - 1}{\text{ch}(\xi^* \sqrt{K} \cdot t_T) - 1} \right\}$	$\alpha_T (\xi^* \sqrt{K}) \left[ \frac{\text{sh}(\xi^* \sqrt{K} \cdot (t_T - t))}{\text{ch}(\xi^* \sqrt{K} \cdot t_T) - 1} \right]$	$-\alpha_T (\xi^* \sqrt{K})^2 \left[ \frac{\text{ch}(\xi^* \sqrt{K} \cdot (t_T - t))}{\text{sh}(\xi^* \sqrt{K} \cdot t_T) - 1} \right]$
Квазиоптимальная тахограмма, график 1б			
P	$\alpha_p \left\{ t + \frac{\text{ch}[\xi^* \sqrt{K} \cdot (t_p - t)] - \text{ch}[\xi^* \sqrt{K} \cdot t_p]}{(\xi^* \sqrt{K}) \cdot \text{sh}(\xi^* \sqrt{K} \cdot t_p)} \right\}$	$\alpha_p \left\{ 1 - \frac{\text{sh}[\xi^* \sqrt{K} \cdot (t_p - t)]}{\text{sh}(\xi^* \sqrt{K} \cdot t_p)} \right\}$	$\alpha_p (\xi^* \sqrt{K}) \left\{ \frac{\text{ch}[\xi^* \sqrt{K} \cdot (t_p - t)]}{\text{sh}(\xi^* \sqrt{K} \cdot t_p)} \right\}$
	$\left[ t_p + \frac{1 - \text{ch}(\xi^* \sqrt{K} \cdot t_p)}{(\xi^* \sqrt{K}) \cdot \text{sh}(\xi^* \sqrt{K} \cdot t_p)} \right]$	$\left[ t_p + \frac{1 - \text{ch}(\xi^* \sqrt{K} \cdot t_p)}{(\xi^* \sqrt{K}) \cdot \text{sh}(\xi^* \sqrt{K} \cdot t_p)} \right]$	$\left[ t_p + \frac{1 - \text{ch}(\xi^* \sqrt{K} \cdot t_p)}{(\xi^* \sqrt{K}) \cdot \text{sh}(\xi^* \sqrt{K} \cdot t_p)} \right]$
T	$\alpha_T \left\{ t - \frac{\text{ch}[\xi^* \sqrt{K} \cdot t] - 1}{(\xi^* \sqrt{K}) \cdot \text{sh}(\xi^* \sqrt{K} \cdot t_T)} \right\}$	$\alpha_T \left\{ 1 - \frac{\text{sh}[\xi^* \sqrt{K} \cdot t]}{\text{sh}(\xi^* \sqrt{K} \cdot t_T)} \right\}$	$-\alpha_T (\xi^* \sqrt{K}) \left[ \frac{\text{ch}(\xi^* \sqrt{K} \cdot t)}{\text{sh}(\xi^* \sqrt{K} \cdot t_T)} \right]$
	$\left[ t_T + \frac{1 - \text{ch}(\xi^* \sqrt{K} \cdot t_T)}{(\xi^* \sqrt{K}) \cdot \text{sh}(\xi^* \sqrt{K} \cdot t_T)} \right]$	$\left[ t_T + \frac{1 - \text{ch}(\xi^* \sqrt{K} \cdot t_T)}{(\xi^* \sqrt{K}) \cdot \text{sh}(\xi^* \sqrt{K} \cdot t_T)} \right]$	$\left[ t_T + \frac{1 - \text{ch}(\xi^* \sqrt{K} \cdot t_T)}{(\xi^* \sqrt{K}) \cdot \text{sh}(\xi^* \sqrt{K} \cdot t_T)} \right]$
Параболическая тахограмма, график 2а			
P	$\alpha_p (t/t_p)^3$	$3\alpha_p t^2/t_p^3$	$6\alpha_p t/t_p^3$
T	$\alpha_T (t_T - t)^3/t_T^3$	$3\alpha_T (t_T - t)^2/t_T^3$	$-6\alpha_T (t_T - t)/t_T^3$
Параболическая тахограмма, график 2б			
P	$\alpha_p (1,5 \cdot t_p \cdot t^2 - 0,5 \cdot t^3)/t_p^3$	$3\alpha_p [t_p^2 - (t_p - t)^2]/2t_p^3$	$3\alpha_p (t_p - t)/t_p^3$
T	$\alpha_T (1,5 \cdot t_T^2 \cdot t - 0,5 \cdot t^3)/t_T^3$	$3\alpha_T (t_T^2 - t^2)/2t_T^3$	$-3\alpha_T t/t_T^3$
Линейная тахограмма, график 3			
P	$\alpha_p \cdot (t/t_p)^2$	$2\alpha_p t/t_p^2$	$2\alpha_p/t_p^2$
T	$\alpha_T [(2 \cdot t_T \cdot t - t^2)/t_T^2]$	$2\alpha_T [(t_T - t)/t_T^2]$	$-2\alpha_T/t_T^2$

