

УДК 621.311

**В.А. ВОЛКОВ** (канд. техн. наук)  
Запорозька державна інженерна академія  
[green\\_stone@ukr.net](mailto:green_stone@ukr.net)

## ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ НАМАГНИЧИВАНИЯ И РАЗМАГНИЧИВАНИЯ ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

*В статье предложена оптимизация режимов намагничивания и размагничивания частотно-регулируемого асинхронного двигателя, с помощью которой достигается уменьшение потерь энергии в этих режимах. Данная оптимизация выполнена методом вариационного исчисления. Проведено сравнение предложенного оптимального управления с известными способами управления намагничиванием и размагничиванием частотно-регулируемым асинхронным двигателем.*

**Ключевые слова:** оптимизация, частотно-регулируемый асинхронный двигатель, потери энергии, намагничивание, размагничивание.

С учетом происходящего удорожания электроэнергии актуально и востребовано практикой уменьшение ее непроизводительных потерь в автоматизированных электроприводах, в том числе – в частотно-регулируемых асинхронных электроприводах, нашедших широкое применение в последние годы во всех отраслях хозяйства [1, 2]. Такой важной задачей является снижение потерь энергии при намагничивании и размагничивании остановленного частотно-регулируемого асинхронного двигателя (ЧРАД). Этому вопросу в известной литературе, к сожалению, уделено мало внимания. Лишь в работе [3] выполнено исследование энергосберегающего управления намагничиванием и размагничиванием ЧРАД для ступенчато изменяемой формы намагничивающей составляющей статорного тока. До настоящего времени оптимизация (минимизация) указанных потерь энергии, достигаемая за счет выбора рациональной формы изменения модуля потокосцепления ротора при намагничивании и размагничивании, в отечественной и зарубежной научно-технической литературе не проводилась. При этом на практике для большинства современных отечественных и зарубежных ЧРАД с векторным управлением при остановленном двигателе в его статорные обмотки подается постоянный ток, равный номинальному току намагничивания, благодаря которому поддерживается номинальное значение потокосцепления ротора двигателя в этом режиме [2]. Это приводит, в свою очередь, при продолжительных или частых остановках к дополнительным непроизводительным потерям энергии (в виде электрических потерь в статорных обмотках двигателя).

Целью предложенной статьи является оптимизация (минимизация) электрических потерь энергии частотно-регулируемого асинхронного двигателя в режимах его: начального намагничивания постоянным током, продолжительного нахождения в остановленном состоянии и последующего полного размагничивания.

При проводимых исследованиях приняты следующие допущения:

- общепринятое идеализированное представление короткозамкнутого асинхронного двигателя [4, 5];
- предполагается использование для ЧРАД векторного способа управления, при котором осуществляется независимое регулирование модуля потокосцепления ротора двигателя [5, 6];
- пренебрегли инерционностью (запаздыванием) контура регулирования намагничивающей составляющей статорного тока (характеризующегося на практике при векторном управлении высоким быстродействием – с малой (некомпенсируемой) постоянной времени менее 1 – 3 мс) [5];
- предполагается рекуперативное исполнение частотно-регулируемого асинхронного электропривода, при котором существует возможность возврата накопленной двигателем электромагнитной энергии через преобразователь частоты в питающую сеть;
- рассматривались только основные составляющие электрических потерь мощности и энергии в двигателе, вызванные основными составляющими его статорных токов [5, 7] (то есть не учитывались модуляционные составляющие в статорных токах, возникающие из-за дискретного характера работы силовых ключей преобразователя частоты);
- внутренние параметры (активные сопротивления и индуктивности) схемы замещения асинхронного двигателя принимались неизменными;
- 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 двигателя полагались равными нулю.

Во всех далее приводимых аналитических зависимостях и выполненных расчетах использовалась общепринятая для машин переменного тока система относительных единиц (о.е.), подробно рассмотренная в [2, 5].

