

УДК 621.31

**КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІКИ РЕГУЛЬОВАНОГО
ЕЛЕКТРОПРИВОДА ВОДОНАСОСНОЇ УСТАНОВКИ З
ІІ – РЕГУЛЯТОРОМ**

М. М. Заблодський, доктор технічних наук, професор

Національний університет біоресурсів і природокористування України.

П. Б. Клендій, кандидат технічних наук, доцент

Л.С. Колодійчук, кандидат педагогічних наук, доцент

Г. Я. Клендій, старший викладач

ВП НУБіП України «Бережанський агротехнічний інститут»

e-mail: rklen_@i.ua

Анотація. Розглянуто питання комп'ютерного моделювання динаміки частотно-регульованого електроприводу водонасосної установки з ІІ-регулятором. Застосування частотно-регульованого електроприводу дозволяє економити електроенергію, оскільки частота обертання електродвигуна регулюється перетворювачем частоти за алгоритмом, який визначається в обчислювальному блоці на підставі електроенергетичних сигналів, що надходять з датчиків струму, напруги та частоти, що встановлені в колі живлення електродвигуна. Алгоритм обчислення здійснюється за модульно-векторними величинами електроенергетичних сигналів, в результаті чого отримуються дійсні кількісно-напірні характеристики насоса.

Для моделювання, імітації і аналізу динамічних систем застосовується інтерактивний інструмент MATLAB Simulink.

Розроблена комп'ютерна модель дозволяє визначати основні показники якості процесу регулювання з ІІ-регулятором.

Ключові слова: комп'ютерна модель, частотно-регульований електропривод, водонасосна установка, ІІ- регулятор

Актуальність. Системи водопостачання є енергоємними об'єктами, тому, на сьогодні, забезпечення їх енергоефективної роботи – досить актуальне завдання [1]. Однією з перспективних тенденцій у галузі енергозберігаючих технологій останніх років є застосування частотно-регульованих приводів на основі асинхронних короткозамкнених електродвигунів і напівпровідникових перетворювачів частоти, що знижують споживання електричної енергії,

підвищують степінь автоматизації, зручність експлуатації обладнання і якість технологічних процесів.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Вагомий внесок у розвиток теорії частотного управління внесли Епштейн І.І., Закладний О.М., Сандлер А.С., Сарбатов Р.С., які розглянули як статичні, так і динамічні режими роботи АД при живленні від перетворювачів частоти (ПЧ) [2]. Науковці вказують, що нині пріоритетне значення, поряд із оптимальним конструюванням асинхронних двигунів (АД), набувають задачі оптимального моделювання електроприводів змінного струму та визначення ефективних режимів роботи [3].

Для регулювання енергетичної ефективності устаткування насосних станцій, повинен бути вибраний оптимальний по енергоспоживанню режим роботи насосів при їхній спільній роботі. Одним із шляхів вирішення цього завдання є зміна частоти обертання робочого колеса водонасосної установки, що дозволяє здійснити безперервне регулювання продуктивності насоса з меншими витратами енергії [4].

Мета дослідження – побудова комп'ютерної моделі системи водопостачання, для дослідження динаміки регульованого електроприводу водонасосної установки з ПЧ-регулятором.

Матеріали та методи дослідження. Для широкодіапазонних швидкодіючих приводів потрібно застосовувати структуру векторного керування або пряме керування моментом.

При значних змінах ковзання на робочому відрізку механічної характеристики, з метою врахування електромагнітних перехідних процесів, а також при пусках електродвигуна застосовують моделі, що реалізують систему диференціальних рівнянь, які пов'язують вектори струмів, напруг і потокозчеплень, представлених у системі координат d, q .

