

ЕНЕРГЕТИЧНО ЕФЕКТИВНІ РЕЖИМИ РОБОТИ РЕГУЛЬОВАНОГО АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА

Проведено аналіз способів регулювання швидкісних режимів асинхронного короткозамкнутого електропривода з метою покращення його енергетичних характеристик. Показано, що втрати в електродвигуні можна зменшити шляхом регулювання потокозчеплення ротора за розробленим алгоритмом.

Умовні позначення

ККД – коефіцієнт корисної дії електродвигуна;

\vec{I}_1 – вектор струму статора;

$\vec{\psi}_2$ – вектор потокозчеплення ротора;

ω_2 – абсолютне ковзання;

i_q, i_d, ψ_d, ψ_q – компоненти векторів струму статора і потокозчеплення ротора в системі координат, зв'язаної з полем статора;

L_2, L_m – індуктивність ротора і взаємна індуктивність електродвигуна, Гн;

M – електромеханічний момент електродвигуна, Н·м;

R_1, R_2 – активні опори обмоток статора і ротора, Ом;

U_1, f^* – напруга і частота мережі живлення; у в.о.;

U_a, U_b – проекції вектора напруги статора в системі нерухомих координат;

ψ_2, ψ_1 – задане значення потокозчеплення відповідно ротора і статора, Вб;

ω_0 – частота напруги живлення, рад·с⁻¹;

p_n – число пар полюсів електродвигуна;

p_m – втрати в міді електродвигуна, Вт;

$f_{ж}$ – модуляційна частота живлення;

p_c – втрати в сталі електродвигуна, Вт;

μ_c, μ_H – відносні значення моменту статичного та номінального навантаження;

I_ϕ – фазний струм електродвигуна, А;

l_1, l_2 – відносне значення індуктивностей розсіювання обмоток статора і ротора.

Керування швидкістю асинхронного електродвигуна проводиться зміною частоти і величини напруги живлення. Енергетичні процеси можна вважати оптимальними, якщо значення втрат у всіх режимах роботи електродвигуна не буде перевищувати номінальні паспортні дані. Частота напруги живлення значною мірою пов'язана зі швидкістю обертання електродвигуна і тому повністю визначається завданням на цю швидкість. При зміні швидкості електродвигуна і моменту навантаження для підтримання оптимального енергетичного режиму необхідно забезпечити спеціальне регулювання напруги живлення.

Існують різні способи реалізації оптимальних енергетичних режимів. У [1] пропонується частотно-регульований електропривід, у якому стабілізується кут між струмом і напругою статора при зміні моменту навантаження. Недоліком цього способу керування є невисоке значення ККД при роботі електродвигуна на низьких частотах напруги живлення. У [2] пропонується підтримувати постійний кут між

струмом статора \bar{I}_1 і потокозчепленням ротора $\bar{\psi}_2$. Це відповідає підтриманню постійного абсолютного ковзання f_2 і забезпечує роботу електродвигуна з максимальним для заданої швидкості значенням ККД, що рівнозначне роботі двигуна з мінімумом струму для заданого моменту. З точки зору досягнення оптимального енергетичного режиму більш раціональним є регулювання абсолютного ковзання у функції частоти напруги живлення. Регулюючи ковзання, можна мінімізувати при роботі двигуна на низьких частотах втрати в міді, а при високих частотах – втрати в сталі. У роботі [3] показано, що, підтримуючи мінімум струму статора, можна на всіх режимах забезпечити максимум ККД. Такий закон регулювання забезпечується підтриманням постійного зсуву фаз струму статора і потокозчеплення ротора на рівні 45° . Недоліком регулювання за мінімумом струму є суттєве зменшення коефіцієнта потужності в області низьких частот, що призводить до недопустимого погіршення якості мережі.