С учетом принятых допущений запишем зависимость для текущего значения модуля  $\Psi_r$  обобщенного вектора потокосцепления ротора остановленного ЧРАД [5]:

$$L_m I_{1x} = \Psi_r + T_r \cdot \Psi_r', \quad (1)$$

в которой выполняются соотношения

$$I_{1x} = I_1 \text{ и } T_r = L_m / kR_r, \quad (2)$$

где  $I_{1x}$  и  $I_1$  – соответственно намагничивающая составляющая и модуль обобщенного вектора статорного тока;  $L_m$  и  $T_r$  – индуктивность намагничивания и электромагнитная постоянная времени ротора двигателя соответственно;  $R_r$  и  $k$  – активное сопротивление ротора и коэффициент связи ротора соответственно;  $\Psi_r' = d\Psi_r / dt$  – производная модуля потокосцепления ротора двигателя по времени (численно равная модулю  $E_r$  обобщенного вектора ЭДС ротора двигателя:  $E_r = \Psi_r'$  [5, 6]).

Используя представленную в [5] эквивалентную схему замещения остановленного идеализированного ЧРАД, преобразуем ее (при условии возможного перехода для остановленного двигателя от коллинеарных обобщенных векторов к модулям соответствующих обобщенных векторов: статорных напряжения  $U_1$  и тока  $I_1$ , тока намагничивания  $I_m$  и роторного тока  $I_r$ ) к схеме, показанной на рис.1, которая соответствует режимам намагничивания и размагничивания остановленного ЧРАД, где  $R_s$  – активное сопротивление статора,  $L_{\sigma s}$  и  $L_{\sigma r}$  – индуктивности рассеяния соответственно статора и ротора двигателя.

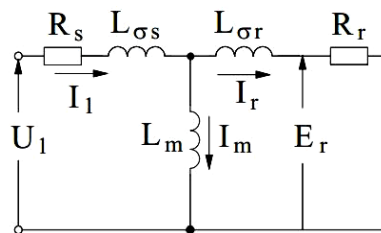


Рисунок 1 – Эквивалентная схема замещения остановленного ЧРАД для режимов намагничивания и размагничивания

Исходя из анализа схемы замещения на рис.1 и рассмотренной в [8] модели потерь мощности ЧРАД, принимая во внимание исходные допущения и применяемые в зависимостях (1) и (2) обозначения, запишем аналитическую зависимость для основных электрических потерь мощности  $\Delta P_э$  остановленного ЧРАД:

$$\Delta P_э = (R_s + R_д) I_1^2 + E_r^2 / R_r = (R_s + R_д) I_{1x}^2 + (\Psi_r')^2 / R_r, \quad (3)$$

где  $R_д = 0,005 P_n / \eta_n$  – активное сопротивление, учитывающее добавочные потери в двигателе [9];  $P_n$  и  $\eta_n$  – номинальные (паспортные) значения соответственно полезной мощности на валу и коэффициента полезного действия двигателя.

Определив из (1) намагничивающую составляющую  $I_{1x}$  обобщенного вектора статорного тока и подставив ее в (3), преобразуем зависимость (3) для электрических потерь мощности  $\Delta P_э$  к следующему виду:

$$\Delta P_э = (R_s + R_д) \cdot [\Psi_r / L_m + \Psi_r' / kR_r]^2 + (\Psi_r')^2 / R_r. \quad (4)$$

Затем, взяв определенные интегралы по времени от указанных потерь мощности  $\Delta P_э$ , определим для ЧРАД электрические потери энергии  $\Delta W_{нам}$  и  $\Delta W_{разм}$  в режимах соответственно намагничивания (т.е. при нарастании модуля  $\Psi_r$  потокосцепления ротора за время  $t_{нам}$  от нуля до его номинального значения  $\Psi_{rn}$ ) или полного размагничивания (т.е. при спадании модуля  $\Psi_r$  потокосцепления ротора за время  $t_{разм}$  от его номинального значения  $\Psi_{rn}$  до нуля) двигателя:

$$\Delta W_{нам} = \int_0^{t_{нам}} \Delta P_э \cdot dt \quad \text{и} \quad \Delta W_{разм} = \int_0^{t_{разм}} \Delta P_э \cdot dt. \quad (5)$$

Согласно теории вариационного исчисления оптимизация (минимизация) потерь энергии при намагничивании и размагничивании ЧРАД:

$$\Delta W_{нам} = \Delta W_{нам}^{onm} = \min \quad \text{и} \quad \Delta W_{разм} = \Delta W_{разм}^{onm} = \min \quad (6)$$

осуществляется при временных зависимостях изменения модуля  $\Psi_r$  в этих режимах, отвечающих уравнению Эйлера [10]:

$$\frac{\partial^2(\Delta P_3)}{\partial^2 \Psi_r'} \Psi_r'' + \frac{\partial^2(\Delta P_3)}{\partial \Psi_r' \cdot \partial \Psi_r'} \Psi_r' + \frac{\partial^2(\Delta P_3)}{\partial \Psi_r' \cdot \partial t} - \frac{\partial(\Delta P_3)}{\partial \Psi_r} = 0, \quad (7)$$

где  $\Psi_r'' = d^2 \Psi_r / dt^2$  – вторая производная по времени от модуля потокосцепления ротора.

