

ОПТИМИЗАЦИЯ ВРЕМЕН НАМАГНИЧИВАНИЯ И РАЗМАГНИЧИВАНИЯ ОСТАНОВЛЕННОГО ЧАСТОТНО- РЕГУЛИРУЕМОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

ВОЛКОВ В.А. канд. техн. наук, докторант НТУ «Днепровская политехника», г. Днепр, Украина, e-mail: green_stone@ukr.net

Цель работы. Получение аналитических зависимостей для расчета экстремальных (минимальных) значений основных электрических потерь энергии трехфазного короткозамкнутого асинхронного двигателя в режимах его намагничивания и размагничивания и определение соответствующих этим режимам оптимальных значений времен намагничивания и размагничивания.

Методы исследования. Математического анализа, теории подобия и имитационного компьютерного моделирования.

Полученные результаты. Получены аналитические зависимости для расчета основных электрических потерь мощности и энергии в режимах намагничивания и размагничивания остановленного короткозамкнутого частотно-регулируемого асинхронного двигателя применительно к различным видам (линейному, параболическому и в функции гиперболического синуса) траекторий изменения модуля потокосцепления ротора двигателя. Проведено исследование переходных электромагнитных и энергетических процессов этого двигателя в указанных режимах. Определены минимально возможные значения основных потерь энергии остановленного двигателя в режимах его намагничивания и размагничивания и соответствующие им оптимальные значения времен намагничивания и размагничивания при упомянутых разных видах траекторий изменения потокосцепления ротора двигателя.

Научная новизна. Состоит в получении аналитических расчетных зависимостей для определения оптимальных времен намагничивания и размагничивания остановленного частотно-регулируемого асинхронного двигателя, которые обеспечивают минимизацию его основных потерь энергии в режимах намагничивания и размагничивания.

Практическая ценность. Снижение непроизводительных потерь энергии для частотно-регулируемых асинхронных двигателей при режимах их намагничивания и размагничивания.

Ключевые слова: асинхронный двигатель; частотное регулирование; потери электрической энергии; оптимизация.

I. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в мире и Украине нашли широкое применение и продолжают внедряться во всех отраслях хозяйства короткозамкнутые частотно-регулируемые асинхронные двигатели (ЧРАД). Причем значительная часть из этих двигателей функционирует в повторно-кратковременных режимах с частыми пусками и торможениями (например, на крановых механизмах и лифтах, в насосных агрегатах канализационных станций, в тяговых приводах городского электротранспорта и др.).

В связи с наблюдающимся удорожанием электрической энергии представляется актуальной задача снижения потерь электроэнергии для указанных ЧРАД в режиме их намагничивания (служащем для создания требуемого значения рабочего магнитного потока в двигателе перед началом его разгона) и режиме размагничивания (предназначенном для уменьшения до нуля магнитного потока двигателя после снижения его скорости до нуля при продолжительной остановке).

II. АНАЛИЗ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Вопросам уменьшения непроизводительных потерь электроэнергии при режимах намагничивания и размагничивания остановленных частотно-регулируемых электрических машин переменного тока в известной научно-технической литературе посвящены публикации [1]–[3]. В частности, в статье [1] предложено и исследуется энергосберегающее управление частотно-регулируемым асинхронным двигателем с использованием ступенчато изменяемой формы намагничивающей составляющей статорного тока этого двигателя, а в публикации [2] – рассмотрена оптимизация траектории (в виде временной функции гиперболического синуса) изменения потокосцепления ротора при намагничивании и размагничивании, обеспечивающая минимизацию электрических потерь энергии данного двигателя в указанных режимах.

Публикация [3] посвящена оптимизации траектории изменения потокосцепления синхронной машины, содержащей обмотку возбуждения и снабженной демпферной обмоткой. Посредством предложенных в этой статье траекторий (в виде суммы двух экс-

поненциальных временных функций) изменения потокосцепления этой машины достигается минимизации общих электрических потерь в ней и тиристорном возбудителе при режимах намагничивания и размагничивания. В работе [3] также установлено, что существуют определенные (оптимальные) длительности времен намагничивания и размагничивания синхронной машины, при которых электрические потери энергии в ней минимальны.

В известных основополагающих монографиях, в которых оптимизируются потери мощности [4] либо исследуются переходные электромагнитные процессы [5] для различных видов электрических машин (синхронной и асинхронной) переменного тока или рассматривается энергосберегающее частотное управление этими электрическими машинами [6], [7] и электроприводами на их основе [8] - [10], к большому сожалению, вопросам оптимизации режимов намагничивания и размагничивания данных машин вообще не уделено внимания.

Таким образом, до настоящего времени в известной научно-технической литературе отсутствуют (несмотря на их практическую востребованность, исходя из потребностей энергосбережения) исследования относительно определения минимальных значений потерь энергии в режимах намагничивания и размагничивания ЧРАД и соответствующих им оптимальных значений времен намагничивания и размагничивания данного двигателя.

III. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью предложенной статьи являются получение аналитических зависимостей для расчета экстремальных (минимальных) значений основных электрических потерь энергии трехфазного короткозамкнутого асинхронного двигателя в режимах его намагничивания и размагничивания и определение соответствующих этим режимам оптимальных значений времен намагничивания и размагничивания двигателя.

IV. ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА И АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

При исследованиях были приняты следующие допущения:

- рассматривались только основные составляющие электрических потерь мощности и энергии короткозамкнутого ЧРАД, вызванные основными составляющими фазных статорных токов (то есть, не учитывалось влияние высших гармонических составляющих фазных статорных напряжений и токов двигателя, вызванных пульсациями напряжения на выходе статического преобразователя частоты, питающего статорные обмотки);

- при исследованиях внутренние параметры (активные сопротивления и индуктивности) схемы замещения ЧРАД принимались неизменными;

- полагается использование для ЧРАД векторно-

го способа управления, при котором осуществляется независимое (то есть, без воздействия на значение электромагнитного момента) регулирование модуля потокосцепления ротора двигателя [2],[10];

- полагается рекуперативное исполнение статического преобразователя частоты, при котором существует возможность возврата накопленной электромагнитной энергии двигателем через преобразователь частоты в питающую сеть;

- частота основной гармоники фазных статорных токов, активная составляющая обобщенного вектора статорного тока, скорость и электромагнитный момент рассматриваемого остановленного двигателя при исследуемых режимах его намагничивания и размагничивания полагались равными нулю;

- в расчетах и исследованиях применялись общепринятые для асинхронных машин условные обозначения их параметров и математическое описание этой машины в ортогональной координатной системе «х-у», связанной вещественной осью «х» с обобщенным вектором ее потокосцепления ротора [10];

- все расчетные зависимости для ЧРАД приводятся в общепринятой для машин переменного тока системе относительных единиц (о.е.) [11].

Исследования проводились на примере параметров тягового асинхронного электродвигателя АТМ225М4У2 (с номинальными: линейным действующим напряжением 450В, частотой 50 Гц, мощностью 55кВт и коэффициентом полезного действия 92%), характеризующегося: номинальным значением потокосцепления ротора $\Psi_{rn} = 0.8724$ о.е.; активным сопротивлением статора $R_s = 0.02506$ о.е. и приведенным (к статору) активным сопротивлением ротора $R_r = 0.01407$ о.е.; индуктивностью намагничивания $L_m = 2.2657$ о.е., индуктивностью рассеяния статора $L_{\sigma s} = 0.06866$ о.е. и приведенной (к статору) индуктивностью рассеяния ротора $L_{\sigma r} = 0.08239$ о.е.