Проведений аналіз показує необхідність подальшого вдосконалення законів регулювання, що забезпечують оптимальні енергетичні показники у всіх діапазонах регулювання швидкості асинхронного електродвигуна. Розглянемо енергетичні процеси, що перебігають в асинхронному електроприводі. При векторному керуванні асинхронним електродвигуном з орієнтацією координатної системи за вектором потокозчеплення ротора вхідними сигналами для електродвигуна є проекції вектора струму статора на осі $d-q$, які визначають значення потокозчеплення і абсолютне ковзання ротора та електромагнітний момент електродвигуна. В усталених режимах в іменованих одиницях ці величини записуються у вигляді:

$$i_{1d} = \frac{\psi_2}{L_m}; i_{1q} = \frac{M}{\kappa_m \kappa_2 \psi_2};$$

$$\omega_0 = \omega + \kappa_2 R_2 M / \kappa_m \psi_2^2; \quad (1)$$

$$M = \kappa_m \kappa_2 \psi_2 i_{1q},$$

де $\kappa_2 = \frac{1}{1+l_2}$, $\kappa_m = \frac{3}{2} p_n$.

Втрати в міді електродвигуна

$$p_m = 1.5 \left[(i_{1d}^2 + i_{1q}^2) R_1 + i_{1q}^2 \kappa_2^2 R_2 \right], \quad (2)$$

або

$$p_m = 1.5 \left[i_{1d}^2 R_1 + (R_1 + \kappa_2^2 R_2) i_{1q}^2 \right]. \quad (3)$$

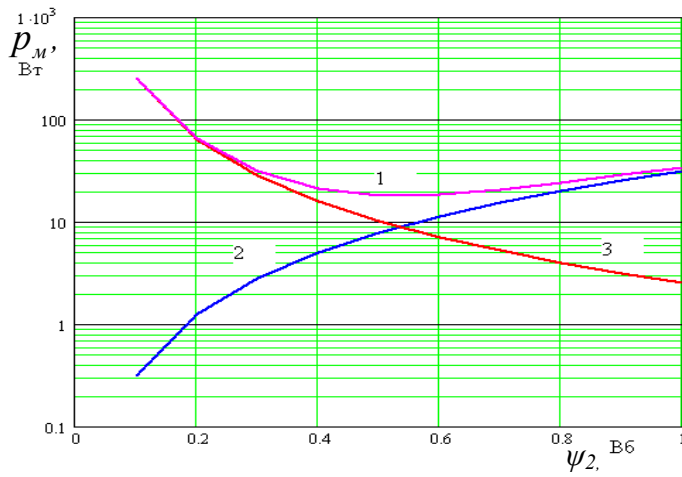
Підставивши в (3) значення струмів за осями $d-q$ згідно [4,5], отримаємо

$$p_m = 1.5 \left[\frac{\psi_2^2}{L_m^2} R_1 + (R_1 + \kappa_2^2 R_2) \frac{M^2}{\kappa_m^2 \psi_2^2} \right]. \quad (4)$$

Провівши диференціювання виразу (4) за ψ_2 і прирівнявши $\frac{dp_m}{d\psi_2}$ до нуля,

визначимо величину потокозчеплення ротора, при якому втрати в міді будуть мінімальними

$$\psi_2 = \sqrt{\frac{ML_m}{\kappa_m}} \sqrt{1 + \frac{R_2 \kappa_2^2}{R_1}}. \quad (5)$$



При відомому моменті опору навантаження і заданому значенні ψ_2 за (5) мінімальна величина втрат у міді визначається за виразом

$$p_m = 3 \frac{M}{L_m} \sqrt{R_1^2 + \kappa_2^2 R_1 R_2} \quad (6)$$

На рис. 1 показано зміну загальних і складових (за осями $d-q$) втрат у міді електродвигуна залежно від потокозчеплення ротора для електродвигуна 4A160S243 при

$M=0,1\text{Мн.}$, а на рис. 2 – залежність втрат $p_m = f(\psi_2, M)$.

Залежності рис. 1 і 2 показують наявність мінімуму втрат в електродвигуні залежно від навантаження і потокозчеплення електродвигуна. При цьому встановлення оптимального за виразом (5) потокозчеплення ротора при заданому моменті, порівняно з підтриманням $\psi_{2H} = const$, зменшує витрати в міді в 1,5 рази.