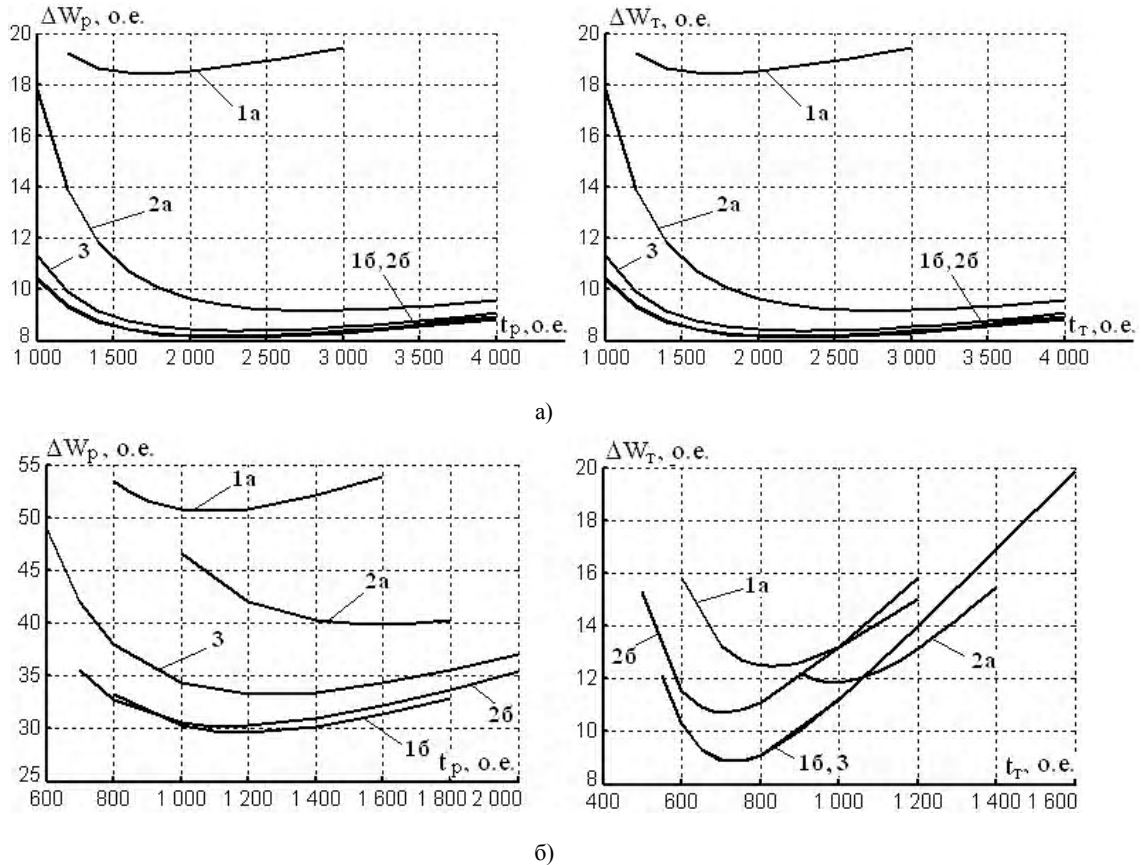


Рисунок 1 – Зависимости потерь энергии ЧРАД при малых перемещениях  $\alpha_p = \alpha_t = 20$  об. = 753 о.е. от значений времен разгона и торможения (а – при  $M_c = 0$ ; б –  $M_c = M_H$ )

Анализ указанных графиков свидетельствует о том, что все они для рассмотренных видов тахограмм имеют «U»-образный вид и явно выраженный экстремум, характеризующий собой наличие определенных (оптимальных) значений времен разгона  $t_p^0$  и торможения  $t_t^0$ , при которых потери энергии ЧРАД в режимах позиционирования при малых перемещениях минимальны (оптимальны) и равны  $\Delta W_p^0(t_p^0)$  и  $\Delta W_t^0(t_t^0)$  соответственно. Полученные расчетные данные применительно к оптимальным режимам разгона и торможения при обработке перемещений  $\alpha_p = \alpha_t = 753,6$  о.е. представлены в табл.2.

На *третьем этапе* исследования (после взятия производных по времени разгона  $t_p$  и торможения  $t_t$  от аналитических зависимостей  $\Delta W_p(t_p)$  и  $\Delta W_t(t_t)$  и приравнивания их к нулю) определены из таким образом полученных выражений расчетные аналитические зависимости для оптимальных времен разгона  $t_p^0$  и тор-

можения  $t_t^0$  при обработке ЧРАД заданных малых перемещений для всех рассмотренных видов тахограмм. Указанные аналитические зависимости имеют следующий общий вид:

$$t_{p,t}^0 = \sqrt{\frac{J \cdot \alpha_{p,t}}{y}} \cdot \left[ \pm p \cdot M_c \cdot b + \sqrt{(p \cdot M_c \cdot b)^2 + q \cdot b \cdot y} \right]^{0,5}, \quad (3)$$

где  $\alpha_{p,t}$  – значение обрабатываемого малого перемещения (для индекса «р» – в режиме разгона, а для индекса «т» – в режиме торможения);  $t_{p,t}^0$  – оптимальное значение времени разгона (для индекса «р») или торможения (для индекса «т») при малых перемещениях

$$y = a + b \cdot M_c^2 - \left[ s \cdot c(p \cdot \alpha_{p,t})^{1,3} \right] \cdot \frac{1}{(t_{p,t}^0)^{1,3}} \quad (4)$$

рассчитываемая величина, содержащаяся в подкоренных выражениях формулы (3).

В формулах (3) и (4) значения постоянных коэффициентов:  $p, q, s$ , – определяются из табл. 3 в зависимости от вида задаваемой тахограммы ЧРАД при малых перемещениях. При этом в формуле (3) при двойных знаках всегда: знак «+» соответствует режиму разгона, а знак «-» режиму торможения ЧРАД.

Для режима холостого хода (при  $M_c = 0$ ) ЧРАД формулы (3) и (4) преобразуются к следующему более простому виду:

$$t_{p,\tau}^0 = t_{p\,xx}^0 = t_{\tau\,xx}^0 = \sqrt{J \cdot \alpha_{p,\tau}} \cdot \sqrt[4]{\frac{q \cdot b}{y_{xx}}}, \quad (5)$$

$$y_{xx} = a - \left[ s \cdot c(p \cdot \alpha_{p,\tau})^{1,3} \right] \cdot \frac{1}{(t_{p,\tau}^0)^{1,3}}. \quad (6)$$

Из анализа нелинейного вида уравнений (3) и (5), содержащих, исходя из выражения (4) или (6), переменную величину  $t_{p,\tau}$  (или  $t_{p\,xx}^0, t_{\tau\,xx}^0$ ) одновременно в левой и правой частях этих уравнений, их необходимо решать одним из известных численных методов решения нелинейных алгебраических уравнений (например, итерационным методом) [12–15].

Выполним расчет значений коэффициентов  $\lambda_p$  и  $\lambda_\tau$ :

$$\lambda_p = \frac{t_p^0}{t_{p\,xx}^0} \text{ и } \lambda_\tau = \frac{t_\tau^0}{t_{\tau\,xx}^0}, \quad (7)$$

характеризующих собой при обработке данных малых перемещений  $\alpha_{p,\tau}$  отношение между собой оптималь-

ных времен разгона ( $t_p^0$ ) и торможения ( $t_\tau^0$ ) ЧРАД при наличии нагрузки ( $M_c \neq 0$ ) на валу двигателя к оптимальным временам разгона ( $t_{p\,xx}^0$ ) и торможения ( $t_{\tau\,xx}^0$ ) на холостом ходу (при  $M_c = 0$ ) двигателя.

С учетом подстановки в (7) соотношений из (3)–(6), значения указанных коэффициентов определяются из зависимостей:

$$\lambda_{p,\tau} = \sqrt{\frac{y_{xx}}{y}} \times \left[ \frac{\pm p \cdot M_c \cdot b + \sqrt{(p \cdot M_c \cdot b)^2 + q \cdot b \cdot y}}{\sqrt{q \cdot b \cdot y_{xx}}} \right]^{0,5}. \quad (8)$$

При этом в зависимости (8) при обозначении двойного знака (в квадратных скобках) всегда: знак «+» соответствует режиму разгона, а знак «-» – торможению ЧРАД.