С учетом принятых допущений и согласно [2], [10] приведем аналитические зависимости:

$$\left. \begin{aligned} i_l &= i_{lx} = \frac{1}{L_m} (\Psi_r + T_r \cdot \Psi_r'), \quad \Psi_r' = \frac{d\Psi_r}{dt} = e_r, \\ u_l &= (R_s + R_\delta) \cdot i_l + (L_{\sigma s} + k_r L_{\sigma r}) \cdot \frac{di_l}{dt} + k_r \cdot \Psi_r', \\ T_r &= L_m / k_r R_r, \quad k_r = L_m (L_m + L_{\sigma r}), \\ \Delta P_\vartheta &= (R_s + R_\delta) \cdot i_l^2 + \frac{(\Psi_r')^2}{R_r} = \\ &= \frac{(R_s + R_\delta)}{L_m} \cdot (\Psi_r + T_r \cdot \Psi_r')^2 + \frac{(\Psi_r')^2}{R_r}, \\ \Delta W_{нам} &= \int_0^{t_n} \Delta P_\vartheta \cdot dt, \quad \Delta W_{разм} = \int_0^{t_p} \Delta P_\vartheta \cdot dt \end{aligned} \right\} (1)$$

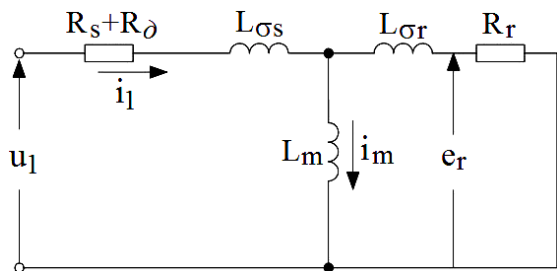


Рисунок 1. Эквивалентная схема замещения остановленного ЧРАД для режимов намагничивания и размагничивания

описывающие электромагнитные и энергетические процессы при намагничивании и размагничивании остановленного ЧРАД, а также представим на рис.1 эквивалентную схему замещения данного двигателя для рассматриваемых режимов.

В зависимостях из (1) и на рис.1 используются следующие обозначения: u_1 и i_1 – модули обобщенных векторов соответственно статорных напряжения и тока, создаваемых основными гармоническими составляющими фазных статорных напряжений и токов ЧРАД; i_{1x} и i_m – основные составляющие соответственно намагничивающей составляющей статорного тока и тока намагничивания двигателя; e_r – электродвижущая сила (ЭДС) ротора ЧРАД; $\Psi' = d\Psi_r / dt$ – производная от модуля потокосцепления ротор по времени; R_δ – эквивалентное активное сопротивление, учитывающее добавочные потери мощности двигателя ($R_\delta = 0.005P_n / \eta_n$, где P_n и η_n номинальные значения соответственно мощности и коэффициента полезного действия двигателя [10]; ΔP_3 – основные электрические потери мощности остановленного ЧРАД; $\Delta W_{нам}$ и $\Delta W_{разм}$ – основные электрические потери энергии ЧРАД соответственно в режимах его намагничивания и размагничивания; t_n и t_p – длительности времен режимов намагничивания и размагничивания соответственно; t – текущее время, отсчитываемое от начала и на протяжении рассматриваемого режима намагничивания или размагничивания ЧРАД: $0 \leq t \leq t_n$ и $0 \leq t \leq t_p$.

При этом в [2] с использованием уравнения Эйлера из теории вариационного исчисления [12] установлено, что наименьшие значения:

$$\Delta W_{нам}^o = \min \text{ и } \Delta W_{разм}^o = \min \quad (2)$$

основных электрических потерь энергии (ОЭПЭ) частотно-регулируемого асинхронного двигателя при режимах намагничивания и размагничивания обеспечиваются посредством траекторий изменения модуля потокосцепления ротора в виде временных функций гиперболического синуса

$$\left. \begin{aligned} \Psi_r &= \Psi_{rn} \cdot \frac{sh(t/T_3)}{sh(t_n/T_3)} - \text{при намагничивании,} \\ \Psi_r &= \Psi_{rn} \cdot \frac{sh[(t_p - t)/T_3]}{sh(t_p/T_3)} - \text{при размагничивании} \end{aligned} \right\} (3)$$

которые будем показывать далее «оптимальными».

В зависимостях из (3) эквивалентная постоянная времени T_3 ЧРАД для режимов намагничивания и размагничивания находится из соотношений [2]:

$$T_3 = \frac{T_r}{\lambda_R}, \text{ где } \lambda_R = \frac{l}{\sqrt{l + k_r^2 R_r / (R_s + R_\delta)}} \quad (4)$$

На первом этапе выполним исследование изменения ОЭПЭ $\Delta W_{нам}$ и $\Delta W_{разм}$ для остановленного ЧРАД при варьировании длительностей его времен намагничивания t_n и размагничивания t_p применительно к рассматриваемому двигателю АТМ 225М4У2 и оптимальному виду траекторий из (3) изменения его модуля Ψ_r потокосцепления ротора.

Для этого, подставив соотношения из (3) в окончательное выражения для потерь мощности ΔP_3 из (1), а затем полученные зависимости в последние два соотношения из (1), рассчитаем зависимости ОЭПЭ $\Delta W_{нам}$ и $\Delta W_{разм}$ для ЧРАД в режимах намагничивания и размагничивания при варьировании длительностей времен намагничивания t_n и размагничивания t_p , которые представлены в виде графических зависимостей на рис.2 (обозначенных при оптимальных видах траекторий цифровой «1»). Для сравнения там же показаны графические зависимости ОЭПЭ $\Delta W_{нам}$ и $\Delta W_{разм}$ рассматриваемого ЧРАД при линейном:

$$\left. \begin{aligned} \Psi_r &= \Psi_{rn} \cdot \left(\frac{t}{t_n}\right) - \text{при намагничивании,} \\ \Psi_r &= \Psi_{rn} \cdot \left(\frac{t_p - t}{t_p}\right) - \text{при размагничивании} \end{aligned} \right\} (5)$$

и параболическом:

$$\left. \begin{aligned} \Psi_r &= \Psi_{rn} \cdot \left(\frac{t}{t_n}\right)^2 - \text{при намагничивании,} \\ \Psi_r &= \Psi_{rn} \cdot \left(\frac{t_p - t}{t_p}\right)^2 - \text{при размагничивании} \end{aligned} \right\} (6)$$

видах траекторий изменения модуля потокосцепления ротора Ψ_r при исследуемых режимах (которые показаны на этом рисунке соответственно цифрами «2» и «3»). При этом в зависимостях из (3), (5) и (6), описывающих траектории изменения модуля потокосцепле-

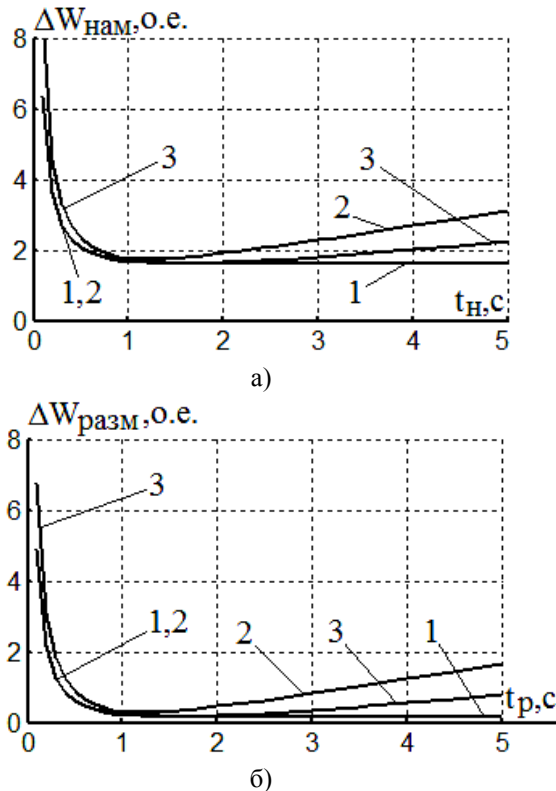


Рисунок 2. Зависимости ОЭПЭ для ЧРАД в режимах намагничивания (а) и размагничивания (б) при варьировании длительности времен намагничивания t_n и размагничивания t_p для оптимального 1, линейного 2 и параболического 3 видов изменения модуля Ψ_r потокосцепления ротора

ния ротора Ψ_r ЧРАД, текущее время t отсчитывается от начала и на протяжении рассматриваемого интервала намагничивания или размагничивания: $0 \leq t \leq t_n$ и $0 \leq t \leq t_p$.