Рис. 1. Залежність загальних (1) і складових по осях (2, 3) втрат у міді електродвигуна від потокозчеплення ротора

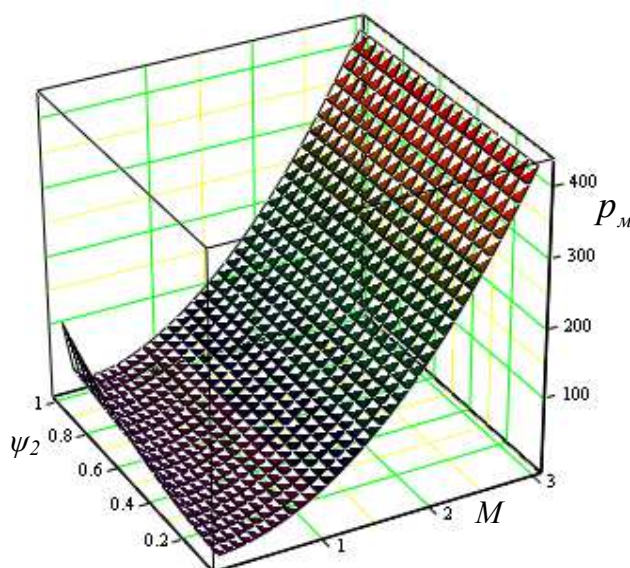


Рис. 2. Залежність втрат у міді від моменту і потокозчеплення ротора електродвигуна

Вираз для електромагнітного моменту в іменованих одиницях має вигляд:

$$M = \frac{3}{2} p_{\Pi} \kappa_2 \psi_2 i_{1q}, \quad (7)$$

а з урахуванням залежності потокозчеплення ротора від проекції струму на вісь d

$$M = \frac{3}{2} p_{\Pi} \kappa_2 L_m i_{1d} i_{1q}, \quad (8)$$

або в ефективних значеннях струмів

$$M = \frac{3 p_{\Pi} L_m^2 I_{1d} I_{1q}}{L_2}. \quad (9)$$

Абсолютне значення ковзання електродвигуна :

$$\omega_2 = \kappa_2 R_2 I_{1q} / \psi_2 = \frac{\kappa_2 R_2 I_{1q}}{L_m I_{1d}}. \quad (10)$$

Звідси

$$I_{1q} = \frac{L_2 \omega_2 I_{1d}}{R_2}. \quad (11)$$

Підставивши значення I_{1q} з (11) в (8), отримаємо

$$M = \frac{3 p_{\Pi} L_m^2 I_{1d}^2 \omega_2}{R_2}. \quad (12)$$

Величину проекції вектора фазового струму I_{ϕ} на вісь d можна записати у вигляді

$$I_{1d} = \frac{I_{\phi} R_2}{\sqrt{R_2^2 + (L_2 \omega_2)^2}}. \quad (13)$$

Підставивши значення I_{1d} в (12), знайдемо

$$M = \frac{3 p_{\Pi} L_m^2 R_2 I_{\phi}^2 \omega_2}{R_2^2 + L_2^2 \omega_2^2}. \quad (14)$$

При обмеженні потужності силового інвертора і наявності струмообмеження збільшення моменту навантаження і абсолютного ковзання призводить до того, що значення фазного струму, досягнувши максимального значення, залишається незмінним.



Рис. 3. Залежність моменту електродвигуна від абсолютного ковзання

При цьому залежність M від ω_2 (14), як видно з рис. 3 (для електродвигуна 4A160MB2, потужність 15кВт, обмеження струму на рівні номінального $I_{\phi} = 27,5A$), має інший вигляд, ніж при збільшенні струму I_{ϕ} і збільшенні ω_2 рис. 4. Остання залежність зростає із збільшенням I_{ϕ} (навантаження) і абсолютного ковзання ω_2 . Режим, поданий на рис. 3, не бажаний для регульованого електроприводу, він є нестійким.