По результатам выполненных расчетов для малых перемещений:  $\alpha_p = \alpha_\tau = 753,6$  о.е. – на рис. 2 построены графики зависимостей коэффициентов  $\lambda_p$  и  $\lambda_\tau$  от мо-

Таблица 3 – Значения коэффициентов  $p, q, s$  в формулах (3) и (4)

Номер графика	Название тахограммы	Значения коэффициентов		
		p	q	s
1б	квазиоптимальная	2,59	2,80	0,113
2б	параболическая	3/2	9	0,1838
3	линейная	2	12	3/23

Таблица 2 – Расчетные значения параметров ЧРАД при обработке малых перемещений  $\alpha_p = \alpha_\tau = 20$  об. = 753 о.е. с оптимальными значениями времен разгона и торможения

Номер графика	Вид тахо-граммы	Значение $M_c$	$t_p^*$	$t_\tau^*$	$\Delta W_p^o(t_p^o)$	$\Delta W_\tau^o(t_\tau^o)$	$\omega_{mp}$	$\omega_{m\tau}$
1а	квазиоптимальная	0	1710	1710	18,4221	18,4221	2,2223	2,2223
		$M_H$	1085	827	50,5612	12,4657	2,3868	2,6266
1б	квазиоптимальная	0	2275	2275	8,1276	8,1276	0,39	0,39
		$M_H$	1182	728	29,6760	8,8639	0,8767	1,8364
2а	параболическая	0	2800	2800	9,1760	9,1760	0,8074	0,8074
		$M_H$	1580	985	39,8713	11,8558	1,4264	2,2952
2б	параболическая	0	2200	2200	8,1756	8,1745	0,5138	0,5138
		$M_H$	1135	705	30,2229	10,7233	0,9959	1,6034
3	линейная	0	2320	2320	8,3764	8,3764	0,6497	0,6497
		$M_H$	1260	730	33,2345	8,8651	1,1962	2,0789

мента сопротивления  $M_c$  привода для исследуемых тахограмм ЧРАД: квазиоптимальной (1б), параболической (2б) и линейной (3).

На четвертом этапе путем приравнивания аналитических зависимостей из табл. 1 для текущей скорости  $\omega(t)$  двигателя: значению  $t_p$  – при разгоне или нулевому значению – при торможении, – получены аналитические зависимости для максимальных значений скорости  $\omega_{mp}$  и  $\omega_{mt}$  ЧРАД:

$$\omega_{mp} = \omega_p(t_p) \text{ и } \omega_{mt} = \omega_T(0), \quad (9)$$

соответствующие режимам разгона и торможения и приведенные в табл. 4.

После подстановки в полученные зависимости значений оптимальных времен разгона  $t_p^0$  и торможения  $t_T^0$ , рассчитанных из зависимостей (3) и (4), определяют при варьировании значений обрабатываемого мало-

го перемещения  $\alpha_{p,T}$  соответствующие этим перемещениям ( $\alpha_p$  и  $\alpha_T$ ) максимальные значения скоростей  $\omega_{mp}$  и  $\omega_{mt}$  ЧРАД. По результатам выполненных расчетов построены графические зависимости:

$$\omega_{mp} = f_1(\alpha_p, M_c) \text{ и } \omega_{mt} = f_2(\alpha_T, M_c) \quad (10)$$

указанных максимальных значений скорости двигателя от величины обрабатываемого малого перемещения  $\alpha_p$  или  $\alpha_T$  на холостом ходу ( $M_c = 0$ ) и при номинальной нагрузке ( $M_c = M_H$ ), которые показаны на рис. 3 для исследуемых типов тахограмм (квазиоптимальной 1б, параболической 2б и линейной 3). Аналогично могут быть рассчитаны зависимости из (10), соответствующие произвольным другим значениям момента сопротивления  $M_c$  привода.

Задавая на рис. 3а,б по осям координат равные значения максимальной скорости ЧРАД

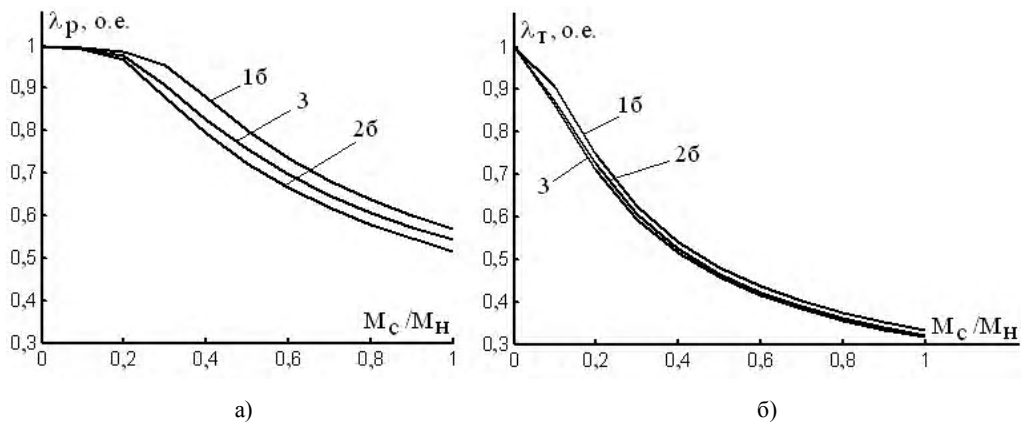


Рисунок 2 – Изменение значений коэффициентов  $\lambda_p$  и  $\lambda_T$  (а – при разгоне; б – при торможении)

Таблица 4 – Расчетные зависимости для максимальной скорости ЧРАД при обработке малых перемещений

Номер графика	Вид тахограммы	Режим	Обозначение скорости	Расчетная зависимость для максимальной скорости, о.е.
1б	квазиоптимальная	Р	$\omega_{mp}$	$\alpha_p / \left[ t_p + \frac{1 - \text{ch}(\xi^* \sqrt{K} t_p)}{\xi^* \sqrt{K} \cdot \text{sh}(\xi^* \sqrt{K} t_p)} \right]$
		Т	$\omega_{mt}$	$\alpha_T / \left[ t_T + \frac{1 - \text{ch}(\xi^* \sqrt{K} t_T)}{\xi^* \sqrt{K} \cdot \text{sh}(\xi^* \sqrt{K} t_T)} \right]$
2б	параболическая	Р	$\omega_{mp}$	$3\alpha_p / 2t_p$
		Т	$\omega_{mt}$	$3\alpha_T / 2t_T$
3	линейная	Р	$\omega_{mp}$	$2\alpha_p / t_p$
		Т	$\omega_{mt}$	$2\alpha_T / t_T$

$$\omega_{MP} = \omega_{MT} = \omega_M \quad (11)$$

$$\alpha_\Sigma = \alpha_p + \alpha_T. \quad (12)$$

(что, как известно, присуще режиму малых перемещений [10]), найдем через проекции на оси абсцисс графиков на рис. 3а,б соответствующие указанной максимальной скорости  $\omega_M$  значения обрабатываемых малых перемещений  $\alpha_p$  и  $\alpha_T$  в режиме разгона и торможения соответственно. Исходя найденных значений малых перемещений  $\alpha_p$  и  $\alpha_T$ , определим суммарные значения обрабатываемых малых перемещений ЧРАД в виде:

По результатам данных расчетов на рис. 4 построим графическую зависимость максимальной скорости  $\omega_M$  ЧРАД от величины обрабатываемого суммарного малого перемещения  $\alpha_\Sigma$ :

$$\omega_M = f_3(\alpha_\Sigma). \quad (13)$$

На *пятом этапе* с использованием полученных ранее соотношений и графических зависимостей разрабо-