Из анализа представленных на рис.2 графических зависимостей следует, что зависимости ОЭПЭ $\Delta W_{нам}$ и $\Delta W_{разм}$ от длительностей времен намагничивания t_n и размагничивания t_p имеют для всех видов рассматриваемых траекторий (оптимальной, линейной и параболической) изменения модуля потокосцепления ротора экстремальные (минимальные) значения $\Delta W_{нам}^o$ и $\Delta W_{разм}^o$, достигаемые при определенных (оптимальных) значениях времен намагничивания t_n^o и размагничивания t_p^o . Численные значения длительностей времен намагничивания t_n^o и размагничивания t_p^o применительно к параметрам двигателя АТМ 225М4У2 и оптимальному, линейному и параболическому виду траекторий изменения модуля потокосцепления ротора Ψ_r представлены в табл.1.

На *втором этапе* найдем аналитические расчетные зависимости для определения минимальных значений ОЭПЭ $\Delta W_{нам}^o$, $\Delta W_{разм}^o$ остановленного ЧРАД в режимах намагничивания и размагничивания и соответствующих им оптимальных длительностей времен намагничивания t_n^o и размагничивания t_p^o применительно для линейного вида траекторий изменения потокосцепления ротора двигателя.

Подставив зависимости из (5) в окончательное соотношение для потерь мощности ΔP_\varnothing из (1), получим расчетные зависимости для текущего значения основных электрических потерь мощности остановленного ЧРАД в режимах намагничивания:

$$\Delta P_\varnothing = \frac{(R_s + R_\delta)}{L_m^2} \cdot \left(\frac{\Psi_{rH}}{t_n} \right)^2 \cdot (t + T_r)^2 + \frac{1}{R_r} \cdot \left(\frac{\Psi_{rH}}{t_n} \right)^2 \quad (7)$$

и размагничивания

$$\Delta P_\varnothing = \frac{(R_s + R_\delta)}{L_m^2} \left(\frac{\Psi_{rH}}{t_p} \right)^2 \cdot (t_p - t - T_r)^2 + \frac{1}{R_r} \left(\frac{\Psi_{rH}}{t_p} \right)^2 \quad (8)$$

Далее, подставив зависимости (7) и (8) в два последних соотношения из (1), определим расчетные математические выражения для ОЭПЭ в ЧРАД при режимах намагничивания:

$$\Delta W_{нам} = \left(\frac{\Psi_{rH}}{L_m} \right)^2 \cdot (R_s + R_\delta) \cdot \left\{ \frac{t_n}{3} + T_r + \frac{1}{t_n} \cdot \left[T_r^2 + \frac{L_m^2}{(R_s + R_\delta) \cdot R_r} \right] \right\} \quad (9)$$

и размагничивания

$$\Delta W_{разм} = \left(\frac{\Psi_{rH}}{L_m} \right)^2 \cdot (R_s + R_\delta) \cdot \left\{ \frac{t_p}{3} - T_r + \frac{1}{t_p} \cdot \left[T_r^2 + \frac{L_m^2}{(R_s + R_\delta) \cdot R_r} \right] \right\} \quad (10)$$

Взяв производные по временам t_n и t_p от левых и правых частей выражений (9) и (10) и приравняв их нулю, получим уравнения:

$$\frac{d(\Delta W_{нам})}{d t_n} = \left(\frac{\Psi_{rH}}{L_m} \right)^2 \cdot (R_s + R_\delta) \cdot \left\{ \frac{1}{3} - \frac{1}{(t_n^o)^2} \left[T_r^2 + \frac{L_m^2}{(R_s + R_\delta) \cdot R_r} \right] \right\} = 0, \quad (11)$$

Таблица 1. Значения коэффициента χ , минимальных ООПЭ ΔW_n^o , ΔW_p^o и соответствующие им оптимальные времена намагничивания t_n^o и размагничивания t_p^o для двигателя АТМ 225М4У2

Номер траектории	χ	ΔW_n^o	ΔW_p^o	t_n^o, t_p^o
Един.измер.	о.е.	о.е.	о.е.	с
1	5,6206	1,5999	0,1472	3,59
2	$\sqrt{3}$	1,7351	0,2823	1,1
3	$\sqrt{20/3}$	1,6290	0,1762	1,6

$$\frac{d(\Delta W_{разм})}{dt_n} = \left(\frac{\Psi_{rH}}{L_m}\right)^2 \cdot (R_s + R_\delta) \cdot \left\{ \frac{1}{3} - \frac{1}{(t_p^o)^2} \left[T_r^2 + \frac{L_m^2}{(R_s + R_\delta) \cdot R_r} \right] \right\} = 0. \quad (12)$$

Решив второй степени алгебраические уравнения (11) и (12) относительно оптимальных длительностей времен намагничивания t_n^o и размагничивания t_p^o , получим для них общее решение в виде:

$$t_n^o = t_p^o = \sqrt{3} \cdot T_\vartheta = T_r \cdot \sqrt{\sqrt{3} \cdot \left(1 + \frac{T_s}{T_r}\right)} = T_r \cdot \sqrt{\sqrt{3} \cdot \left(1 + \frac{k_r^2 R_r}{R_s + R_\delta}\right)} = \frac{T_r}{\lambda_R} \cdot \sqrt{3}, \quad (13)$$

где

$$T_s = \frac{k_r L_m}{R_s + R_\delta}, \quad T_r = \frac{L_m^2}{R_s + R_\delta} \cdot \frac{1}{T_r^2} = \frac{k_r^2 R_r}{R_s + R_\delta}. \quad (14)$$

Определение минимальных значений $\Delta W_{нам}^o$, $\Delta W_{разм}^o$ ОЭПЭ для линейного вида траекторий изменения модуля потокосцепления ротора в режимах намагничивания и размагничивания ЧРАД осуществляется из выражений (9) и (10) после подстановки в них оптимальных значений времен соответственно намагничивания t_n^o и размагничивания t_p^o .

На *третьем этапе* определим аналитические расчетные зависимости для минимальных значений ОЭПЭ ΔW_n^o , ΔW_p^o остановленного ЧРАД при режимах намагничивания и размагничивания и соответствующих им оптимальных длительностей времен намагничивания t_n^o и размагничивания t_p^o примени-

тельно к параболического вида траекториям изменения модуля потокосцепления ротора двигателя.

После подстановки зависимости (6) в окончательное соотношение для потерь мощности ΔP_ϑ из (1) получим расчетные зависимости для текущего значения основных электрических потерь мощности остановленного ЧРАД в режимах намагничивания:

$$\Delta P_\vartheta = \frac{(R_s + R_\delta)}{L_m^2} \cdot \left(\frac{\Psi_{rH}}{t_n^2}\right)^2 \cdot (t^4 + 4T_r t^3 + 4T_r^2 t) + \frac{4t^2}{R_r} \cdot \left(\frac{\Psi_{rH}}{t_n^2}\right)^2 \quad (15)$$

и размагничивания:

$$\Delta P_\vartheta = \frac{(R_s + R_\delta)}{L_m^2} \cdot \left(\frac{\Psi_{rH}}{t_p^2}\right)^2 \cdot \left[(t_p - t)^4 - 2T_r \cdot t \cdot (t_p - t)^2 + 4t^2 \cdot T_r^2 \right] + \frac{4t^2}{R_r} \cdot \left(\frac{\Psi_{rH}}{t_p^2}\right)^2 \quad (16)$$

Затем, подставив зависимости (15) и (16) в последние два соотношения из (1), найдем расчетные математические выражения для ОЭПЭ в ЧРАД при режимах намагничивания:

$$\Delta W_{нам} = \left(\frac{\Psi_{rH}}{L_m}\right)^2 \cdot (R_s + R_\delta) \cdot \left\{ \frac{t_n}{5} + T_r + \frac{4}{3t_n} \left[T_r^2 + \frac{L_m^2}{(R_s + R_\delta) \cdot R_r} \right] \right\} \quad (17)$$