Корекція системи регулювання за моментом ліквідує цей недолік. Іншим недоліком збільшення ковзання електродвигуна при $\psi_2 = \psi_{2H} = const$ є збільшення потокозчеплення в повітряному зазорі.

Рівновагу напруг ротора можна записати у вигляді

$$\bar{I}_2 r_2 + js\omega_0 \bar{\psi}_2 = \bar{U}_2 = 0,$$

звідси

$$\bar{I}_2 = -\frac{js\omega_0 \bar{\psi}_2}{r_2}. \quad (15)$$

Оскільки потокозчеплення в повітряному зазорі

$$\psi_m = \psi_2 - \psi_{2\sigma} = \psi_2 - L_{2\sigma} I_2,$$

то, підставивши з (15) значення I_2 , отримаємо

$$\bar{\psi}_m = \bar{\psi}_2 + j \frac{\omega_0 s \bar{\psi}_2}{r_2} L_{2\sigma},$$

або за модулем

$$\psi_m^2 = \psi_2^2 + \frac{\omega_0^2 s^2 \psi_2^2}{r_2^2} L_{2\sigma}^2, \quad (16)$$

$$\psi_m = \psi_2 \cdot \sqrt{1 + \frac{\omega_0^2 L_{2\sigma}^2}{r_2^2}}.$$

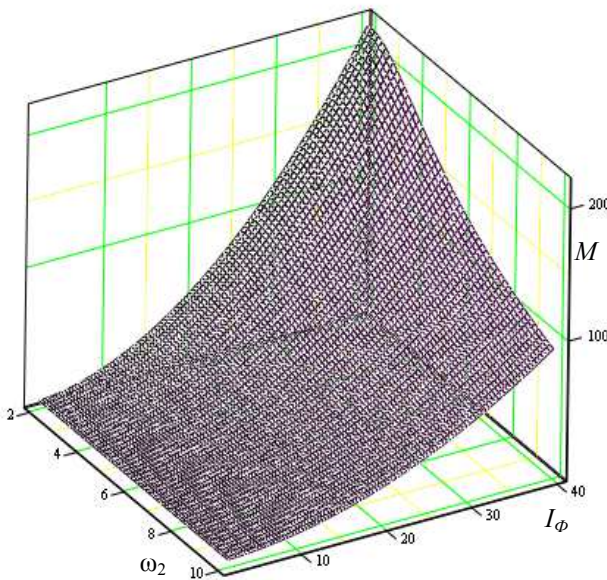


Рис.4. Залежність моменту електродвигуна від абсолютного ковзання і фазного струму

З (16) видно, що з ростом ω_2 при $\psi_2 = const$ збільшується ψ_m . Збільшення потокозчеплення у повітряному зазорі призводить до насичення магнітного кола електродвигуна і зменшення величини взаємодуктивності L_m . Ліквідація недоліку збільшення абсолютного ковзання при зміні навантаження можлива при корекції жорсткості механічної характеристики електродвигуна. При введенні позитивного зворотного зв'язку збільшення навантаження не змінює швидкості обертання електродвигуна.

Позитивний зворотній зв'язок вводиться за виразом

$$\omega^* = f_c^* + \mu \left(\kappa_{зв} - \frac{r_2}{\psi_2^2} \right). \quad (17)$$

Значення μ вираховують за формулою:

$$\mu = \frac{1}{(1 + l_2)} (i_{1b} \psi_{2a} - i_{1a} \psi_{2b}). \quad (18)$$

На рис. 5 зображена схема електропривода, у якій введено коректуючі зв'язки за моментом (18) і величиною потокозчеплення ротора в залежності від навантаження.

Модель в MatLAB електропривода рис. 5 подана на рис. 6.

На рис. 7 показаний розгін електродвигуна і його навантаження до $\mu_c = 0,5\mu_n$. При цьому навантаженні швидкість знижується на 17%.

При корекції за навантаженням швидкість не змінюється (рис. 8), але змінюється жорсткість механічної характеристики, на якій працює електродвигун (рис. 9). Корекція величини потокозчеплення (5) розраховується за умови мінімуму витрат у міді електродвигуна.