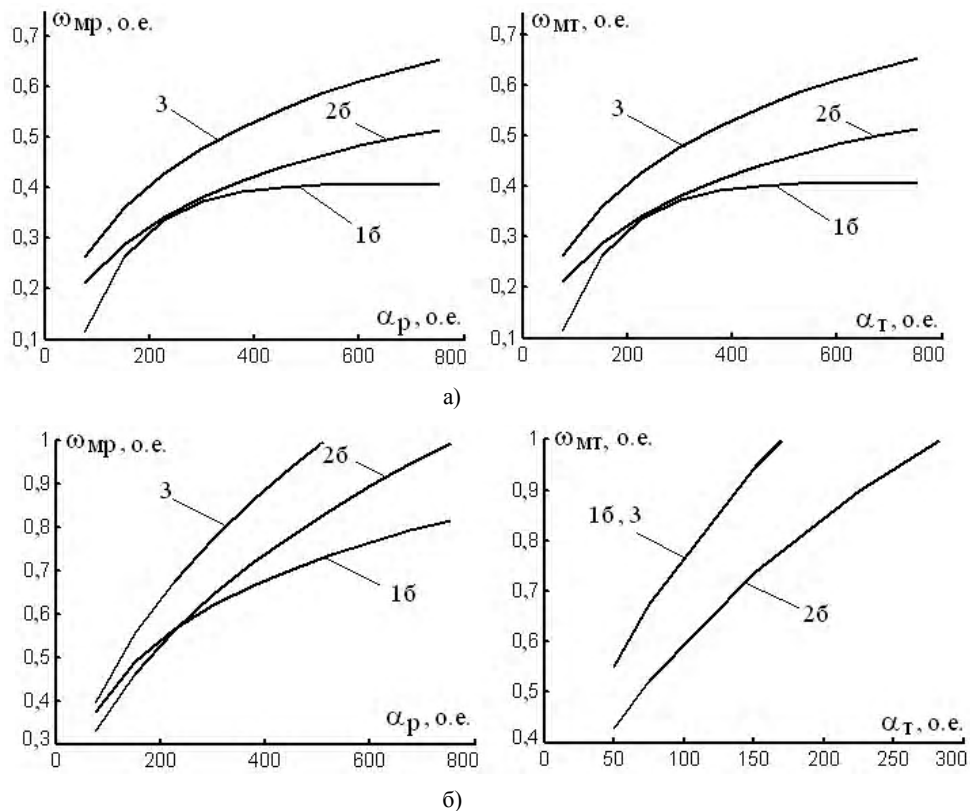


Рисунок 3 – Изменение максимальной скорости ЧРАД в зависимости от значений обрабатываемых малых перемещений в режимах разгона и торможения (а – для  $M_c = 0$ ; б – для  $M_c = M_n$ )

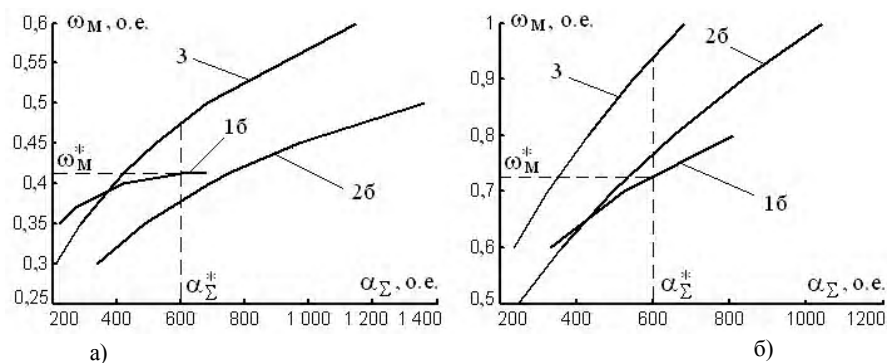


Рисунок 4 – Изменение максимальной скорости ЧРАД в зависимости от значения обрабатываемого суммарного малого перемещения  $\alpha_\Sigma$  (а – для  $M_c = 0$ ; б – для  $M_c = M_n$ )

тана графоаналитическая методика определения оптимальных времен разгона и торможения ЧРАД при обработке малых перемещений. Данная методика применима к любому из рассматриваемых видов тахограмм. Рассмотрим суть данной имитационной методики на примере использования квазиоптимальной тахограммы (разновидности 1б) при осуществлении малых перемещений ЧРАД:

1) исходными данными для методики являются параметры исследуемого двигателя (в нашем случае – АДО-2000-6000-12У1), вид энергосберегающей тахограммы и величина обрабатываемого суммарного малого перемещения (например,  $\alpha_{\Sigma}^* = 16$  оборотов = 603 о.е.);

2) из рис. 4 для заданного значения обрабатываемого суммарного малого перемещения  $\alpha_{\Sigma}^* = 603$  о.е. определяется максимальное значение скорости:  $\omega_M^*$  ЧРАД (которое, исходя из принятого закона частотного управления  $\Psi_T = \Psi_{гн} = \text{const}$ , не должно превышать единицу:  $\omega_M^* \leq 1$  о.е.; в случае, если это не выполняется, следует уменьшать значение суммарного малого перемещения  $\alpha_{\Sigma}^*$  до величины, при которой требуемое соотношение будет выполняться);

3) в соответствие с определенным значением максимальной скорости  $\omega_M^*$  из графиков на рис. 3а,б находятся при рассмотренной (квазиоптимальной) тахограмме значения малых перемещений  $\alpha_p^*$  и  $\alpha_T^*$  ЧРАД, обрабатываемых в режимах разгона и торможения соответственно;

4) путем подстановки найденных значений  $\alpha_p^*$  и  $\alpha_T^*$  в аналитические зависимости (3) и (4) из этих зависимостей определяются оптимальные значения времен разгона  $t_p^{0*}$  и торможения  $t_T^{0*}$ , соответствующие обработке суммарного малого перемещения  $\alpha_{\Sigma}^*$  ЧРАД при заданном виде тахограммы, а также находится соотношение  $\tau$  между указанными оптимальными временами, рассчитываемое в виде:

$$\tau = \frac{t_p^{0*}}{t_T^{0*}}; \quad (14)$$

5) результирующее оптимальное время обработки заданной величины  $\alpha_{\Sigma}^*$  суммарного малого перемещения ЧРАД находится в виде суммы оптимальных времен разгона  $t_p^{0*}$  и торможения  $t_T^{0*}$ :

$$t_{\Sigma}^{0*} = t_p^{0*} + t_T^{0*} = t_p^{0*} \left( 1 + \frac{1}{\tau} \right) = t_T^{0*} (\tau + 1). \quad (15)$$

На *шестом этапе* с использованием предложенной графоаналитической методики выполнены (при обработке того же заданного значения суммарного малого перемещения  $\alpha_{\Sigma}^* = 16$  оборотов = 603 о.е. ЧРАД)

расчеты: максимальных значений скорости  $\omega_M$ , обрабатываемых значений малых перемещений при разгоне  $\alpha_p^*$  и торможении  $\alpha_T^*$ , оптимальных значений времен разгона  $t_p^{0*}$  и торможения  $t_T^{0*}$ , результирующего оптимального времени  $t_{\Sigma}^{0*}$  обработки заданного малого перемещения  $\alpha_{\Sigma}^*$ , – при работе двигателя на холостом ходу и с номинальной нагрузкой для других видов (параболической 2б и линейной 3) тахограмм. Результаты проведенных (на пятом и шестом этапах) расчетов для квазиоптимальной 1б, параболической 2б и линейной 3 тахограмм представлены в табл.4.