и размагничивания

$$\Delta W_{разм} = \left(\frac{\Psi_{rH}}{L_m}\right)^2 \cdot (R_s + R_\delta) \cdot \left\{ \frac{t_p}{5} - T_r + \frac{4}{3t_p} \left[T_r^2 + \frac{L_m^2}{(R_s + R_\delta) \cdot R_r} \right] \right\}. \quad (18)$$

После вычисления производных по времени t_n и t_p от левых и правых частей выражений (17) и (18) и приравнивания их нулю получим уравнения:

$$\frac{d(\Delta W_{нам})}{dt_n} = \left(\frac{\Psi_{rH}}{L_m}\right)^2 \cdot (R_s + R_\delta) \cdot \left\{ \frac{1}{5} - \frac{4}{3(t_n^o)^2} \left[T_r^2 + \frac{L_m^2}{(R_s + R_\delta) \cdot R_r} \right] \right\} = 0, \quad (19)$$

$$\frac{d(\Delta W_{разм})}{dt_H} = \left(\frac{\Psi_{rH}}{L_m}\right)^2 \cdot (R_s + R_\delta) \cdot \left\{ \frac{1}{5} - \frac{4}{3(t_p^o)^2} \left[T_r^2 + \frac{L_m^2}{(R_s + R_\delta) \cdot R_r} \right] \right\} - \frac{T_r}{T_\delta} \cdot ch\left(\frac{t_p - t}{T_\delta}\right) + \frac{\Psi_{rH}^2 \cdot ch^2\left[\frac{(t_p - t)}{T_\delta}\right]}{T_\delta^2 \cdot R_r \cdot sh^2(t_p/T_\delta)}. \quad (23)$$

Подставив зависимости (22) и (23) в два последних соотношения из (1), получим (исходя из табличных интегралов [13]):

$$\int sh^2 x \cdot dx = -\frac{x}{2} + \frac{1}{4} sh 2x + C;$$

$$\int ch^2 x \cdot dx = \frac{x}{2} + \frac{1}{4} sh 2x + C, \quad (24)$$

Решив второй степени алгебраические уравнения (19) и (20) относительно оптимальных длительностей времен намагничивания t_H^o и размагничивания t_p^o , получим для них общее решение:

$$t_H^o = t_p^o = \sqrt{\frac{20}{3}} \cdot T_\delta = T_r \sqrt{\frac{20}{3} \cdot \left(1 + \frac{T_s}{T_r}\right)} = T_r \sqrt{\frac{20}{3} \cdot \left(1 + \frac{k_r^2 R_r}{R_s + R_\delta}\right)} = \frac{T_r}{\lambda_R} \cdot \sqrt{\frac{20}{3}}. \quad (21)$$

Минимальные значения $\Delta W_{нам}^o$, $\Delta W_{разм}^o$ ОЭПЭ для параболического вида траекторий изменения модуля потокосцепления ротора в режимах намагничивания и размагничивания остановленного ЧРАД определяются из выражений (17) и (18) после подстановки в них оптимальных значений времен соответственно намагничивания t_H^o и размагничивания t_p^o .

На четвертом этапе найдем аналитические расчетные зависимости для минимальных значений ОЭПЭ ΔW_H^o , ΔW_p^o остановленного ЧРАД в режимах намагничивания и размагничивания и соответствующих им оптимальных длительностей намагничивания t_H^o и размагничивания t_p^o применительно к оптимальным согласно (3) траекториям изменения модуля потокосцепления ротора двигателя.

Для это подставим зависимости из (3) в окончательное соотношение для потерь мощности ΔP_δ из (1) и получим из него расчетные зависимости для определения текущего значения основных электрических потерь мощности остановленного ЧРАД в режимах намагничивания:

$$\Delta P_\delta = \left(\frac{\Psi_{rH}}{L_m}\right)^2 \cdot \frac{(R_s + R_\delta)}{sh^2(t_H/T_\delta)} \cdot \left[sh\left(\frac{t}{T_\delta}\right) + \frac{T_r}{T_\delta} \cdot ch\left(\frac{t}{T_\delta}\right) \right]^2 + \frac{\Psi_{rH}^2 \cdot ch^2(t/T_\delta)}{T_\delta^2 \cdot R_r \cdot sh^2(t_H/T_\delta)} \quad (22)$$

и размагничивания:

$$\Delta P_\delta = \left(\frac{\Psi_{rH}}{L_m}\right)^2 \cdot \frac{(R_s + R_\delta)}{sh^2(t_p/T_\delta)} \cdot \left[sh\left(\frac{t_p - t}{T_\delta}\right) - \right.$$

расчетные аналитические зависимости для ОЭПЭ в ЧРАД при режимах его намагничивания:

$$\Delta W_{нам} = \left(\frac{\Psi_{rH}}{L_m}\right)^2 \cdot \frac{(R_s + R_\delta)}{T_\delta \cdot sh^2(t_H/T_\delta)} \cdot \left\{ \frac{1}{4} sh\left(\frac{2t_H}{T_\delta}\right) - \frac{t_H}{2T_\delta} + \frac{2T_r}{T_\delta} \cdot sh^2\left(\frac{t_H}{T_\delta}\right) + \left[\left(\frac{T_r}{T_\delta}\right)^2 + \frac{L_m^2/T_\delta^2}{(R_s + R_\delta) \cdot R_r}\right] \times \left[\frac{1}{4} sh\left(\frac{2t_H}{T_\delta}\right) + \frac{t_H}{2T_\delta} \right] \right\} \quad (25)$$

и размагничивания:

$$\Delta W_{разм} = \left(\frac{\Psi_{rH}}{L_m}\right)^2 \cdot \frac{(R_s + R_\delta)}{T_\delta \cdot sh^2(t_p/T_\delta)} \cdot \left\{ \frac{1}{4} sh\left(\frac{2t_p}{T_\delta}\right) - \frac{t_p}{2T_\delta} - \frac{2T_r}{T_\delta} \cdot sh^2\left(\frac{t_p}{T_\delta}\right) + \left[\left(\frac{T_r}{T_\delta}\right)^2 + \frac{L_m^2/T_\delta^2}{(R_s + R_\delta) \cdot R_r}\right] \times \left[\frac{1}{4} sh\left(\frac{2t_p}{T_\delta}\right) + \frac{t_p}{2T_\delta} \right] \right\}. \quad (26)$$

Из анализа зависимостей (25) и (26) следует, что из-за громоздкости их выражений и наличия в числителе и знаменателе входящих в них дробей переменных t_H и t_p (в составе аргументов гиперболических функций), аналитическое дифференцирование зависимостей (25) и (26) затруднено. Определение же указанных производных численными методами решения (например, из [14], [15]) неудобно для последующего анализа и неприемлемо для получения аналитических зависимостей для определения оптимальных времен намагничивания и размагничивания ЧРАД.

Поэтому дальнейшее нахождение оптимальных времен намагничивания и размагничивания осуществим методом подобия [16]. Отмеченное подобие заключается в схожести между собой вида ранее полученных зависимостей (13) и (21) для определения оптимальных времен намагничивания t_H^o и размагничи-

вания t_p^o применительно к линейному и параболическому виду траекторий изменения модуля потокосцепления ротора ЧРАД, которые можно представить следующими общего вида зависимостями

$$t_n^o = t_p^o = \chi \cdot T_\varepsilon = \chi \cdot T_r \sqrt{1 + \frac{T_s}{T_r}} = \chi \cdot T_r \sqrt{1 + \frac{k_r^2 R_r}{R_s + R_o}} = T_r \cdot \frac{\chi}{\lambda_R}, \quad (27)$$

где коэффициент χ принимает дискретные значения, равные: $\sqrt{3}$ – для линейного вида или $\sqrt{20/3}$ – для параболического вида упомянутой траектории. Очевидно, выявленное подобие объясняется общими свойствами исследуемого объекта ЧРАД.