Система цих рівнянь у координатній системі d, q , яка обертається з синхронною швидкістю, у відносних одиницях має вигляд [5]:

$$u_{1d} = r_1 i_{1d} + \frac{1}{\omega_{\text{он}}} \cdot \frac{d\psi_{1d}}{dt} + f^* \psi_{1d}; \quad u_{1q} = r_1 i_{1q} + \frac{1}{\omega_{\text{он}}} \cdot \frac{d\psi_{1q}}{dt} - f^* \psi_{1q};$$

$$0 = r_2 i_{1q} + \frac{1}{\omega_{\text{OH}}} \cdot \frac{d\psi_{2d}}{dt} + (f^* - \omega^*) \psi_{2d}; \quad 0 = r_2 i_{2q} + \frac{1}{\omega_{\text{OH}}} \cdot \frac{d\psi_{2q}}{dt} - (f^* - \omega^*) \psi_{2q}; \quad (1)$$

$$\psi_{1d} = ((1 + l_1) i_{1d} + i_{2d}) f^*; \quad \psi_{1q} = ((1 + l_1) i_{1q} + i_{2d}) f^*;$$

$$\psi_{2d} = ((1 + l_2) i_{2d} + i_{1d}) f^*; \quad \psi_{2q} = ((1 + l_2) i_{2q} + i_{1q}) f^*; \quad \mu = \frac{2}{3} P_n (\psi_{2q} i_{2d} - \psi_{2d} i_{2q});$$

$$\mu = \mu_c + \frac{J \omega_{\text{OH}}^2}{M_{\delta}} \cdot \frac{d\omega^*}{d\bar{t}},$$

де прийняті за базові одиниці – номінальні значення струму статора $I_{1\text{H}}$, синхронної швидкості ω_{OH} і частоти $f_{1\text{H}}$ підведеної напруги. Вихідні співвідношення:

$$i_1 = \frac{I_1}{I_{1\text{H}}}; \quad f^* = \frac{f_1}{f_{1\text{H}}}; \quad \omega^* = \frac{\omega}{\omega_{\text{OH}}}; \quad f^* = \frac{\omega_0}{\omega_{\text{OH}}}; \quad U_{\delta} = \omega_{\text{OH}} L_m I_{1\text{H}}; \quad Z_{\delta} = \omega_{\text{OH}} L_m;$$

$$u_1 = \frac{U_1}{U_{\delta}}; \quad M = U_{\delta} \cdot I_{1\text{H}} / \omega_{\text{OH}}; \quad l_1 = \frac{L_1}{L_{1\text{H}}}; \quad l_2 = \frac{L_2}{L_m},$$

де ω_0 – кутова швидкість поля статора електродвигуна при частоті f_1 підведеної напруги, рад/с; L_1 , L_2 , L_m – індуктивності розсіювання обмоток статора і ротора та індуктивність кола намагнічування, Гн.

Вектор потокозчеплення статора можна записати у вигляді [6]

$$\bar{\psi}_1 = \bar{I}_1 l'_1 + \kappa_2 \bar{\psi}_2, \quad (2)$$

$$\text{де: } l'_1 = l_1 + \kappa_2 l_2; \quad \kappa_2 = \frac{1}{(1 + l_2)}.$$

Рівняння (1) записуються у векторній формі у вигляді:

$$\bar{U}_1 = r_1 \bar{i}_1 + \frac{d\bar{\psi}_1}{d\bar{t}} + j f^* \bar{\psi}_1, \quad 0 = r_2 \bar{i}_2 + \frac{d\bar{\psi}_2}{d\bar{t}} + j (f^* - \omega^*) \bar{\psi}_2,$$

$$\bar{\psi}_1 = (1 + l_1) \bar{i}_1 + \bar{i}_2, \quad \bar{\psi}_2 = (1 + l_2) \bar{i}_2 + \bar{i}_1, \quad (3)$$

$$m = \frac{3}{2} P_n I_m (\bar{\psi}_2 \bar{i}_1)_2, \quad \bar{T}_{\mu} \frac{d\omega^*}{d\bar{t}} = \mu - \mu_c,$$