Висновок. При навантаженні привода менше $(0,3-0,4)M_H$ втрати в асинхронному короткозамкненому електродвигуні можна зменшити шляхом регулювання потокозчеплення ротора за розробленим алгоритмом, при навантаженні вище $0,4M_H$ електродвигун повинен працювати з номінальним потокозчепленням, інакше втрати в електродвигуні суттєво зростають. Корекція уставки електродвигуна за навантаженням стабілізує задану швидкість.

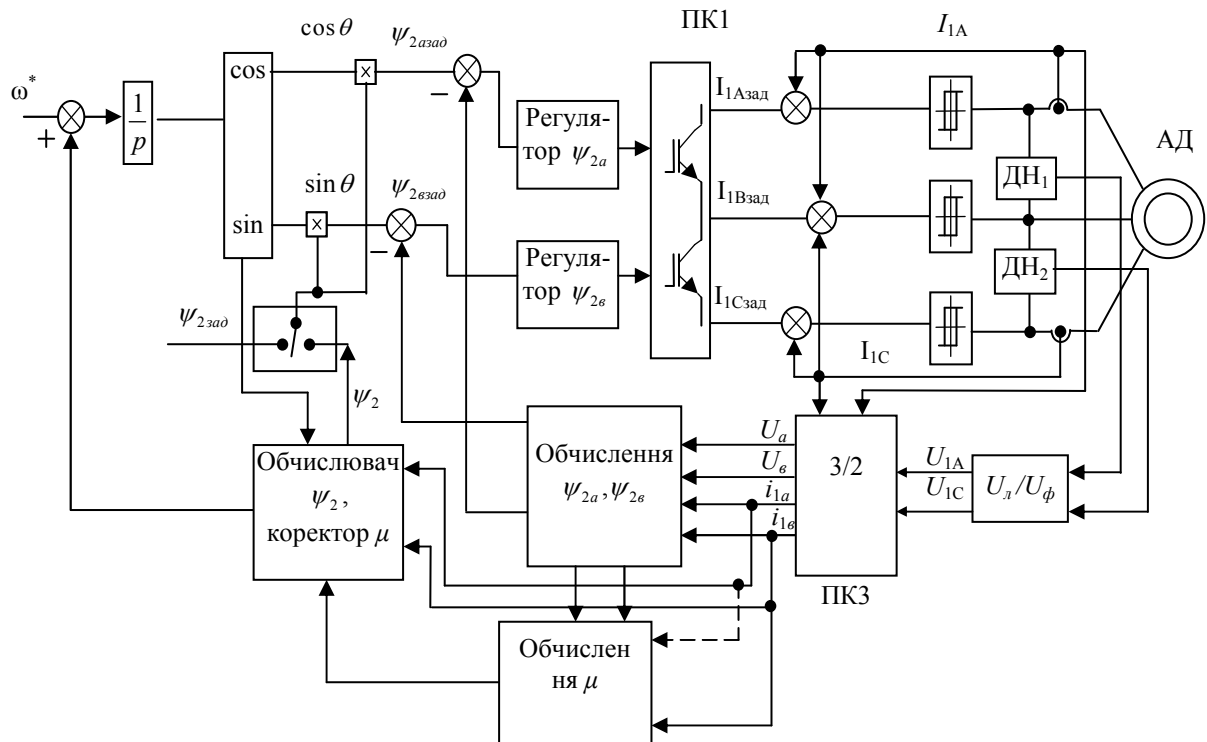


Рис.5. Функціональна схема частотно-регульованого електропривода при реалізації закону $\psi_2 = const$ і корекції задавача швидкості і потокозчеплення ротора з величиною моменту навантаження