На *седьмом этапе* для оптимальных значений времен разгона  $t_p^{0*}$  и торможения  $t_T^{0*}$  при обработке заданного суммарного малого перемещения  $\alpha_{\Sigma}^* = 16$  оборотов = 603 о.е. и различных видов тахограмм (квазиоптимальной 1б, параболической 2б и линейной 3) рассчитаны электромеханические процессы исследуемого ЧРАД (типа АДО-2000-6000-12У1): скорости  $\omega(t)$ , положения  $\alpha_{\Sigma}(t)$ , электромагнитного момента  $M(t)$  и модуля обобщенного вектора статорного тока  $I_1(t)$ , – графики которых приведены на рис.5. При этом вычисление первой из указанных величин осуществлялось из соответствующих соотношений в табл. 1, а трех последних величин – из зависимостей [10]:

$$\alpha_{\Sigma}(t) = \begin{cases} \alpha_p(t) & \text{при } 0 \leq t \leq t_p^{0*}, \\ \alpha_p(t_p^{0*}) + \alpha_T(t - t_p^{0*}) & \text{при } t_p^{0*} \leq t \leq t_p^{0*} + t_T^{0*}, \end{cases} \quad (16)$$

$$M(t) = M_c + J \cdot \omega', \quad (17)$$

$$I_1(t) = \left[ (\Psi_{гн}/L_m)^2 + M^2(t)/(k_T \Psi_{гн})^2 \right]^{0,5}, \quad (18)$$

где  $t$  – здесь текущее время, отсчитываемое от начала разгона ЧРАД на протяжении обрабатываемого малого перемещения:  $0 \leq t \leq t_p^{0*} + t_T^{0*}$ .

На *восьмом этапе* осуществлены из (1) расчеты энергетических процессов: основных электромагнитных по-



ть мощности  $\Delta P_{эм}(t)$  и суммарных основных электромагнитных потерь энергии двигателя в виде:

$$\Delta W_{\Sigma}(t) = \Delta W_p(t) + \Delta W_T(t), \quad (19)$$

при отработке малых перемещений исследуемого ЧРАД с оптимальными временами разгона  $t_p^{0*}$  и торможения  $t_T^{0*}$  и разными видами тахограмм (квазиоптимальной 1б, параболической 2б и линейной 3). Графики указанных энергетических процессов представлены на рис.5 для режимов холостого хода (а) и номинальной нагрузки (б) двигателя. Перевод размерности из относительных единиц в абсолютные единицы осуществляется умножением значений в относительных единицах на соответствующие базисные величины, равные:  $(1/314)c$  – для времени;  $52,33$  рад/с – для скорости;  $(1/6)$ рад. – для положения;  $51,53$  кНм – для электромагнитного момента двигателя и момента сопротивления привода;  $367$  А – для модуля статорного тока двигателя;  $2696,8$  кВт – для мощности;  $8,5885$ кДж – для энергии.

Основные результаты выполненных расчетов электромеханических и энергетических процессов, соответствующих оптимальной отработке заданного суммарного малого перемещения  $\alpha_{\Sigma}^* = 16$  оборотов =  $603$  о.е. частотнорегулируемого асинхронного двигателя АД0-2000-6000-12У1, применительно к различным видам тахограмм (квазиоптимальной 1б, параболической 2б и линейной 3) приведены в табл.5.

## ВЫВОДЫ

1. Полученные аналитические зависимости (которые приведены в табл.1 для положения  $\alpha(t)$ , скорости  $\omega(t)$ , производной скорости  $\omega'(t)$  и в табл.4 – для максимальных скоростей  $\omega_{мр}$  и  $\omega_{мт}$  двигателя) позволяют через заданные значения  $\alpha_p$  и  $\alpha_T$  перемещений вала двигателя и заданные произвольные времена разгона  $t_p$  и торможения  $t_T$  определить вышеперечисленные рабочие координаты ЧРАД в режимах разгона и торможения при отработке малых перемещений для различных видов (квазиоптимальной, параболической и линейной) тахограмм.

2. Выявлено, что согласно рис. 1 для всех рассмотренных видов тахограмм (квазиоптимальной 1а и 1б, параболической 2а и 2б, линейной 3), соответствующих отработке малых перемещений, зависимости ОЭПЭ:  $\Delta W_p(t_p)$  и  $\Delta W_T(t_T)$ , – в режимах разгона и торможения при отработке малых перемещений вала ЧРАД и ва-

рировании значений времен разгона  $t_p$  и торможения  $t_T$  имеют «U»-образный вид. С учетом этого установлено, что существуют явно выраженные минимумы значений ОЭПЭ  $\Delta W_p(t_p)$  и  $\Delta W_T(t_T)$  в течение режимов разгона и торможения, которым соответствуют определенные значения оптимальных времен разгона  $t_p$  и торможения  $t_T$ .

3. Из анализа графиков на рис. 1 и данных из табл. 2 следует, что наименьшие значения ОЭПЭ в ЧРАД при отработке малых перемещений присущи: в режимах разгона – квазиоптимальной (разновидности 1б) и параболической (разновидности 2б) тахограммам; в режимах торможения на холостом ходу – квазиоптимальной (разновидности 1б) и параболической (разновидности 2б) тахограммам, а при торможении с номинальной нагрузкой – квазиоптимальной (разновидности 1б) и линейной (3) тахограммам. При этом выявлено, что наибольшие (наихудшие) значения ОЭПЭ характерны для квазиоптимальной (разновидности 1а) и параболической (разновидности 2а) тахограммам (при которых также одновременно наблюдается повышенное значение максимальных скоростей  $\omega_{мр}$  и  $\omega_{мт}$  двигателя), с учетом чего практическое применение указанных тахограмм при отработке малых перемещений ЧРАД нецелесообразно (поэтому в предложенной статье, начиная с третьего этапа, эти варианты тахограмм далее не рассматриваются).