После подстановки функции  $\Delta P_3$  из (4) в уравнение Эйлера получим дифференциальное уравнение вида:

$$\Psi_r'' = \Psi_r / T_3^2, \quad (8)$$

в котором эквивалентная постоянная времени  $T_3$  находится из соотношений:

$$T_3 = \lambda T_r \quad \text{и} \quad \lambda = \frac{1}{\sqrt{1 + k^2 R_r / (R_s + R_\delta)}} < 1, \quad (9)$$

где коэффициент связи ротора  $k$  вычисляется из формулы [5]:

$$k = L_m / (L_m + L_{\sigma r}). \quad (10)$$

Общим решением уравнения (8) является зависимость [10]:

$$\Psi_r = C_1 e^{t/T_3} + C_2 e^{-t/T_3}, \quad (11)$$

обеспечивающая минимизацию электрических потерь энергии согласно (7).

Подставив в (11) начальные и конечные условия:  $\Psi_r(0) = 0$  и  $\Psi_r(t_{\text{нам}}) = \Psi_{rн}$  – для режима намагничивания или  $\Psi_r(0) = \Psi_{rн}$  и  $\Psi_r(t_{\text{разм}}) = 0$  – для режима размагничивания двигателя, – получим решения дифференциального уравнения (8) для упомянутых режимов намагничивания:

$$\Psi_r = \Psi_{rн} \left[ \frac{e^{t/T_3} - e^{-t/T_3}}{e^{t_{\text{нам}}/T_3} - e^{-t_{\text{нам}}/T_3}} \right] = \Psi_{rн} \left[ \frac{\text{sh}(t/T_3)}{\text{sh}(t_{\text{нам}}/T_3)} \right] \quad (12)$$

или размагничивания:

$$\Psi_r = \Psi_{rн} \left[ \frac{e^{(t_{\text{разм}}-t)/T_3} - e^{-(t_{\text{разм}}-t)/T_3}}{e^{t_{\text{разм}}/T_3} - e^{-t_{\text{разм}}/T_3}} \right] = \Psi_{rн} \left[ \frac{\text{sh}((t_{\text{разм}}-t)/T_3)}{\text{sh}(t_{\text{разм}}/T_3)} \right], \quad (13)$$

где  $\text{sh}$  – математическая функция гиперболического синуса [10];  $t$  – текущее время, отсчитываемое от начала процессов намагничивания или размагничивания двигателя.

После подстановки соотношений из (12) и (13) в формулу (4), а затем полученных соотношений – соответственно в первое и второе уравнения из выражения (5), определим расчетные зависимости для потерь электроэнергии  $\Delta W_{\text{нам}}$  и  $\Delta W_{\text{разм}}$  в режиме намагничивания и размагничивания ЧРАД, соответствующие рассмотренному изменению модуля потокосцепления ротора  $\Psi_r$  по гиперболическому синусу (назовем это вариантом 1 управления).

Из анализа рассмотренных (при варьировании значений отношения времен  $t_{\text{нам}}/T_3$  или  $t_{\text{разм}}/T_3$  применительно к параметрам короткозамкнутого асинхронного электродвигателя 4A132S6Y3 мощностью 5,5 кВт и напряжением 380 В) для указанного управления потерь электроэнергии  $\Delta W_{\text{нам}}$  и  $\Delta W_{\text{разм}}$  следует, что все они имеют «V»-образный вид и явно выраженный экстремум, при котором достигается минимум упомянутых потерь электроэнергии. Базовые величины параметров исследуемого электродвигателя 4A132S6Y3 приведены в табл. 1 [5].