$$\text{де } T_{\mu} = \frac{J \omega_{\text{OH}}^2}{M_{\delta}}$$

В системі координат $d - q$, які обертаються з швидкістю поля статора, система (3) запишеться у вигляді:

$$\left\{ \begin{array}{l} u_{1d} = r'_1 i_{1d} + T_l' \frac{di_{1d}}{dt} - l'_1 f^* i_{1q} - \frac{r_2}{T_2} \psi_{2d} - k_2 \omega^* \psi_{2q}; \\ u_{1q} = r'_1 i_{1q} + T_l' \frac{di_{1q}}{dt} - l'_1 f^* i_{1d} - \frac{r_2}{T_2} \psi_{2q} - k_2 \omega^* \psi_{2d}; \\ 0 = -k_2 r_2 i_{1d} + \frac{1}{T_2} \psi_{2d} + \frac{d\psi_{2d}}{dt} - (f^* - \omega^*) \psi_{2q}; \\ 0 = -k_2 r_2 i_{1q} + \frac{1}{T_2} \psi_{2q} + \frac{d\psi_{2q}}{dt} + (f^* - \omega^*) \psi_{2d}; \\ \mu = k_2 (\psi_{2d} i_{1q} - \psi_{2q} i_{1d}); \\ \mu - \mu_c = T_\mu \frac{d\omega^*}{dt} \end{array} \right. \quad)$$

при $t = t_0$,

$$i_{1d} = i_{1d0}, i_{1q} = i_{1q0}, \psi_{2d} = \psi_{2d0}, \psi_{2q} = \psi_{2q0}, \omega^* = \omega^*_0$$

$$\text{де: } r'_1 = r_1 + k_2^2 r_2, T_l' = \frac{l'_1}{r'_1}, T_2 = \frac{L_{2\sigma}}{R_2}; L_{2\sigma} = L_2 + L_m$$

При реалізації векторного способу керування частоти обертання асинхронного електродвигуна, коли $\psi_2 = \text{const}$, перші чотири рівняння (4) в операторній формі запишуться у вигляді:

$$\begin{aligned} U_{1d} &= i'_{1d} r'_1 (1 + pT_l') - f^* l'_1 i_{1q} - \frac{r_2'}{T_2} \psi_{2d}; \\ U_{1q} &= i'_{1q} r'_1 (1 + pT_l') + f^* l'_1 i_{1d} + k_2 \omega^* \psi_{2d}; \\ 0 &= -k_2 i_{1d} r_2 + \frac{1}{T_2} \psi_{2d} + p\psi_{2d}; \\ 0 &= -k_2 i_{1q} r_2 + (f^* - \omega^*) \psi_{2d}; \end{aligned} \quad (5)$$

З третього і четвертого рівнянь системи (5) отримаємо:

$$\begin{aligned} \psi_{2d} &= \frac{\kappa_2 r_2 T_2 i_{1d}}{T_2 p + 1}, \\ f_c^* &= \omega^* + \frac{\kappa_2 r_2 i_{1q}}{\psi_{2d}} \end{aligned} \quad (6)$$

Момент електродвигуна при векторному керуванні:

$$\mu = \kappa_2 \psi_2 i_{1q}. \quad (7)$$

Враховуючи (5), (6) і (7) та рівняння руху електропривода побудовано функціональну схему асинхронного регульованого електропривода з підтриманням $|\psi_2| = const$, яка приведена на рис. 1.