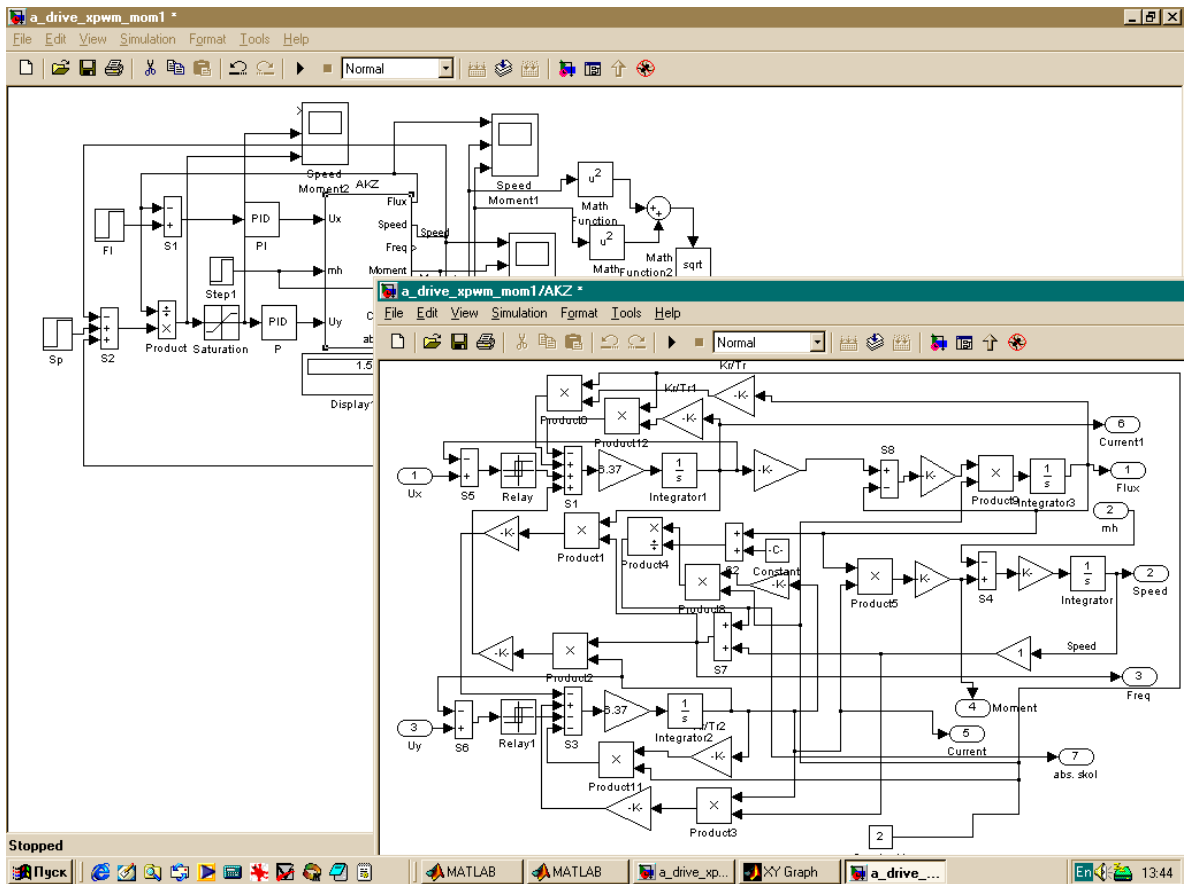


Рис. 6. Схема моделі регульованого електропривода з корекцією за моментом і потокозчепленням

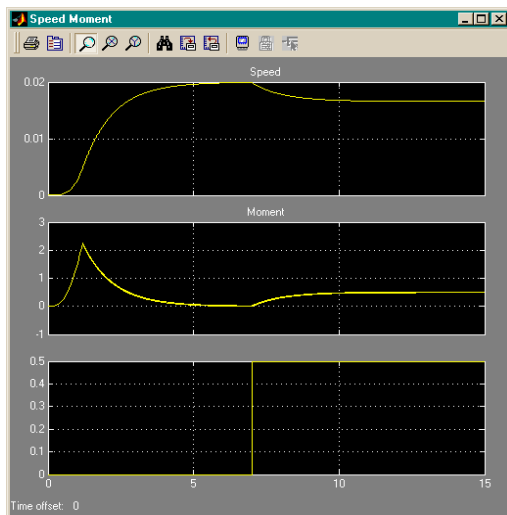


Рис. 7. Зміна в часі швидкості і моменту електродвигуна при навантаженні $M = 0.5M_n$ і при відсутності корекції за моментом