Таблица 1 – Базовые величины параметров двигателя 4A132S6Y3, используемые для системы относительных единиц

Наименования параметра	Базовая величина	
	значение	размерность
Статорный ток	14,7	А
Потокосцепление ротора	0,991	Вб
Активное сопротивление (статора и ротора)	21,15	Ом
Индуктивность (намагничивания, рассеяния статора и ротора)	67,4	мГн
Электромагнитная постоянная времени, текущее время	3,185	мс
Мощность, потери мощности	6,864	кВт
Потери энергии	21,86	Дж

По результатам этих исследований определим оптимальные значения времен намагничивания  $t_{нам.1}^{onm}$  и размагничивания  $t_{разм.1}^{onm}$ :

$$t_{нам.1}^{onm} = t_{разм.1}^{onm} = 250 \text{ о.е.}, \quad (14)$$

при которых достигаются минимальные значения потерь электроэнергии  $\Delta W_{нам.1}^{onm}$  и  $\Delta W_{разм.1}^{onm}$  при намагничивании и размагничивании ЧРАД для варианта 1 управления, показанные в табл.2.

Для сравнения рассмотрим другие возможные и известные способы управления потокосцеплением ротора при намагничивании и размагничивании остановленного ЧРАД:

а) вариант 2 – с линейными графиками изменения модуля  $\Psi_r$  потокосцепления ротора при намагничивании и размагничивании соответственно:

$$\Psi_r = \Psi_{rn} \cdot \left(\frac{t}{t_{нам}}\right) \quad \text{или} \quad \Psi_r = \Psi_{rn} \cdot \left(\frac{t_{разм} - t}{t_{разм}}\right); \quad (15)$$

Таблица 2 – Значения потерь энергии при режимах намагничивания и размагничивания двигателя для различных вариантов управления

Вид управления	Потери энергии, о.е.	
	- при намагничивании	- при размагничивании
1	1,8421	0,2646
2	1,9081	0,3307
3	2,2766	–
4	3,3530	–
5	–	0,2650

б) варианты 3 и 4 – при намагничивании, характеризующиеся заданием неизменного значения намагничивающей составляющей  $I_{1x} = const$  статорного тока, которое превышает ее номинальное значение  $I_{хн}$  или равно ему соответственно:

$$I_{1x} = \xi I_{хн}, \quad \xi > 1 \quad \text{или} \quad I_{1x} = I_{хн}, \quad (16)$$

где

$$\xi = |I_{1x}| / I_{хн} \quad (17)$$

кратность тока намагничивания (по отношению к его номинальному значению);

$$I_{хн} = \Psi_{rn} / L_m \quad (18)$$

номинальное значение намагничивающей составляющей статорного тока ЧРАД (присутствующее в установившемся режиме и создающее номинальное потокосцепление ротора  $\Psi_r = \Psi_{rn}$  двигателя).

в) вариант 5 – при размагничивании, характеризующийся заданием нулевого значения намагничивающей составляющей  $I_{1x} = const$  статорного тока:  $I_{1x} = 0$ .

При варьировании для управления 2 значений времен намагничивания и размагничивания определены их оптимальные значения:

$$t_{нам.2}^{onm} = t_{разм.2}^{onm} = 105 \text{ о.е.}, \quad (19)$$

соответствующие оптимальным (минимальным) потерям электроэнергии  $\Delta W_{нам.2}^{onm}$  и  $\Delta W_{разм.2}^{onm}$  для этого варианта управления, которые представлены в табл.2

После подстановки значений из (16) в уравнение (1) и решения этого уравнения операторным методом [10] относительно модуля  $\Psi_r$  потокосцепления ротора получим с учетом (17) и (18) зависимости для изменения модуля  $\Psi_r$  в режиме намагничивания двигателя согласно варианту 3 управления:

$$\Psi_r = \xi \Psi_{rn} (1 - e^{-t/T_r}) \quad \text{и} \quad 0 \leq t \leq t_{нам.3} = T_r \cdot \ln[\xi / (\xi - 1)] \quad (20)$$

или в соответствии с вариантом 4 управления:

$$\Psi_r = \Psi_{rn} (1 - e^{-t/T_r}) \quad \text{и} \quad 0 \leq t \leq t_{нам.4} \approx 4T_r. \quad (21)$$

Затем, подставив значения из (16) в (3) и взяв определенный интеграл от полученной зависимости (3) на интервале времени (0;  $t_{нам}$ ), найдем для вариантов 3 и 4 управления потери электроэнергии  $\Delta W_{нам.3}$  и  $\Delta W_{нам.4}$  соответственно. При варьировании коэффициента  $\xi$  определим оптимальные значения указанного коэффициента  $\xi_3^{onm} = 1,31$  о.е. и соответствующего ему времени намагничивания  $t_{нам.3}^{onm} = 70,6$  о.е., а также

соответствующее им оптимальное (минимальное) значение  $\Delta W_{\text{нам.3}}^{\text{онт}}$  потерь электроэнергии для варианта 3 управления намагничиванием ЧРАД, которое приведено в табл.2.