Вектор потокозчеплення ротора рахується за відомим значенням потокозчеплення статора $\bar{\psi}_1$ (1, 2) з використанням залежності (4)

$$\bar{\psi}_2 = \frac{1}{\kappa_2} (\bar{\psi}_1 - \bar{I}_1 l_1'), \text{ а в нерухомих координатах } a, b$$

$$\psi_{2a} = (1 + l_2) \int_0^\tau (U_a - i_a r_1) d\tau - i_{1a} l_1' (1 + l_2);$$

$$\psi_{2b} = (1 + l_2) \int_0^\tau (U_b - i_b r_1) d\tau - i_{1b} l_1' (1 + l_2). \quad (8)$$

Модуль потокозчеплення і кутове положення визначають співвідношеннями:

$$|\psi_2| = \sqrt{\psi_{2a}^2 + \psi_{2b}^2}; \quad \cos \theta = \frac{\psi_{2a}}{|\psi_2|}; \quad \sin \theta = \frac{\psi_{2b}}{|\psi_2|}. \quad (9)$$

При реалізації $|\psi_{2H}| = const$ величина потокозчеплення розраховується за формулою:

$$\psi_{2H} = \frac{\sqrt{2} I_n L_m}{\sqrt{1 + \left(\frac{T_2 2\pi f_1 s_H}{p_n} \right)^2}}. \quad (10)$$

Оскільки $M = \frac{L_m}{L_2} (\psi_{2a} i_{1b} + \psi_{2b} i_{1a})$, то $M\omega = P$,

$$W_{02}(p) = \frac{k_{um} k_i k_{di}}{(T_\mu p + 1)(T_i p + 1)}, \quad (11)$$

де k_{di} – коефіцієнт передачі датчика струму, В/А.

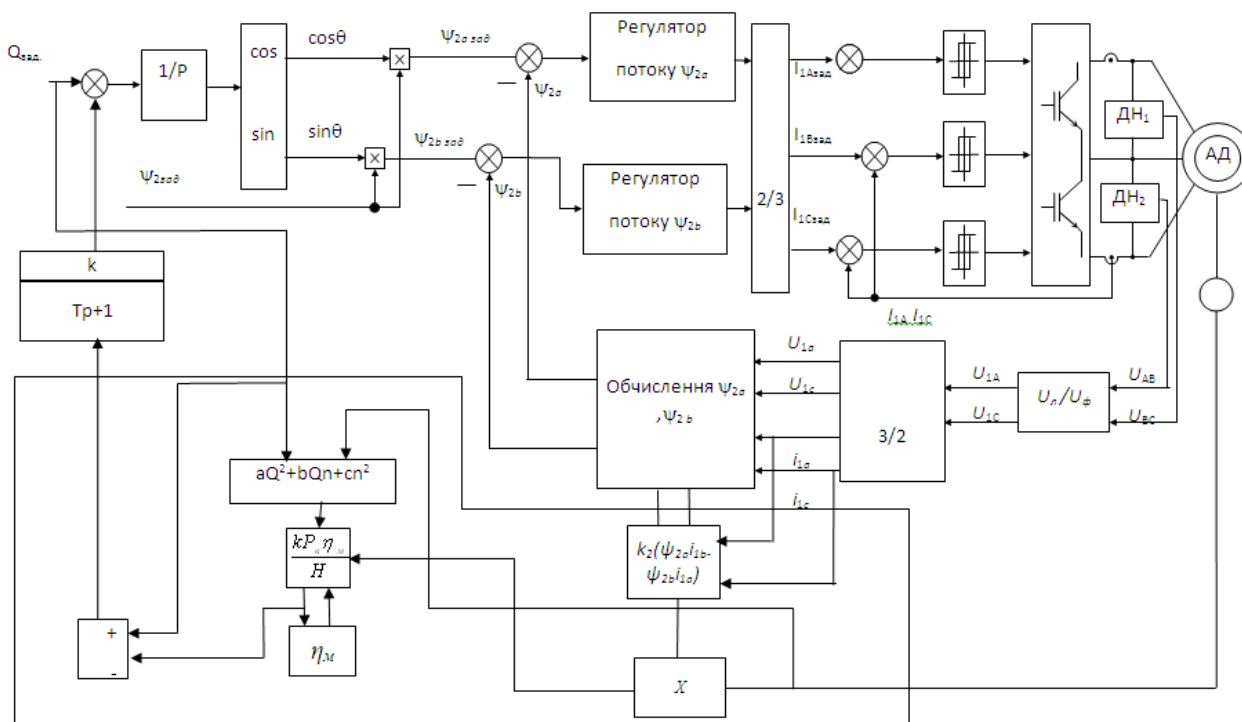


Рис.1. Функціональна схема асинхронного електропривода з підтримкою $\psi_2 = const$.