Исходя из указанного подобия будем полагать, что общий вид универсальной зависимости (27) сохранится также и для оптимальных траекторий (3) изменения модуля потокосцепления ротора двигателя, но только – с другими численными значениями коэффициента χ . Значение данного коэффициента χ определим из выражений (27) при подстановке в их левую часть ранее определенные (из рассчитанных и обозначенных цифрой «1» на рис.2 графических зависимостей ОЭПЭ двигателя) оптимальные значения времен t_n^o и t_p^o (соответствующие минимуму $\Delta W_{нам}^o$ и $\Delta W_{разм}^o$ этих потерь):

$$\chi = t_n^o / T_\varepsilon = t_p^o / T_\varepsilon. \quad (28)$$

Полученное значение коэффициента χ , соответствующее оптимальной траектории (3) изменения потокосцепления ротора двигателя, равно 5.62 (и остается неизменным для любого типа трехфазного ЧРАД).

Минимальные значения $\Delta W_{нам}^o$, $\Delta W_{разм}^o$ ОЭПЭ при оптимальных траекториях (3) изменения потокосцепления ротора в режимах намагничивания и размагничивания ЧРАД рассчитываются из зависимостей (25) и (26) после подстановки в них полученных значений времен t_n^o и t_p^o соответственно.

На *пятом этапе* приведем в табл.1 рассчитанные для двигателя АТМ 225М4У2 значения коэффициента χ , минимальных ОЭПЭ ΔW_n^o , ΔW_p^o и оптимальных времен намагничивания t_n^o и размагничивания t_p^o , соответствующих оптимальной, линейной и параболической траекториям изменения модуля потокосцепления ротора ЧРАД в этих режимах, а в табл.2 – вычисленные для асинхронных двигателей различной

мощности (в диапазоне от 5,5 до 2000 кВт) значения постоянных времен T_r и T_ε этих двигателей, а также их оптимальных времен намагничивания t_n^o и размагничивания t_p^o при оптимальных траекториях (3) изменения модуля потокосцепления ротора двигателя.

На *шестом этапе* из зависимостей: (1), (3), (5) и (6), (7) и (8), (15) и (16), (22) и (23) были рассчитаны и построены на рис.3 и рис.4 графики электромагнитных и энергетических переходных процессов для режимов намагничивания и размагничивания АТМ 225М4У2 применительно к оптимальному, линейному и параболическому виду траекторий изменения модуля потокосцепления ротора этого двигателя, соответствующие приведенным в табл.1 их оптимальным временам намагничивания t_n^o и размагничивания t_p^o . При этом на рис.3 для режимов намагничивания и размагничивания остановленного ЧРАД представлены графики изменения модуля потокосцепления ротора Ψ_r и текущих ОЭПЭ $\Delta W_{нам}$, $\Delta W_{разм}$ при варьировании времен намагничивания t_n и размагничивания t_p , а на рис.4 – графики модулей обобщенных векторов потокосцепления ротора Ψ_r , статорного тока i_l и напряжения u_l (образованных основными гармоническими составляющими фазных статорных напряжений и токов) двигателя, а также текущих электрических потерь мощности ΔP_3 и энергии $\Delta W_{нам}$, $\Delta W_{разм}$ в указанных режимах.

При этом на рис.4 дополнительно представлены

Таблица 2. Номинальные параметры (мощность P_n , статорное напряжение U_{In} , число пар полюсов p , электромагнитная постоянная ротора T_r и ее эквивалентное значение T_ε) двигателя и расчетные значения времен намагничивания t_n^o и размагничивания t_p^o для ЧРАД разной мощности

Тип электродвигателя	Значение параметров					
	P_n	U_{In}	p	T_r	T_ε	$t_{n,p}^o$
Един. измер.	кВт	В		с	с	с
4А132S6У3	5,5	380	3	0.156	0.192	1.079
АТМ225М4У2	55	450	2	0.531	0.639	3.592
АТ250L4У2	110	400	2	0.786	0.991	5.568
А03-315М4У3	250	660	2	0.931	1.192	6.702
А03-400М4У2	320	660	2	1.394	1.787	10.04
АДО-2000-6000-12У1	2000	6000	6	2.11	2.487	13.98

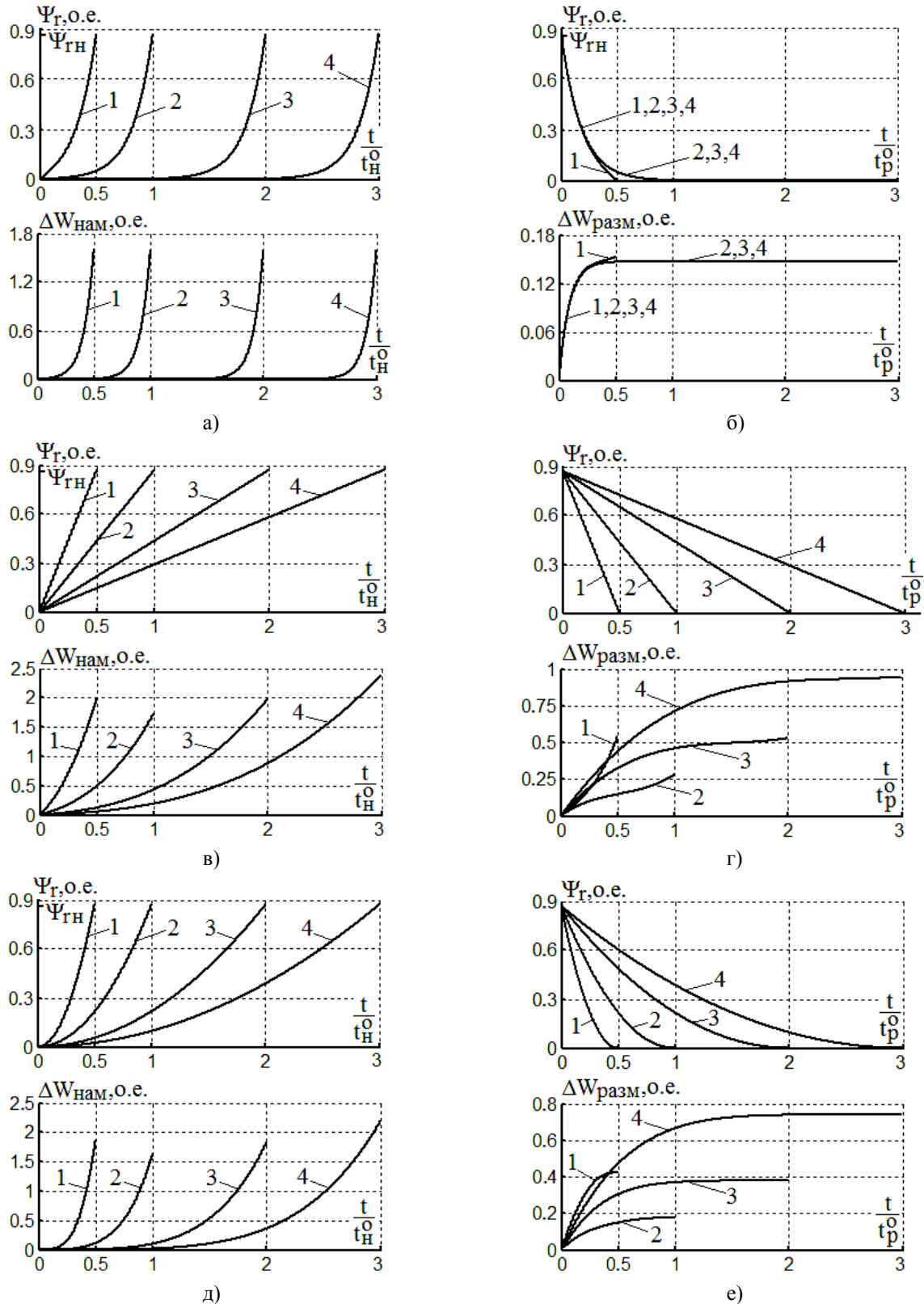


Рисунок 3. Изменения модуля потокосцепления ротора Ψ_r и соответствующие им текущие значения ОЭПЭ для двигателя АТМ225М4У2 при намагничивании (а, в, д) и размагничивании (б, г, е) для оптимальной (а, б), линейной (в, г) и параболической (д, е) траекторий изменения модуля потокосцепления ротора Ψ_r :