4. Полученные аналитические зависимости (3)–(6), в которые входят численные значения коэффициентов:  $p$ ,  $q$ ,  $s$  из табл. 3, – позволяют рассчитать оптимальные значения времен разгона  $t_p^0$  и торможения  $t_T^0$  при отработке малых перемещений ЧРАД под нагрузкой и на холостом ходу для квазиоптимальной (разновидности 1б), параболической (разновидности 2б) и линейной тахограмм. Из анализа графиков для коэффициентов  $\lambda_p$  и  $\lambda_T$  на рис.2, рассчитанных из зависимостей (7) и (8), следует, что при неизменных значениях обрабатываемых перемещений  $\alpha_p$  и  $\alpha_T$  ЧРАД с увеличением значения момента сопротивления  $M_c$  привода от нуля до номинального значения оптимальных времен разгона  $t_p^0$  и торможения  $t_T^0$  ЧРАД уменьшаются (в сравнении с отработкой перемещений на холостом ходу) в (2–3) раза.

5. Разработанная на основе зависимостей (9) – (15) графоаналитическая методика позволяет, исходя из заданного суммарного значения обрабатываемого положения  $\alpha_{\Sigma}^*$  ЧРАД (из начального остановленного состояния в конечное остановленное состояние вала двигателя): определить оптимальное распределение обрабаты-

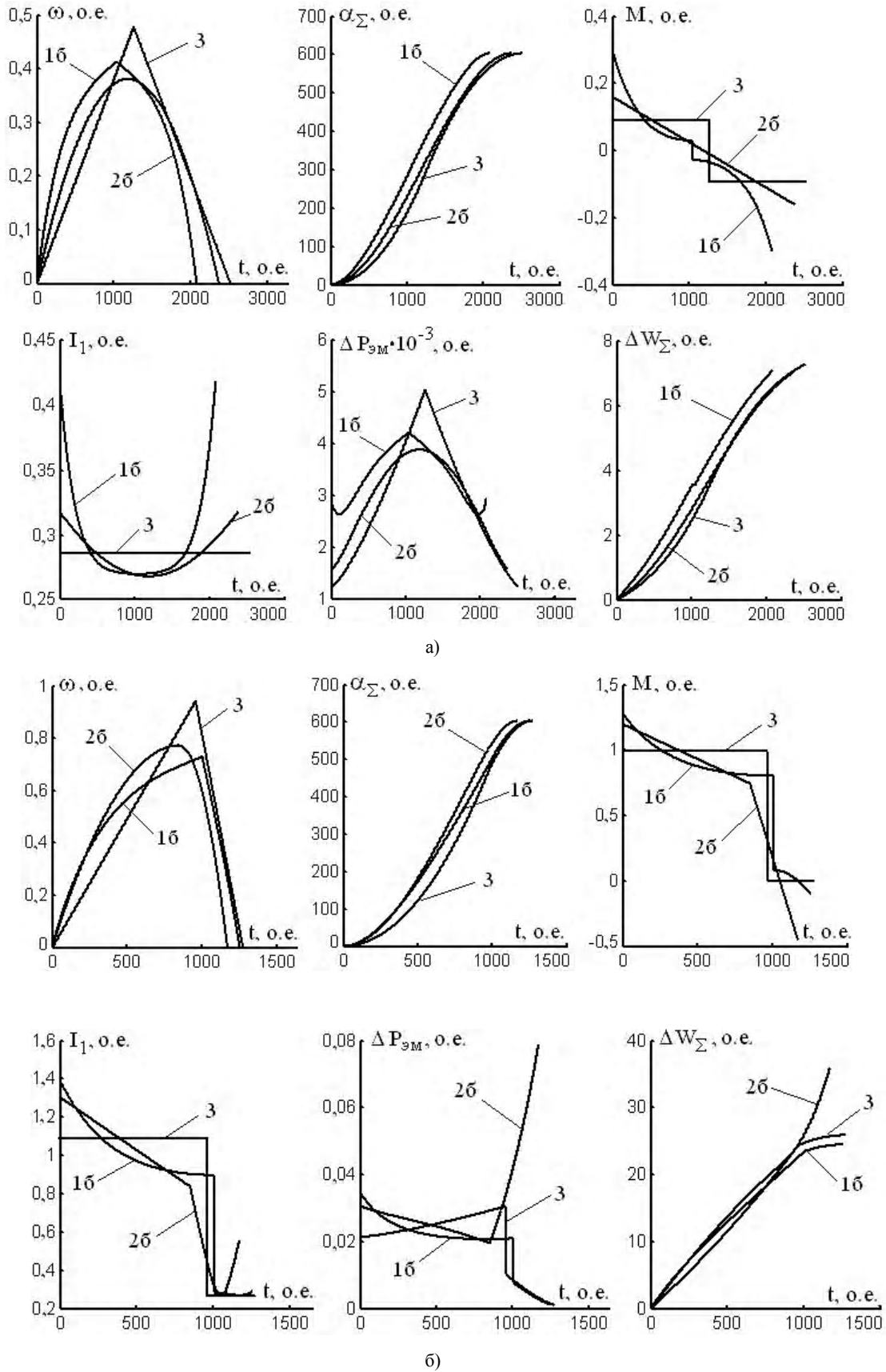


Рисунок 5 – Электромеханические и энергетические процессы ЧРАД при обработке суммарного перемещения с оптимальными временами разгона и торможения (а – при  $M_c = 0$ ; б –  $M_c = M_n$ )

ваемых положений в течение режимов разгона ( $\alpha_p^{0*}$ ) и торможения ( $\alpha_T^{0*}$ ), а также – найти значения оптимальных времен разгона  $t_p^{0*}$  и торможения  $t_T^{0*}$ , соответствующие минимизации ОЭПЭ при отработке суммарного малого перемещения.

6. Проведенный анализ изменения коэффициента  $\tau$  (характеризующего из (14) соотношение между собой оптимальных времен разгона  $t_p^{0*}$  и торможения  $t_T^{0*}$  при отработке суммарного перемещения  $\alpha_\Sigma^*$ ) свидетельствует о том, что его значение на холостом ходу двигателя равно единице (чему соответствует соотношение  $t_p^{0*} = t_T^{0*}$  и, очевидно, симметричная тахограмма скорости ЧРАД). С увеличением момента сопротивления  $M_c$  привода от нуля до номинального значения величина упомянутого коэффициента  $\tau$  возрастает – для данного типа ЧРАД от единицы до (2,6–4) о.е. (причем, работе двигателя под нагрузкой  $M_c > 0$  соответствует уже несимметричного вида тахограмма, при которой выполняется соотношение  $t_p^{0*} > t_T^{0*}$ ).

7. Приведенными на рис. 5 графическими зависимостями электромеханических и энергетических процессов ЧРАД (значения которых, как установлено, не превышает допустимых для них ограничений) подтверждается при отработке малых перемещений достоверность осуществления минимизации ОЭПЭ частотнорегулируемого асинхронного двигателя посредством задания для него оптимальных значений времен разгона и торможения.