Результати досліджень та їх обговорення. Передаточна функція об'єкта регулювання контуру керування складовою струму i_2 може бути представлена наступним виразом:

Передаточна функція замкненого контуру струму по керуючому впливу:

$$W_i(p) = \frac{i_2(p)}{i_2'(p)} = \frac{W_i'(p)}{W_i'(p) + 1} = \frac{1}{k_{di}(2T_a^2 p^2 + 2T_a p + 1)} \approx \frac{1}{k_{di}(T_\tau p + 1)}, \quad (12)$$

де $T_\tau = 2T_a$.

При налаштуванні допускається значна похибка контуру струму, тому що вона вибирається зовнішнім контуром швидкості.

Оскільки ЕРС обертання $E = p_0 |\psi_0| \omega$, вона суттєво не впливає на динаміку то її нехтуємо [7]. Тоді передаточна функція об'єкта регулювання швидкісного контуру:

$$W_{01}(p) = \frac{C_m k_\omega |\psi_0|}{k_{di} J (T_\tau p + 1) p} = \frac{k_m}{J (T_\tau p + 1) p}, \quad (13)$$

де $k_m = C_m k_\omega |\psi_0| / k_{di}$; $T_\tau = 2T_a$; J – момент інерції, кг·м².

Для того, щоб знизити статичну помилку вводять ПІ-регулятор.

$$W_{\text{ПІЗ}}(p) = \frac{(k_5 p / k_6 + 1) k_6}{p}, \quad (14)$$

Контур регулювання швидкості з ПІ-регулятором може налаштовуватися за умовами симетричного оптимуму (СО) при $T_{\text{ем}} > 4T_a$:

$$k_6 = \frac{J}{32T_a^2 k_m}, \quad \frac{k_5}{k_6} = 8T_a.$$

Передаточну функцію по керуючому впливу при холостому ході при $M_c = 0$ ($I_c = 0$) дістаємо у вигляді:

$$W_\omega(p) = \frac{\omega(p)}{\omega'(p)} = \frac{4T_\tau p + 1}{k_\omega (8T_\tau^3 p^3 + 8T_\tau^2 p^2 + 4T_\tau p + 1)}, \quad (15)$$

Розрахунок регуляторів контурів головного магнітного потокозчеплення та швидкості доповнюється додатковою корекцією налаштувань регуляторів для отримання малого перерегулювання вихідної величини. Вводять також комбіноване регулювання з керуванням по розімкненому циклу, коректуючи сигнали, еталонні моделі [7,8].

Перехідні процеси при накиді чи знятті навантаження в приводі ЧП-Д з двократно інтегруючою системою підлеглого регулювання характеризуються наступною передаточною функцією

$$W_\omega(p) = \frac{d\omega(p)}{I_c(p)} = \frac{(T_\tau p + 1) 8T_\tau^2 p}{C_M |\psi_0| T_{\text{ем}} k_i (8T_\tau^3 p^3 + 8T_\tau^2 p^2 + 4T_\tau p + 1)}. \quad (16)$$

Для моделювання, імітації і аналізу динамічних систем застосовується інтерактивний інструмент MATLAB Simulink. Імітаційна модель в програмі Simulink показана на рис. 2.

Графік на рис. 3 отримано при наступних значеннях ПІ-регулятора швидкості: $K_5 = 0,1 \frac{1}{K_6} = 0,7$.