1 – для $t_{н,р}/t_{н,р}^o = 0.5$; 2 – для $t_{н,р}/t_{н,р}^o = 1$; 3 – для $t_{н,р}/t_{н,р}^o = 2$; 4 – для $t_{н,р}/t_{н,р}^o = 3$

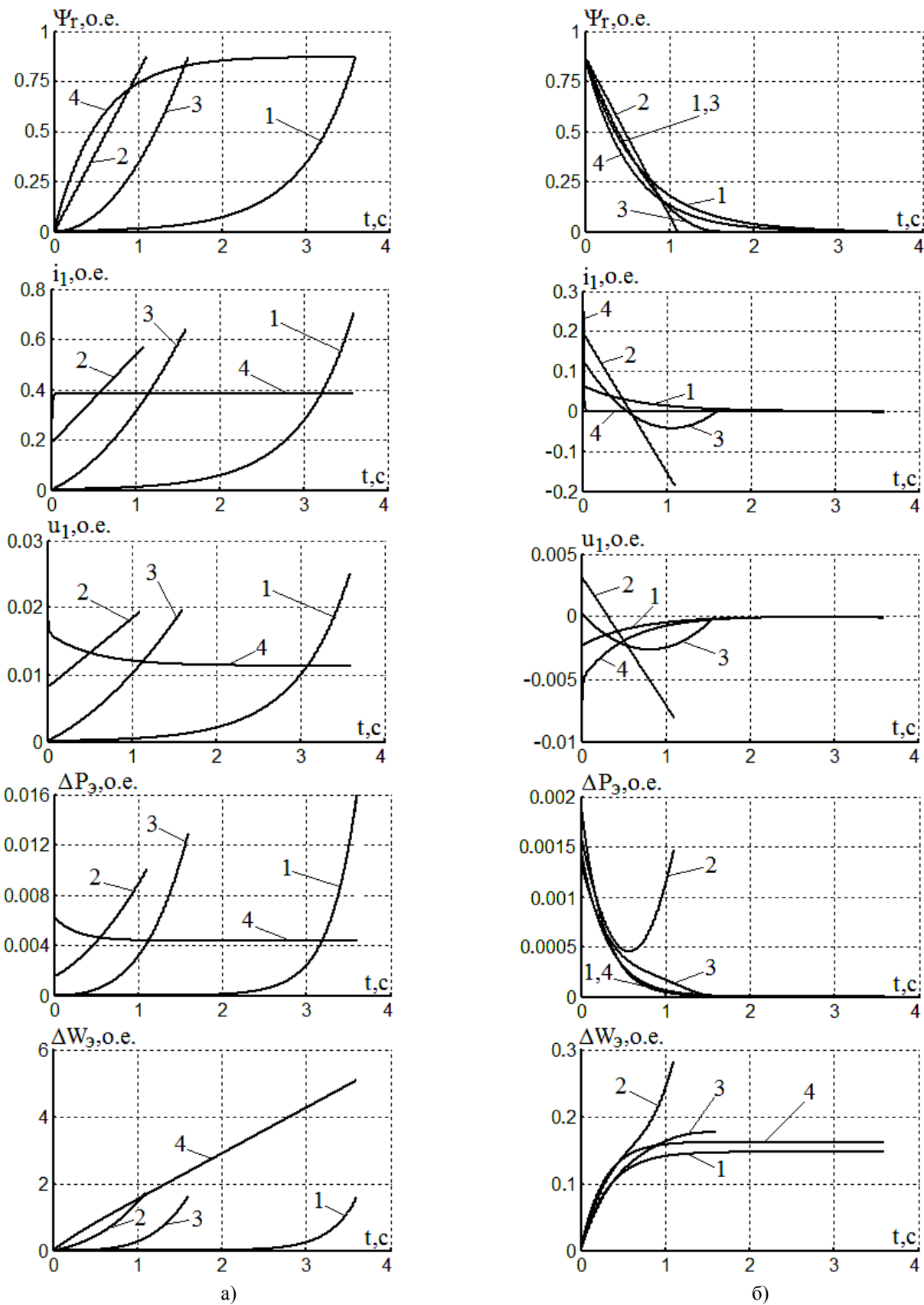


Рисунок 4. Электромагнитные и энергетические процессы двигателя ATM225M4U2, соответствующие оптимальным длительностям времен этих режимов, для: оптимального 1, линейного 2, параболического 3 вида траекторий изменения его модуля потокосцепления ротора и ступенчатой формы 4 изменения статорного тока

Таблиця 3. Базисні значення величин двигателя

Величина	I	U	Ψ_r	$P, \Delta P$	W	R_s, R_r	L	t
Размерность	А	В	Вб	кВт	Дж	Ом	мГн	с
Значение	126	367	1.17	69.52	221.3	2.913	9.27	$0.01/\pi$

рассчитанные (и обозначенные цифрой 4 на этом рисунке) графики переходных электромагнитных процессов рассматриваемого двигателя для режимов намагничивания и размагничивания применительно к формируемому автоматической системой подчиненного регулирования значениям намагничивающей составляющей i_l статорного тока ЧРАД в виде:

$$i_l = I_{I_{XH}} \cdot \left(1 - e^{-t/2T_\mu}\right) \quad \text{и} \quad i_l = I_{I_{XH}} \cdot e^{-t/2T_\mu}, \quad (29)$$

где $I_{I_{XH}} = \Psi_{rn} / L_m$ – номинальное значение намагничивающей составляющей статорного тока двигателя; T_μ – некомпенсируемая постоянная времени контура регулирования намагничивающей составляющей статорного тока, настроенного на технический оптимум (в расчетах принято: $T_\mu = 5$ мс) [10]. Приведем результаты расчета ООПЭ и времен намагничивания и размагничивания для траектории 4: $\Delta W_{нам} = 5.0825$ о.е., $\Delta W_{разм} = 0.1621$ о.е., $t_n = t_p = 3.6$ с.

Для перехода при количественной оценке электромагнитных и энергетических процессов из относительных к абсолютным значениям следует полученные в относительных единицах значения умножить на соответствующие базисные значения, представленные для рассматриваемого ЧРАД в табл.3.

На *седьмом этапе* оценим годовую экономию электрической энергии, достигаемую в режимах намагничивания и размагничивания, на примере тяговых частотно-регулируемых асинхронных двигателей АТМ225М4У2 (мощностью 55 кВт) трамвая.

Будем полагать, что при остановке трамвая (предназначенной для выхода из трамвая приехавших пассажиров и входа в него новых пассажиров) будет осуществляться: непосредственно после наступления остановки – режим размагничивания, а по окончании остановки (перед троганием трамвая) – режим намагничивания тяговых двигателей трамвая. В этом случае значение ОЭПЭ для одного тягового двигателя при одном цикле «размагничивание–намагничивание» составит (применительно к оптимальной траектории изменения модуля потокосцепления ротора и оптимальным временам $t_n = t_p = 3.59$ с его намагничивания и размагничивания) согласно табл.1: $\Delta W_1 = \Delta W_{разм}^o + \Delta W_{нам}^o = 0.1472 + 0.1599 = 1.7471$ о.е.

Если бы при размагничивании и намагничивании использовались наиболее часто применяемые на практике токовые траектории из (29), то ОЭПЭ данного двигателя за один цикл «размагничивание – намагни-

чивание» составили бы: $\Delta W_2 = \Delta W_{разм} + \Delta W_{нам} = 0.1621 + 5.0825 = 5.2646$ о.е.