8. Из анализа графиков ОЭПЭ на рис. 1 и их оптимальных численных значений, приведенных в табл. 2, следует, что посредством задания оптимальных времен разгона и торможения при отработке ЧРАД малых перемещений обеспечивается уменьшение основных электромагнитных потерь энергии  $\Delta W_p, \Delta W_T, \Delta W_\Sigma$  от десятков процентов до нескольких раз. Согласно данным

из табл. 5, из рассмотренных видов энергосберегающих тахограмм наименьшие значения ОЭПЭ обеспечиваются применением квазиоптимальной (разновидности 1б) и параболической (разновидности 2б) тахограмм с соответствующими им оптимальными временами разгона и торможения при отработке малых перемещений.

9. Таким образом, задание оптимальных времен разгона и торможения для позиционных частотнорегулируемых асинхронных электроприводов является эффективным и целесообразным (не требующим существующих дополнительных капитальных затрат) подходом к снижению в этих электроприводах непроизводительных потерь энергии в динамических режимах. Областью применения предложенного в статье оптимального энергосберегающего управления ЧРАД могут стать большинство существующих общепромышленных позиционных электроприводов, к которым не предъявляются предельно высокие требования по быстродействию при отработке перемещений, функционирующих при постоянном значении момента сопротивления и в интенсивных пускотормозных режимах.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Шрейнер Р. Т. Оптимальное частотное управление асинхронными электроприводами / Р. Т. Шрейнер, Ю. А. Дмитренко. – Кишинев: Штиинца, 1982. – 224с.
2. Поляков В.Н. Экстремальное управление электрическими двигателями / В. Н. Поляков, Р. Т. Шрейнер. – Екатеринбург: УГТУ – УПИ, 2006. – 420с.
3. Сандлер А. С. Автоматическое частотное управление асинхронными двигателями/ А. С. Сандлер, Р. С. Сарбатов. – М.: Энергия, 1974. – 328с.
4. Костенко М. П. Электрические машины. Специальная часть. – Л.: Госэнергоиздат, 1949. – 708с.
5. Пивняк Г. Г. Современные частотно-регулируемые асинхронные электроприводы с широтно-импульсной модуляцией / Г. Г. Пивняк, А. В. Волков. – Днепропетровск: Национальный горный университет, 2006. – 470с.
6. Волков А. В. Энергосберегающее управление скоростью частотно-регулируемого асинхронного дви-

Таблица 5 – Расчетные значения параметров ЧРАД при отработке суммарного малого перемещения с оптимальными значениями времен разгона и торможения

Номер графиков	Вид тахо-граммы	Значение $M_c$	$t_p^{0*}$	$t_T^{0*}$	$\omega_m$	$\alpha_p^{0*}$	$\alpha_T^{0*}$	$\Delta W_p^0$	$\Delta W_T^0$	$\Delta W_\Sigma^0$
Размерность			В относительных единицах (о.е.)							
1б	квази-оптимальная	0	1042	1042	0,413	301,5	301,5	3,551	3,551	7,103
		$M_H$	1007	249,8	0,7289	509	94	23,46	1,02	24,48
2б	параболическая	0	1188	1188	0,378	301,5	301,5	3,525	3,525	7,05
		$M_H$	851,7	321,3	0,7711	438,1	164,9	21,48	14,49	35,97
3	линейная	0	1263	1263	0,4766	301,5	301,5	3,639	3,639	7,278
		$M_H$	960,3	317,4	0,9443	453,4	149,6	24,28	1,600	25,88

- гателя в пускотормозных режимах / А. В. Волков, А. А. Колесников // Электротехника. – 2013. – № 5. – С. 2–9.
7. Волков В.А. Расчет оптимальных тахограмм разгона и торможения частотно-регулируемого асинхронного двигателя / В. А. Волков // Электротехника та електроенергетика. – 2015. – № 2. – С. 55 – 64. DOI: <http://dx.doi.org/10.15588/1607-6761-2015-2-8>
  8. Петров Ю. П. Оптимальное управление электроприводом / Ю. П. Петров. – М.–Л.: Госэнергоиздат, 1961. – 187с.
  9. Петров Ю. П. Оптимальное управление электроприводом с учетом ограничений по нагреву. – Л.: Энергия, 1971. – 144с.
  10. Волков В. А. Оптимальное и квазиоптимальное энергосберегающее управление положением частотно-регулируемого асинхронного двигателя / В.А. Волков // Электротехника та електроенергетика. – 2016. – № 1. – С. 25–34. DOI: <http://dx.doi.org/10.15588/1607-6761-2016-1-4>
  11. Волков В. А. Оптимизация режимов намагничивания и размагничивания частотно-регулируемого асинхронного двигателя / В. А. Волков // Наукові праці Донецького національного технічного університету. – 2013. – № 2 (15). – С. 64–70.
  12. Кальницкий Л. А. Специальный курс высшей математики для вузов / Л. А. Кальницкий, Д.А. Добротин, В.Ф. Жевержев. – М.:Высш.шк., 1976. – 389 с.
  13. Корн Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров / Г. Корн, Т. Корн. – М.: Наука, 1974. – 832с.
  14. Тиховод С. М. Усовершенствование итерационных методов решения систем нелинейных уравнений состояния магнитоэлектрических схем замещения / С. М. Тиховод // Электротехника та електроенергетика. – 2015. – №1. – С. 46–49. DOI: <http://dx.doi.org/10.15588/1607-6761-2015-1-8>
  15. Метод ускоренного численного расчета переходных процессов в электрических цепях на основе аппроксимации решения алгебраическими полиномами / С. М. Тиховод, Т. М. Корнус, Д. Г. Паталах // Электротехника та електроенергетика. – 2015. – № 2. – С. 48–54. DOI: <http://dx.doi.org/10.15588/1607-6761-2015-2-7>

Статья поступила в редакцию 15.05.17

Волков В. О.

Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры гідроенергетики Запорізької державної інженерної академії, Запоріжжя, Україна, e-mail: [green\\_stone@ukr.net](mailto:green_stone@ukr.net)

#### ОПТИМІЗАЦІЯ ЧАСІВ РОЗГОНУ І ГАЛЬМУВАННЯ ПОЗИЦІЙНИХ ЧАСТОТНОРЕГУЛЬОВАНИХ АСИНХРОННИХ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ

**Мета роботи.** Отримання аналітичних залежностей для розрахунку оптимальних часів розгону і гальмування частотнорегульованого асинхронного двигуна, що забезпечують мінімізацію основних електромагнітних втрат енергії двигуна при малих переміщеннях його вала, а також – оцінка впливу заданих оптимальних часів розгону і гальмування на значення основних електромагнітних втрат енергії в частотнорегульованому асинхронному двигуні при різних видах тахограм двигуна (з лінійної і параболічної формами або формою гіперболічного синуса).

**Методи дослідження.** Методи оптимального управління і імітаційного моделювання.

**Отримані результати.** Отримано аналітичні залежності і запропонована графоаналітична методика для розрахунку оптимальних часів розгону і гальмування частотнорегульованого асинхронного двигуна, що забезпечують мінімізацію основних електромагнітних втрат енергії двигуна при малих переміщеннях його вала. Виконано оцінку впливу заданих оптимальних часів розгону і гальмування на значення основних електромагнітних втрат енергії в частотнорегульованому асинхронному двигуні при різних видах тахограм двигуна (з лінійної і параболічної формами або формою гіперболічного синуса).