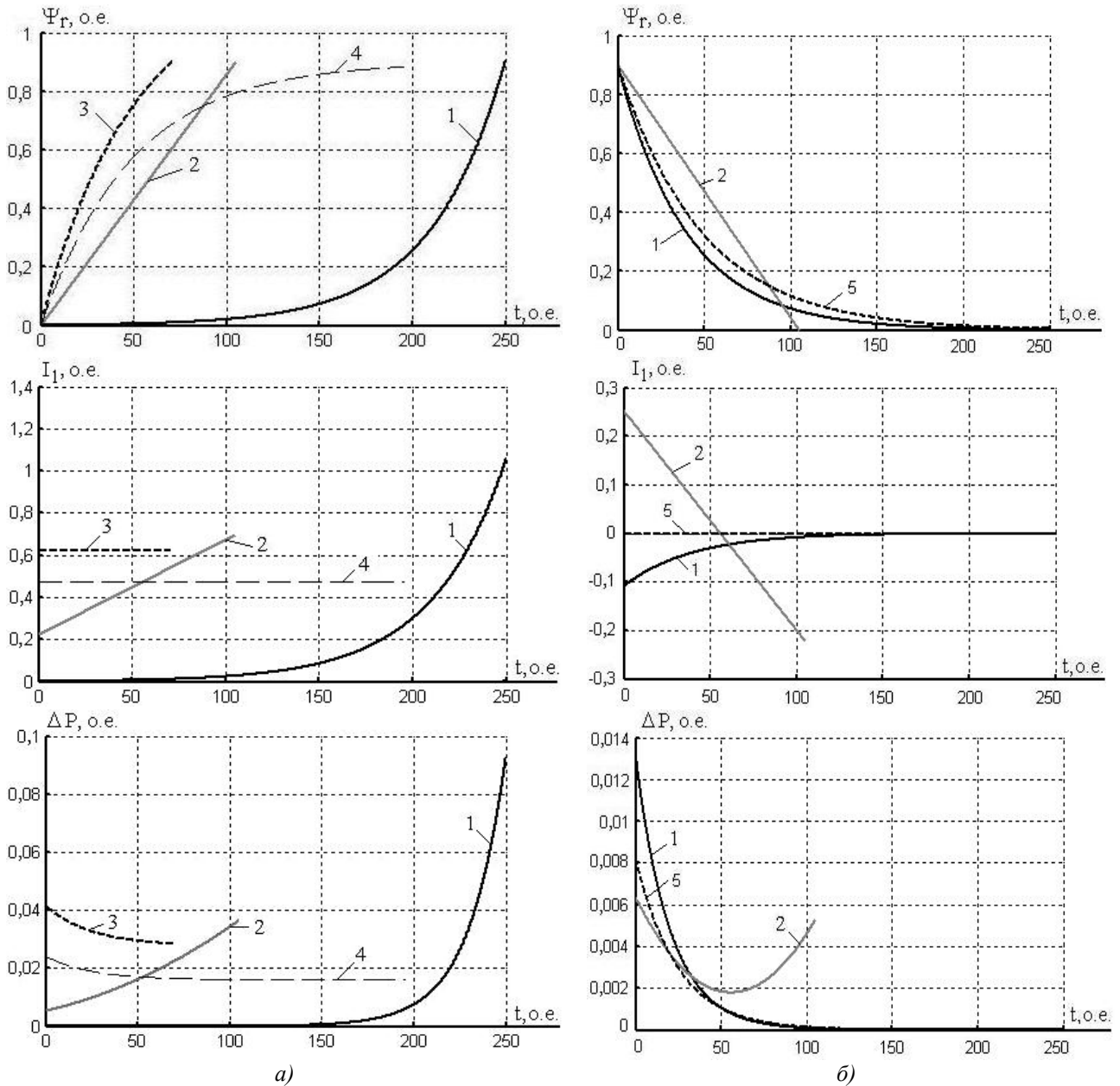


Рисунок 2 – Расчетные значения модулей обобщенных векторов потокосцепления ротора  $\Psi_r$  и статорного тока  $I_1$ , потерь мощности  $\Delta P$  двигателя для режимов его намагничивания (а) и размагничивания (б), где 1, 2, 3, 4, 5 – номера вариантов управления