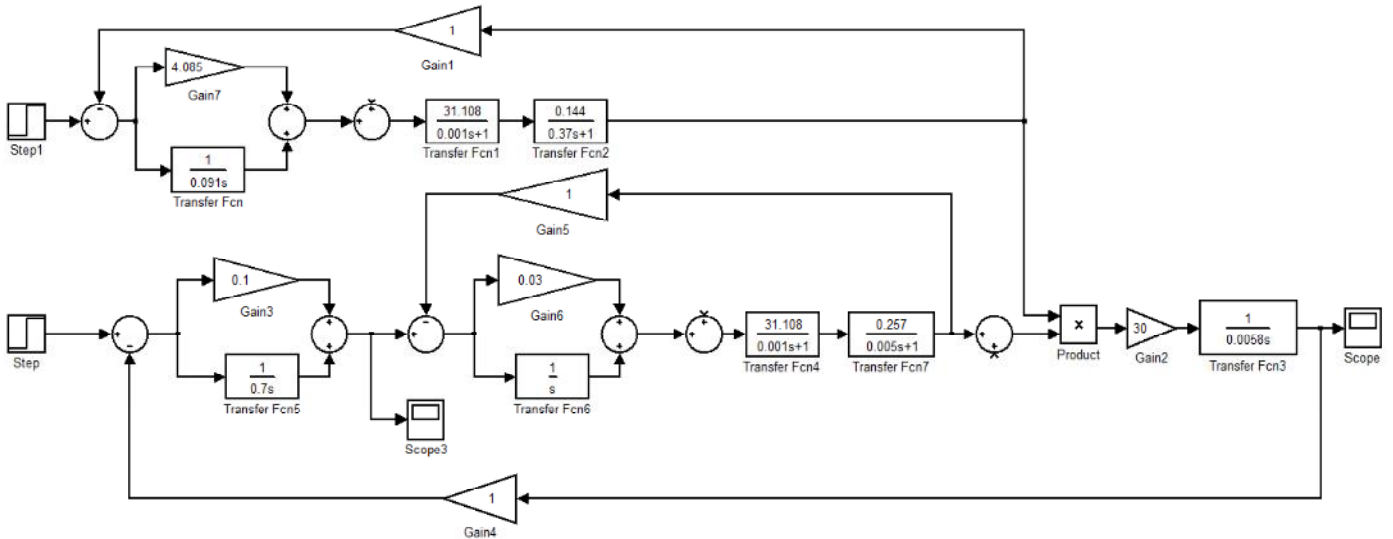


Рис. 2. Імітаційна модель електропривода водонасосної установки в програмі Simulink

Графіки перехідних процесів показані на рис. 3 і рис. 4.

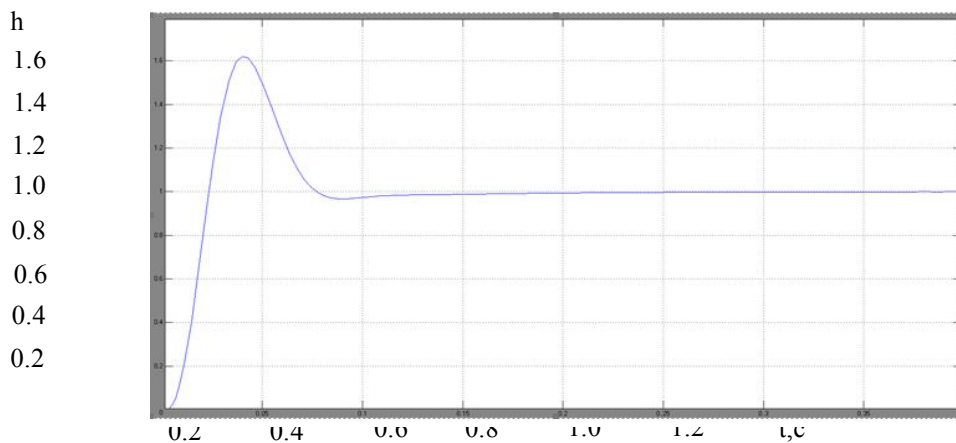


Рис. 3. Перехідний процес за швидкістю з надмірним перерегулюванням

Час перехідного процесу складає $t = 0,4$ с, перерегулювання $\sigma = 37,5\%$.