При этом годовая экономия электроэнергии для одного трамвая (достигнутая за счет перехода на оптимальные траектории из (3) и оптимальные длительности времен размагничивания t_p^o и намагничивания

t_n^o согласно табл.1) рассчитываются в виде:

$$W_\Gamma = 365 \cdot 18 \cdot 12 \cdot n \cdot (\Delta W_2 - \Delta W_1) \cdot W_6 / 3600 = 365 \times \\ \times 18 \cdot 12 \cdot n \cdot (5.2646 - 1.7471) \cdot 0.2213 / 3600 \approx 136.4 \text{ кВтч,}$$

где 365 и 18 – соответственно количество рабочих дней трамвая в году и его рабочих часов в сутки; 12 и n – соответственно среднее количество остановок трамвая в час и количество тяговых двигателей в трамвае (для двухвагонного трамвая: $n = 8$); $W_6 = 0.2213$ кДж – базисное значение для энергии (согласно табл.3); 3600 – коэффициент, учитывающий перевод энергии из кДж в кВтч.

Если же полагать, что на протяжении длительности остановок трамвая продолжительно поддерживались неизменными и равными номинальному значению модули потокосцепления ротора его тяговых двигателей ($\Psi = \Psi_{rn}$), то годовая экономия энергии, достигнутая от перехода при остановках трамвая к упомянутым режимам размагничивания и намагничивания тяговых двигателей трамвая с оптимальными траекториями изменения потокосцепления, даст годовую экономию энергии в размере 3112кВтч, определенную из последней формулы при подстановке в нее значения потерь энергии ΔW_2 (вызванных протеканием номинального намагничивающего его тока $I_{I_{XH}}$ в статорных обмотка тягового ЧРАД при остановках), вычисленного в виде:

$$\Delta W_2 = (R_s + R_r) \cdot (\Psi_{rn} / L_m)^2 \cdot \tau_o = \\ = 0.02936 \cdot (0.385)^2 \cdot 18.84 \cdot 10^3 \approx 82.0 \text{ о.е.,}$$

где $\tau_o \approx 60$ с = $18.84 \cdot 10^3$ о.е. – средняя продолжительность времени остановки трамвая.

Для больших городов (областных центров), в которых обычно на городские маршруты ежедневно выходят более 100 двухвагонных трамваев, годовая экономия электроэнергии только от снижения производительных потерь энергии в остановленных тяговых двигателях при режимах их намагничивания и размагничивания с учетом вышеизложенного составит, очевидно, от 13.6 тыс. кВтч до 311 тыс. кВтч.

V. ВЫВОДЫ

1. Для всех рассмотренных видов (линейного, параболического и в функции гиперболического синуса) траекторий изменения модуля потокосцепления ротора ЧРАД при режимах намагничивания и размагничивания установлен (согласно рис. 2) «U» – образный вид зависимостей ОЭПЭ $\Delta W_{\text{нам}}$ и $\Delta W_{\text{разм}}$ этого двигателя от длительностей времен его намагничивания t_n и размагничивания t_p . При этом для любых заданных значений времен намагничивания и размагничивания наименьшие значения ОЭПЭ при- сущи всегда оптимальной траектории изменения модуля потокосцепления ротора в виде функции гиперболического синуса от времени.

2. Полученные аналитические зависимости (9), (10), (13), (17), (18), (21), (25), (26) и (27) позволяют рассчитать минимально возможные значения ОЭПЭ для ЧРАД в режимах намагничивания и размагничивания и соответствующие им оптимальные времена намагничивания и размагничивания при упомянутых различных видах траекторий изменения модуля потокосцепления ротора двигателя. При этом переход к оптимальным длительностям времен намагничивания t_n^o и размагничивания t_p^o при линейном, параболическом и в функции гиперболического синуса видах траекторий изменения модуля потокосцепления ротора Ψ_r двигателя обеспечивает (согласно рис. 2 и рис.4) уменьшение электрических потерь $\Delta W_{\text{нам}}$, $\Delta W_{\text{разм}}$ ЧРАД в этих режимах в 1.1 – 2 раза и более.

3. Установлено, что оптимальные длительности режимов намагничивания t_n^o и размагничивания t_p^o равны между собой ($t_n^o = t_p^o$), а их значение согласно (27) прямо пропорционально: коэффициенту χ (характеризующему собой вид изменения траектории модуля потокосцепления ротора двигателя), значению электромагнитной постоянной времени ротора T_r и корню квадратному, взятому от суммы единицы и частного от деления приведенного (к статору) активного сопротивления ротора ($k_r^2 R_r$) к суммарному активному сопротивлению ($R_s + R_d$) статорной цепи двигателя в схеме его замещения на рис. 1.

4. Из анализа переходных электромагнитных и энергетических процессов ЧРАД в режимах намагничивания и размагничивания при оптимальных длительностях этих режимов (показанных на рис.4 графиками 1, 2 и 3) следует, что все эти процессы могут быть реализованы на практике, так как их текущие значения находятся в допустимых для них рабочих диапазонах значений.

5. На примере тяговых двигателей типа АТМ225М4У2 установлено, что переход от ступенча-

той формы токовой траектории (29) к оптимальной траектории (3) изменения модуля потокосцепления ротора позволяет согласно рис. 4 уменьшить суммарные ООПЭ в режимах намагничивания и размагничивания этих двигателей примерно в 2 раза. Выявлено, что за счет осуществления размагничивания тяговых ЧРАД трамвая в течение его остановленного состояния достигается годовая экономия электроэнергии в размере 3111 кВтч на один двухвагонный трамвай.

6. Полученные расчетные аналитические зависимости и исследования, направленные на уменьшение непроизводительных потерь энергии в режимах намагничивания и размагничивания ЧРАД, рекомендуются для использования проектантами (при разработке новых) и службам эксплуатации (при обслуживании существующих) частотно-регулируемых асинхронных электроприводов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Толочко, О.И. Управление процессами намагничивания и размагничивания асинхронного двигателя в системах векторного управления / О.И. Толочко, П.И. Розкаряка, Г.С. Чекавский, А.К. Кужель // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – 2011. – Вип. 3 (15). – С.79 – 82.
- [2] Волков, В.А. Оптимизация режимов намагничивания и размагничивания частотно-регулируемого асинхронного двигателя / Волков В.А. // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Сер. «Електротехніка і енергетика». – 2013. – Вип. 2 (15). – С.64 – 70.
- [3] Волков, В.А. Оптимизация намагничивания и размагничивания остановленной трехфазной синхронной машины / Волков В.А. // Електротехніка та електроенергетика. – 2018. – № 1. – С. 52 – 63. DOI: 10.15588/1607-6761-2018-1-6
- [4] Поляков, В.Н. Экстремальное управление электрическими двигателями / В.Н. Поляков, Р.Т. Шрейнер. – Екатеринбург: УГТУ – УПИ, 2006. – 420с.
- [5] Ковач, К.П. Переходные процессы в машинах переменного тока / К.П. Ковач, И. Рац. – М.: Госэнергоиздат, 1963. – 744с.
- [6] Leonhard, W. Control of Electrical Drives / W. Leonhard. – Berlin, 1996. – 420 p. DOI: 10.1007/978-3-642-97646-9
- [7] Bose, B.K. Modern power electronics and AC drives / B.K. Bose. – NJ: Prentice Hall RTR, 2002. – 711p.
- [8] Сандлер, А.С. Автоматическое частотное управление асинхронными двигателями / А.С. Сандлер, Р.С. Сарбатов. – М.: Энергия, 1974. – 328с.
- [9] Эпштейн, И.И. Автоматизированный электропривод переменного тока / И.И. Эпштейн. – М. – Энергоиздат, 1982. – 192с.
- [10] Пивняк, Г.Г. Современные частотно-регулируемые асинхронные электроприводы с широтно-

- импульсной модуляцией / Г.Г. Пивняк, А.В. Волков.– Днепропетровск: НГУ, 2006.– 470с.
- [11] Шрейнер, Р.Т. Оптимальное частотное управление асинхронными электроприводами / Шрейнер Р.Т., Дмитренко Ю.А. – Кишинев: Штиинца, 1982. – 224с.
- [12] Андреева, Е.А. Вариационное исчисление и методы оптимизации / Е.А. Андреева, В.М. Цирулева. – М.: Высш.шк., 2006. – 584с.
- [13] Выгодский, М.Я. Справочник по высшей математике / М.Я. Выгодский. – М.: Наука, 1976. – 872.
- [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](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] Веников, В.А. Теория подобия и моделирования / В.А. Веников. – М.: Высш. шк., 1976. – 479с.