**Наукова новизна.** Вперше отримано аналітичні залежності для розрахунку оптимальних часів розгону і гальмування при малих переміщеннях частотнорегульованого асинхронного двигуна, за допомогою яких забезпечується мінімізація електромагнітних втрат в двигуні. Вперше розроблено графоаналітична методика для визначення зазначених оптимальних часів розгону і гальмування частотнорегульованого асинхронного двигуна при відпрацюванні малих переміщень.

**Практична цінність.** Запропоновано підхід до енергозбереження в позиційних частотнорегульованих асинхронних електроприводах за допомогою оптимізації їх часів розгону і гальмування, що дозволяє на практиці без істотних капітальних витрат знизити втрати електроенергії в цих електроприводах.

**Ключові слова:** асинхронний двигун, частотне регулювання, позиціонування, оптимальне енергозберігаюче управління, графоаналітична методика.

Volkov V. A.

PhD., Associate Professor, Associate Professor of the hydropower department of Zaporozhye State Engineering Academy, Zaporozhye, Ukraine, e-mail: [green\\_stone@ukr.net](mailto:green_stone@ukr.net)

#### OPTIMIZATION OF TIMES OF RUNNING AND BRAKING OF POSITION FREQUENCY-REGULATED ASYNCHRONOUS ELECTRIC DRIVES

**Purpose.** Obtaining analytical dependencies for calculating the optimum speedup and speeddown times for a frequency-controlled asynchronous motor that minimize the main electromagnetic energy losses of the engine for small displacements

of its shaft, and also the estimation of the influence of these optimal speedup and speeddown times on the value of the main electromagnetic energy losses in the frequency-controlled asynchronous motor various types of engine tachograms (with linear and parabolic forms or hyperbolic sine form).

**Methodology.** Methods of optimal control and simulation modelling.

**Findings.** Analytical dependencies are obtained and a graphoanalytical method proposed for calculating the optimum speedup and speeddown times for the frequency-controlled asynchronous motor that minimizes the main electromagnetic energy losses of the motor with small displacements of its shaft. The effect of these optimal speedup and speeddown times on the value of the main electromagnetic energy losses in the frequency-controlled asynchronous motor under different types of motor tachograms (with linear and parabolic forms or the form of the hyperbolic sine) are estimated.

**Originality.** For the first time, analytical dependencies are obtained for calculating the optimal speedup and speeddown times for small displacements of the frequency-controlled asynchronous motor, by which the electromagnetic losses in the motor is minimized. For the first time, a graphoanalytical method developed to determine these optimum speedup and speeddown times for the frequency-controlled asynchronous motor when was working out small displacements.

**Practical value.** An approach to energy saving in positional frequency-controlled asynchronous electric drives is proposed, by optimizing their speedup and speeddown times, which allows in practice without significant capital costs to reduce power losses in these electric drives.

**Keywords:** asynchronous motor, frequency control, positioning, optimal energy-saving control, graphoanalytical technique.

## REFERENCES

- Shreyner, R. T., Dmitrenko, YU. A. (1982). Optimal'noye chastotnoye upravleniye asinkhronnymi elektroprivodami. Kishinev: Shtiintsa, 224.
- Polyakov, V. N. Shreyner, R. T. (2006). Ekstremal'noye upravleniye elektricheskimi dvigatelyami, Yekaterinburg: UGTU, UPI, 420 s.
- Sandler, A. S., Sarbatov, R. S. (1974). Avtomaticheskoye chastotnoye upravleniye asinkhronnymi dvigatelyami. Moscow, Energiya, 328.
- Kostenko, M. P. (1949). Elektricheskkiye mashiny. Spetsial'naya chast'. Sankt-Peterburg, Gosenergoizdat, 708.
- Pivnyak, G. G., Volkov, A. V. (2006). Sovremennyye chastotno-reguliruyemye asinkhronnyye elektroprivody s shirotno-impul'snoy modulyatsiyey. Dnepropetrovsk: Natsional'nyy gornyy universitet, 470.
- Volkov A. V., Kolesnikov A. A. (2013). Energoberegayushcheye upravleniye skorost'yu chastotno-reguliruyemogo asinkhronnogo dvigatelya v puskotormoznykh rezhimakh, *Elektrotekhnika*, 5, 2–9.
- Volkov, V. A. (2015). Raschet optimal'nykh takhogramm razgona i tormozheniya chastotno-reguliruyemogo asinkhronnogo dvigatelya, *Yeletrotexhnika ta yeletroyenergetika*, 2, 55–64. DOI: <http://dx.doi.org/10.15588/1607-6761-2015-2-8>
- Petrov, YU. P. (1961). Optimal'noye upravleniye elektroprivodom. Moscow, Sankt-Peterburg, Gosenergoizdat, 187.
- Petrov, YU. P. (1971). Optimal'noye upravleniye elektroprivodom s uchetom ogranicheniy po nagrevu. Sankt-Peterburg, Energiya, 144.
- Volkov, V. A. (2016). Optimal'noye i kvazioptimal'noye energoberegayushcheye upravleniye polozheniyem chastotnereguliruyemogo asinkhronnogo dvigatelya, *Yeletrotexhnika ta yeletroyenergetika*, 1, 25–34. DOI: <http://dx.doi.org/10.15588/1607-6761-2016-1-4>
- Volkov, V. A. (2013). Optimizatsiya rezhimov namagnichivaniya i razmagnichivaniya chastotnereguliruyemogo asinkhronnogo dvigatelya, *Naukovn pratsn Donets'kogo natsional'nogo tekhnichnogo univrsitetu*, 2 (15), 64–70.
- Kal'nitskiy, L. A., Dobrotin, D. A., Zheverzhev, V. F. Spetsial'nyy kurs vysshey matematiki dlya vuzov, Moscow, Vyssh. shk., 389.
- Korn, G., Korn, T. (1974). Spravochnik po matematike dlya nauchnykh rabotnikov i inzhenerov, Moscow, Nauka, 832.
- Tikhovod, S. M. (2015). Uovershenstvovaniye iteratsionnykh metodov resheniya sistem nelineynykh uravneniy sostoyaniya magnitoelektricheskikh skhem zameshcheniya, *Yeletrotexhnika ta yeletroyenergetika*, 1, 46–49. DOI: <http://dx.doi.org/10.15588/1607-6761-2015-1-8>
- Tikhovod, S. M., Kornus, T. M., Patalakh, D. G. (2015). Metod uskorennoogo chislennogo rascheta perekhodnykh protsessov v elektricheskikh tsepyakh na osnove approksimatsii resheniya algebraicheskimi polinomami, *Yeletrotexhnika ta yeletroyenergetika*, 2, 48–54. DOI: <http://dx.doi.org/10.15588/1607-6761-2015-2-7>