Для рассмотрения режима размагничивания ЧРАД, осуществляемого по варианту 5 управления, подставим значения  $I_{1x} = 0$  в уравнение (1). Решим это уравнение операторным методом [10] относительно модуля  $\Psi_r$  потокосцепления ротора и получим для этого варианта управления размагничиванием следующую зависимость:

$$\Psi_r = \Psi_{rн} e^{-t/T_r}, \quad 0 \leq t \leq t_{\text{разм.6}} \approx 4T_r. \quad (22)$$

Подставив из формулы (22) в зависимость (3) и затем взяв с учетом этого определенный интеграл из (4) на интервале времени  $(0; t_{\text{разм.6}})$ , определим для варианта 5 управления потери электроэнергии  $\Delta W_{\text{разм.5}}$  при размагничивании, значение которых показано в табл.2.

Рассчитанные для рассмотренных вариантов 1 – 5 управления процессы изменения модулей обобщенных векторов потокосцепления ротора  $\Psi_r$  и статорного тока  $I_1$ , потерь мощности  $\Delta P$  двигателя при режимах намагничивания и размагничивания приведены на рис.2.

Полученные результаты исследований также позволяют оценить целесообразность осуществления полного размагничивания ЧРАД при его длительной остановке. Очевидно, это экономически выгодно, если выполняются следующие условия применительно к вариантам 1 и 2 управления:

$$\Delta W_{нам.1} + \Delta W_{разм.1} < (R_s + R_d) \cdot I_{1н}^2 \cdot t_n, \quad (23)$$

$$\Delta W_{нам.2} + \Delta W_{разм.2} < (R_s + R_d) \cdot I_{1н}^2 \cdot t_n, \quad (24)$$

где  $t_n$  – длительность временной паузы технологической остановки ЧРАД; правая часть неравенств (23) и (24) характеризует собой потери энергии в остановленном ЧРАД при установившемся режиме с номинальным намагничиванием ( $\Psi_r = \Psi_{рн} = const$ ).

С учетом зависимостей (23) и (24) целесообразно применение полного размагничивания двигателя при его остановке лишь с длительностью временной паузы, соответствующей условиям:

$$t_n > \begin{cases} (\Delta W_{нам.1} + \Delta W_{разм.1}) / (R_s + R_d) \cdot I_{1н}^2 & \text{– для управления 1;} \\ (\Delta W_{нам.2} + \Delta W_{разм.2}) / (R_s + R_d) \cdot I_{1н}^2 & \text{– для управления 2.} \end{cases} \quad (25)$$

Применительно к параметрам исследуемого асинхронного двигателя 4А132S6У3 значение  $t_n$  составляет: 131 о.е. = 0,417 с – для управления 1 или 139 о.е. = 0,443 с – для управления 2. Все представленные в статье результаты расчетов выполнены для следующих параметров двигателя 4А132S6У3:  $\Psi_{рн} = 0,9$ ;  $I_{хн} = 0,4737$ ;  $R_s = 0,067$ ;  $R_r = 0,041$ ;  $R_d = 0,0047$ ;  $L_m = 1,9$ ;  $L_{\sigma s} = 0,072$ ;  $L_{\sigma r} = 0,11$ ;  $T_r = 49$ ;  $k = 0,9453$  (приводимых в относительных единицах) [5].

**Выводы.** 1. Как показали проведенные исследования, использование предложенных вариантов 1 и 2 оптимального управления (характеризующихся согласно (12) и (13) или (15) изменением модуля  $\Psi_r$  обобщенного вектора потокосцепления ротора в функции гиперболического синуса или по линейному закону) позволяет уменьшить потери электроэнергии в ЧРАД при его намагничивании примерно до 2 раз (по сравнению с наиболее распространенным на практике ступенчатым заданием номинального значения тока намагничивания). Применение этих законов управления при размагничивании не дает снижения потерь энергии по сравнению со ступенчатым сбросом до нуля тока намагничивания двигателя.