Стаття надійшла до редакції 20.11.2018

ОПТИМІЗАЦІЯ ЧАСІВ НАМАГНІЧУВАННЯ І РОЗМАГНІЧУВАННЯ ЗУПИНЕНОГО ЧАСТОТНО-РЕГУЛЬОВАНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГУНА

ВОЛКОВ В.О.

канд. техн. наук, докторант НТУ «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна,
e-mail: green_stone@ukr.net

Мета роботи. Отримання аналітичних залежностей для розрахунку екстремальних (мінімальних) значень основних електричних втрат енергії трифазного короткозамкненого асинхронного двигуна в режимах його намагнічування і розмагнічування та визначення відповідних цим режимам оптимальних значень часів намагнічування і розмагнічування.

Методи дослідження. Математичного аналізу, теорії подібності та імітаційного комп'ютерного моделювання.

Отримані результати. Отримано аналітичні залежності для розрахунку основних електричних втрат потужності і енергії в режимах намагнічування і розмагнічування зупиненого короткозамкненого частотно-регульованого асинхронного двигуна стосовно до різних видів (лінійного, параболічного і в функції гіперболічного синуса) траєкторій зміни модуля потокозчеплення ротора двигуна. Проведене дослідження перехідних електромагнітних і енергетичних процесів цього двигуна в зазначених режимах. Визначено мінімально можливі значення основних втрат енергії зупиненого двигуна в режимах його намагнічування і розмагнічування та відповідних їм оптимальних значень часів намагнічування і розмагнічування при заданих різних видах траєкторій зміни потокозчеплення ротора двигуна.

Наукова новизна. Полягає в отриманні аналітичних розрахункових залежностей для визначення оптимальних часів намагнічування і розмагнічування зупиненого частотно-регульованого асинхронного двигуна, які забезпечують мінімізацію його основних втрат енергії в режимах намагнічування і розмагнічування.

Практична цінність. Зниження непродуктивних втрат енергії для частотно-регульованих асинхронних двигунів при режимах їх намагнічування і розмагнічування.

Ключові слова: асинхронний двигун; частотне регулювання; втрати електричної енергії; оптимізація.

OPTIMIZATION OF TIMES OF MAGNETIZATION AND DEMAGNETIZATION OF A STOPPED FREQUENCY-REGULATED ASYNCHRONOUS MOTOR

VOLKOV V.A.

PhD., Associate Professor, Doctoral Candidate of NTU Dnipro Polytechnic, Dnipro,
Ukraine, e-mail: green_stone@ukr.net

Purpose. Obtaining analytical dependencies for calculating the extreme (minimum) values of the main electrical energy losses of a three-phase short-circuited asynchronous engine in the regimes of its magnetization and demagnetization and determining the optimal values of the magnetization and demagnetization times corresponding to these regimes.

Methodology. *Mathematical analysis, the theory of similarity and imitational computer modeling.*

Findings. *Analytical dependences are obtained for calculating the main electric power and energy losses in the magnetization and demagnetization regimes of a stopped short-circuited frequency-controlled asynchronous motor with reference to various types (linear, parabolic and in hyperbolic sinus functions) of the rotor flux modulus of the motor. The study of transient electromagnetic and energy processes of this engine in the specified regimes. The minimum possible values of the main energy losses of a stopped engine in the regimes of its magnetization and demagnetization and the corresponding optimal values of the times of magnetization and demagnetization are determined for the different types of trajectories of change in the engine-linking rotor of the motor.*

Originality. *It consists in obtaining analytical calculation dependences for determining the optimal magnetization times and demagnetization of the stopped frequency-controlled asynchronous motor, which ensure the minimization of its main energy losses in the magnetization and demagnetization regimes.*

Practical value. *Reduction of unproductive energy losses for frequency-controlled asynchronous motor with their magnetization and demagnetization regimes.*

Keywords: *asynchronous motor; frequency regulation; electric power loss; optimization.*

REFERENCES

- [1] Tolochko, O.I., Rozkaryak, P.I., Chekavsky, G.S., Kuzhel, A.K. (2011). Upravlenie processami pravleniya namagnichivaniya I razmagnichivaniya asinhronnogo dvigatelya v sistemah vektornogo upravleniya [Control of magnetization and demagnetization processes of an asynchronous motor in vector control systems]. *Elektromekhanichny i energoizberigayuchi sistem*, 3, 15, 79 - 82. (in Ukraine.)
- [2] Volkov, V.A. (2013). Optimizaciya regimov namagnichivaniya I razmagnichivaniya chastotno-reguliruemogo asinhronnogo dvigatelya [Optimization of magnetization and demagnetization modes of variable frequency asynchronous motor]. *Electrical engineering and power engineering*, 2, 15, 64 - 70. (in Ukraine.)
- [3] Volkov, V.A. (2018). Optimizaciya namagnichivaniya i razmagnichivaniya ostanovlennoy trehfaznoy sinhronnoy mashini [Optimization of magnetization and expansion of a stopped three-phase synchronous machine]. *Electrical engineering and power engineering*, 1, 52 - 63. (in Ukraine) DOI: 10.15588 / 1607-6761-2018-1-6
- [4] Polyakov, V.N., Schreiner, R.T. (2006). Extremalnoe upravlenie elektricheskimi dvigatelyami. Ekaterinburg: USTU-UPI, 420.
- [5] Kovach, K.P. (1963). Perekhodnie processy v mashinah peremennogo toka. Moscow: Gosenergoizdat, 744.
- [6] Leonhard, W. (1996). Control of Electrical Drives. Berlin, 420. DOI: 10.1007/978-3-642-97646-9
- [7] Bose, B.K. (2002) Modern power electronics and AC. NJ: Prentice Hall RTR, 711.
- [8] Sandler, A.S., Sarbatov, R.S. (1974). Avtomaticheskoe chastotnoe upravlenie asinhronnimi dvigatelyami. Moscow: Energiya, 328.
- [9] Epshteyn, I.I. (1982). Avtomatizirovannyi electroprivod peremennogo toka. Moscow: Energoizdat, 192.
- [10] Pivnyak, G.G., Volkov, A.V. (2006). Sovremennoe chastotno-reguliruemie asinhronnie electroprivodi s shirotno-impulsnoy modulyaciyei. Dnepropetrovsk: NSU, 470.
- [11] Schreiner, R.T., Dmitrenko, Yu.A. (1982). Optimalnoe chastotnoe upravlenie asinhronnimi electroprivodami. Chisinau: Shtiintsa, 224.
- [12] Andreeva, E.A., Tsiruleva, V.M. (2006). Variacionnoe ischislenie i metodi optimizacii. Moscow: Higher., 584.
- [13] Vygodsky, M.Ya. (1976). Spravochnik po vishey matematike. Moscow: Science, 872.
- [14] Tikhovod, S.M. (2015). Usovershenstvovanie iteracionnih metodov reheniya system nelineynih uravneniy sostoyaniya magnitoelectricheskikh shem zameheniya [Improvement of iterative methods for solving systems of nonlinear equations of the state of magnetolectric replacement schemes]. *Electrical engineering and power engineering*, 1, 30 - 46. (in Ukraine) DOI: [http://dx.doi.org/10.15588 / 1607-6761-2015-1-8](http://dx.doi.org/10.15588/1607-6761-2015-1-8)
- [15] Tikhovod, S.M., Kornus, T.M., Patalah, D.G. (2015). Metod uskoreniya chislennogo rascheta perekhodnih processov v electrichestkikh cepyah na osnove aproksimacii resheniya algebraicheskimi polinomami [The method of accelerated numerical calculation of transients in electrical circuits based on approximation of the solution by algebraic polynomials]. *Electrical engineering and power engineering*, 2, 48 - 54. (in Ukraine) DOI: <http://dx.doi.org/10.15588/1607-6761-2015-2-7>
- [16] Venikov, V.A. (1976). Teoriya podobiya i modelirovanie. Moscow: Higher. shk., 479.