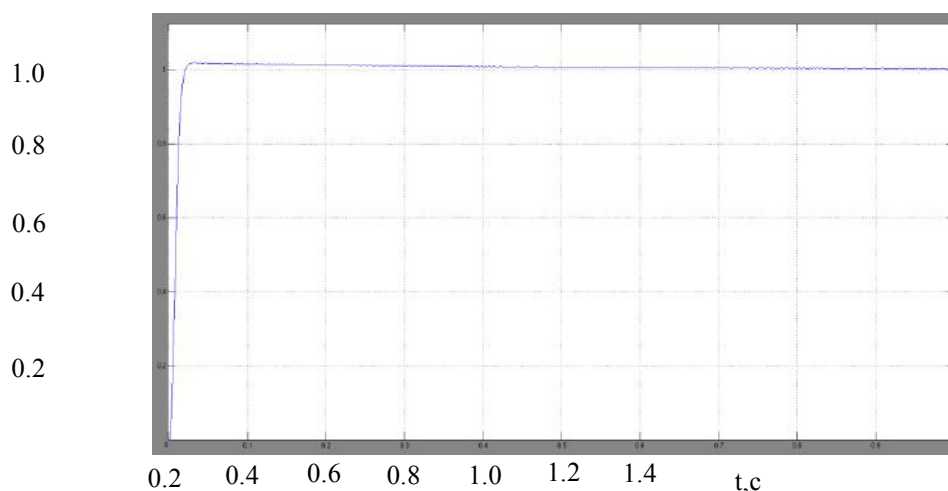


Рис. 4 Перехідний процес за швидкістю з малим перерегулюванням

Час перехідного процесу складає близько $t = 0.1$ с, перерегулювання $\sigma = 1\%$.

Висновки і перспективи. Результати проведених досліджень показують, що введення ПІ – регулятора в систему керування покращує показники якості процесу регулювання і зменшує статичну похибку, а також дозволяє економити електричну енергію, оскільки регулювання проходить за заданими технологічними параметрами.

Список літератури

1. Лезнов Б. С. Энергосбережение и регулируемый привод в насосных и воздухоудувных установках /Б.С. Лезнов. – М.: Энергоатомиздат, 2006. – 360 с.
2. Корчемний М.О. Енергозбереження в АПК /М.О. Корчемний.– Тернопіль, 2001. – 984 с.
3. Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин: учеб. для вузов / И.П. Копылов. – [3-е изд., переработ. и доп.]. – М.: Высш.шк., 2001. – 327 с.
4. Ковалев В. З. Энергосберегающие алгоритмы управления взаимосвязанным электроприводом центробежных турбомеханизмов / Ковалев В. З., Мельников В. Ю., Бородацкий Е. Г. – Омск: ОмГТУ. 2000.
5. Корчемний М.О. Дослідження асинхронного електропривода за допомогою математичного моделювання /М.О. Корчемний // Механізація та електрифікація сільського господарства. – К.: Урожай, 1971. – С.67-76.
6. Постников И.М. Обобщенная теория и переходные процессы электрических машин: учеб. пособ. /В.И. Постников. – К.: Техніка, 1966. – 436 с.
7. Онищенко Г.Б. Электрический привод / Г.Б. Онищенко. – М.: РАСХН, 2003. – 320 с.

8. Усольцев А.А. Частотное управление асинхронными двигателями / А. А. Усольцев. – СПб.: СПбГУ ИТМО, 2006. – 94 с.

References

1. Leznov, B. S. (2006). Energoberezheniye i reguliruyemyy privod v nasosnykh i vozdukhoduvnykh ustanovkakh [Power saving and adjustable drive in pump and blower installations]. – Moscow: Energoatomizdat, 360.