2. Предложенные варианты 1 и 2 оптимального управления намагничиванием и размагничиванием ЧРАД на практике относительно просто технически реализуются – путем формирования входного сигнала задания для регулятора потокосцепления (в системе автоматического регулирования электроприводом) соответственно в виде гиперболического синуса или линейно изменяющегося сигнала. При этом необходимо обратить внимание на то, что при всех рассмотренных оптимальных законах управления 1, 2 и 3 значения статорных токов при намагничивании и размагничивании не превышают двукратного значения от номинального тока двигателя (что на практике допускается для двигателя и питающего его преобразователя частоты).

3. Наиболее предпочтительной областью применения предложенного оптимального управления являются частотно-регулируемые асинхронные электроприводы, работающие в частых повторно-кратковременных режимах (например, прессы, ряд приводов подачи для металлорежущих станков и др.).

4. Если в указанных электроприводах с повторно-кратковременными режимами работы длительность времени остановленного состояния двигателя превышает значение, рассчитанное из (25), выгодно для уменьшения потерь энергии в ЧРАД полностью размагнитить двигатель во время его остановленного состояния, а перед очередным пуском – заново намагнитить. Если же длительность времени в остановленном состоянии этих электроприводов не превышает значения из (25), то необходимо для остановленного ЧРАД поддерживать номинальное значение модуля потокосцепления ротора ( $\Psi_r = \Psi_{рн} = const$ ).

5. При значительном удалении ЧРАД от преобразователя частоты требуется в состав активного сопротивления дополнительно ввести активное сопротивление кабеля, соединяющего двигатель с преобразователем частоты.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Петров Ю.П. Оптимальное управление электроприводом / Ю.П. Петров. – М.–Л.:Госэнергоиздат, 1961. – 188 с.
2. Шрейнер Р.Т. Оптимальное частотное управление асинхронным электроприводом / Р.Т. Шрейнер, Ю.А. Дмитренко. – Кишинев: Штиинца, 1982. – 224 с.
3. 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. Щоквартальний науково-виробничий журнал. – Кременчук: КрНУ, 2011. – Вип. 3/2011 (15). С. 79-82.

4. Ковач К.П. Переходные процессы в машинах переменного тока / К.П. Ковач, И. Рац. – Пер. с нем. яз. – М. – Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 744 с.

5. Пивняк Г.Г. Современные частотно-регулируемые электроприводы с широтно-импульсной модуляцией / Г.Г. Пивняк, А.В. Волков. – Днепропетровск: НГУ, 2006. – 470 с.

6. Башарин А.В., Новиков В.А., Соколовский Г.Г. Управление электроприводами. – Л.: Энергоиздат, 1992. – 392 с.

7. Поляков В.Н. Экстремальное управление электрическими двигателями / В.Н. Поляков, Р.Т. Шрейнер. – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2006. – 420 с.

8. Волков А.В. Потери мощности асинхронного двигателя в частотно-управляемых электроприводах с широтно-импульсной модуляцией / А.В. Волков // Электротехника. – 2002. – № 8. – С. 2 – 9.

9. Радин В.И. Электрические машины. Асинхронные машины / В.И. Радин, Д.Э. Брускин, А.Е. Зорохович. – М.: Высш. шк., 1988. – 328.

10. Корн Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров / Г. Корн, Т. Корн. – М.: Наука, 1984. – 832 с.

#### REFERENCES

1. Petrov Yu.P. *Optimalnoe upravlenie electroprivodom* [Optimal control of electric drive]. - Leningrad: Gosenergoizdat, 1961. – 188 p.

2. R.T. Schreiner, Y. Dmytrenko. *Optimalnoe chastotnoe upravlenie asinhronnym electroprivodom* [Optimal frequency control of asynchronous electric drive] – Chisinau: Shtiintsa, 1982. 224 p.

3. Tolochko O.I. Management of the processes of magnetization and demagnetization induction motor in vector control systems / O.I. Tolochko, P.I. Rozkaryaka, G.S. Chekavskyy, A.K. Kuzhel // Elektromehanichni energozberigayuchi system. Schokvartalny Naukovo-virobnichy zhurnal. - Kremenchuk: KrNU, 2011. – V. 3/2011 (15). PP. 79-82.