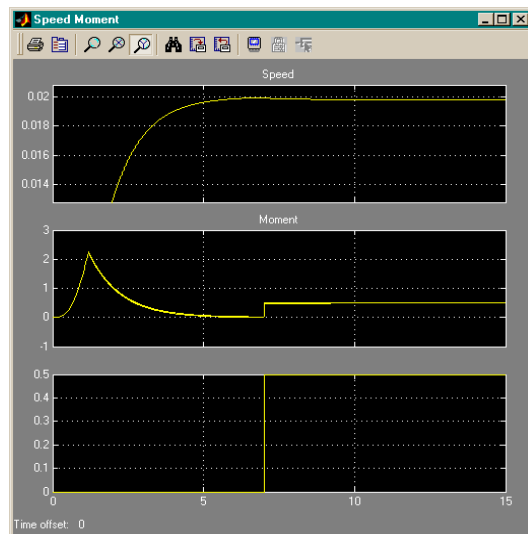


Рис.8. Зміна в часі швидкості і електромагнітного моменту при навантаженні електропривода

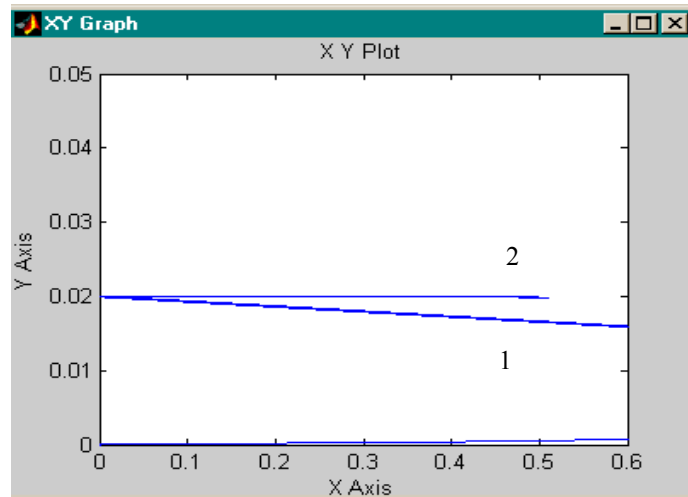


Рис. 9 Жорсткість механічної характеристики електродвигуна при відсутності корекції (1) за моментом навантаження і з корекцією (2)

Algorithms of correction behind the moment and interlinkage a rotor are proved theoretically and realized practically at change of loading of the electric drive that has allowed to minimize losses in the electric motor. The proved ways of correction of rigidity of mechanical characteristics of coherent systems of the electric drive which work in product lines preparation of forages.

Література

1. Холявин А.В. Авторское свидетельство СССР №1275731. Устройство для управления асинхронным электродвигателем, кл. H02P7/42. – Открытия. Изобретения, 1986. – Бюл. № 45.
2. Петрушин В.С., Таньков А.А. Энергетические показатели асинхронного двигателя в частотном электроприводе при различных законах управления // Электромашинобудування та електрообладнання: Респ. міжвід. наук.-техн. збірник. – 2000. – Вип.55. – С.71-75.
3. Мищенко В.А. Авторское свидетельство СССР №144110 А. Способ управления асинхронным электродвигателем и устройство для его осуществления, кл. H02P5/34. – Открытия. Изобретения, 1988. – Бюл. № 45.
4. Балюта С.М., Васічкін В.І., Бурляй Ю.І. Принцип керування частотно-регульованим асинхронним електроприводом // Автоматизація виробничих процесів. – 2002. – №2. – С.39-47.
5. Богаєнко І.М., Балюта С.М. Система керування асинхронного електропривода з векторним керуванням за магнітним потоком ротора без застосування датчика частоти обертання // Механіка та машинобудування. – 2003. – №1. – С.85-92.

Одержано 21.04.2004 р.