2. Korchnnyi, M.O. (2001). Enerhozberezhennia v APK [Energy saving in the agroindustrial complex]. – Ternopil, 984.

3. Kopylov, I.P. (2001). Matematicheskoye modelirovaniye elektricheskikh mashin [Mathematical Modeling of Electric Machines]. - Moskow.: Vyssh.shk., 327.

4. Kovalev, V. Z., Melnikov, V. Yu., Borodatsky, E. G. (2000). Energoberegayushchiye algoritmy upravleniya vzaimosvyazannym elektroprivodom tsentrobeznykh turbomekhanizmov [Energy-saving algorithms for control of interconnected electric drive of centrifugal turbomechanisms]. Omsk: OmSTU.

5. Korchnyi, M.O. (1971). Doslidzhennia asynkhronnoho elektroprivoda za dopomohoiu matematychnoho modeliuвання [Research of asynchronous electric drive with the help of mathematical modeling]. Mekhanizatsiia ta elektryfikatsiia silskoho hospodarstva. Kyiv: Urozhai, 67-76.

6. Postnikov, I.M. (1966). Obobshchennaya teoriya i perekhodnyye protsessy elektricheskikh mashin [Generalized Theory and Transient Processes of Electric Machines]. -Kyiv: Tekhnika, 436.

7. Onischenko, G. B. (2003). Elektricheskyy privod [Electric drive]. Moscow: RASHN, 320.

8. Usoltsev, A. A. (2006). Chastotnoye upravleniye asinkhronnymi dvigatelyami [Frequency control of asynchronous motors]. SPb .: SpbSU ITMO, 94.

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ РЕГУЛИРУЕМОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА НАСОСНОЙ УСТАНОВКИ С ПИ-РЕГУЛЯТОРОМ

Н. Н. Заблодский, П. Б. Клендий, Л. С. Колодийчук, Г. Я. Клендий

Аннотация. *Рассмотрены вопросы компьютерного моделирования динамики частотно-регулируемого электропривода насосной установки с ПИ-регулятором. Применение частотно-регулируемого электропривода позволяет экономить электроэнергию, поскольку частота вращения электродвигателя регулируется преобразователем частоты по алгоритму, который определяется в вычислительном блоке на основании электроэнергетических сигналов, поступающих с датчиков тока, напряжения и частоты, установленные в цепи питания электродвигателя. Алгоритм вычисления осуществляется по модульно-векторными величинами электроэнергетических сигналов, в результате чего получают настоящие количественно-напорные характеристики насоса.*

Для моделювання, імітації і аналізу динамічних систем застосовується інтерактивний інструмент MATLAB Simulink.

Разроботана комп'ютерна модель дозволяє визначати основні показателі якості процесу регулювання з ПІ-регулятором.

Ключевые слова: *комп'ютерна модель, частотно-регульований електродвигун, водонасосна установка, ПІ- регулятор*

COMPUTER MODELING OF DYNAMICS OF REGULATED ELECTRIC DRIVER OF WATER-RESISTANT INSTALLATION WITH PI REGULATOR

N. Zablodsky, P. Klendiy, L. Kolodiychuk, G. Klendiy

Abstract. *In the article the questions of computer modeling of dynamics of frequency-regulated electric drive of a water pump unit with a PI-regulator are considered. The use of a frequency controlled electric drive allows you to save electricity, since the frequency of the motor is regulated by the frequency converter based on the algorithm, which is determined in the computing unit on the basis of electrical signals coming from current sensors, voltage and frequency, which are set in the power supply circuits of the electric motor. The algorithm of calculation is carried out according to the modular-vector values of the electric energy signals, which results in the actual quantitative and pressure characteristics of the pump.*

To simulate, simulate and analyze dynamic systems, the interactive MATLAB Simulink tool is used.

The developed computer model allows to determine the main indicators of the quality of the regulation process with the PI regulator.

Keywords: *computer model, frequency regulated electric drive, water pump installation, PI-regulator*