4. K.P. Kovacs, J. Rat. *Perehodnye procesy v mashinah peremennogo toka* [Transients in AC machines] - Moscow - Leningrad: Gosenergoizdat, 1963. 744 p.

5. G.G. Pivnyak, A.V. Volkov. *Sovremennye chastotno-reguliruemye electroprivody s shirotno-impulsnoy modulyatsiyey* [Modern variable-frequency electric drives with PWM]. - Dnipropetrovsk: NGU, 2006. 470 p.

6. Basharin A.V., Novikov V.A., Sokolovsky G.G. *Upravlenie electroprivodami* [Control of electrical drives]. - L. Energoizdat, 1992. 392 p.

7. V.N. Polyakov, R.T. Schreiner. *Extremalnoye upravlenie elektricheskimi dvigatelyami* [Extremal control electric motors] - Yekaterinburg: Ural State Technical University, 2006. 420 p.

8. Volkov A.V. Power loss in the induction motor frequency-controlled drives of PWM. *Electrical Engineering*. - 2002. - № 8. – PP. 2 - 9.

9. V.I. Radin, D.E. Bruskin, A.E. Zorohovich. *Elektricheskie mashiny. Asinhronnye mashini* [Electrical Machines. Induction Machines] - Moscow: Vysshaya shkola, 1988. 328 p.

10. G. Korn, T. Korn. *Spravochnik po matematike dlya nauchnykh rabotnikov I ingenerov* [Handbook on Maths for Scientists and Engineers]. Moscow: Nauka, 1984. 832p.

Надійшла до редакції 11.03.2013

Рецензент: О.І. Толочко

В. О. ВОЛКОВ

Запорізька державна інженерна академія

**Оптимізація режимів намагнічування й розмагнічування частотно-регульованого асинхронного двигуна.** У статті запропонована оптимізація режимів намагнічування й розмагнічування частотно-регульованого асинхронного двигуна, за допомогою якої досягається зменшення втрат енергії в цих режимах. Дана оптимізація виконана методом варіаційного числення. Проведено порівняння запропонованого оптимального управління з відомими способами управління намагнічування і розмагнічування частотно-регульованим асинхронним двигуном.

**Ключові слова:** оптимізація, частотно-регульований асинхронний двигун, втрати енергії, намагнічування, розмагнічування.

V.A. VOLKOV

Zaporozhye State Engineering Academy

**Optimization of Magnetization and Demagnetization of Variable Frequency Induction Motor.** On the basis of the developed scheme for a stopped state variable-frequency induction motor is made up mathematical models of power loss and power of the engine in the magnetization and demagnetization modes. Variational methods used to optimize power losses in

these modes with respect to the vector control method of this engine. The optimal form of the module changes the rotor flux linkage in these modes and calculated values for this form of minimum energy loss of an induction motor in magnetization and demagnetization. For comparison, calculations of energy losses during magnetization and demagnetization of the variable-frequency induction motor with other forms of change in the modulus of the rotor flux linkage: linear and exponential. Analytical dependences for calculation of energy losses in these forms of change in the modulus of the rotor flux. The optimization time of magnetization and demagnetization of the engine minimizes the energy loss of frequency-controlled induction motor in these modes in certain forms of change in the modulus of the rotor flux linkage in the modes of magnetization and demagnetization. Calculated instantaneous power loss modulus of the generalized vector of the stator current and the modulus of the generalized vector of the rotor flux linkage for the best and well-known modes of magnetization and demagnetization stopped variable-frequency induction motor. Performed the comparison of energy losses during magnetization and demagnetization of the motor for optimum and well-known forms of change in the modulus of the rotor flux. Found that by using the optimal shape changes (the corresponding dependence of the hyperbolic sine of the time) provided a reduction of power losses during the magnetization of 1.2 - 1.8 times. Evaluated the feasibility demagnetization stopped induction motor for intermittent duty, depending on the duration of the stopped condition at the optimal form of change of flux linkage of the motor unit. The most preferred field of application of the proposed optimal control are variable frequency AC drives operating in frequent intermittent operation (for example, the press, a number of feed drives for machine tools, etc.).

**Keywords:** *optimization, variable-frequency induction motor, the energy losses of magnetization demagnetization.*