

УДК 621.438:165

П. А. Кузнецов, С. В. Борщевський, д.т.н., проф., Д. І. Кузнецов, магістр (ДонНТУ)

СИСТЕМА ЧАСТОТНО-СТРУМОВОГО КЕРУВАННЯ ШВИДКІСТЮ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА НА ОСНОВІ ПЕРЕТВОРЮВАЧА ЧАСТОТИ З КЕРОВАНИМ ВИПРЯМЛЯЧЕМ ТА АВТОНОМНИМ ІНВЕРТОРОМ СТРУМУ

P. Kuznetsov, S. Borshchevskiy, doctor PhD, D. Kuznetsov, master (DonNTU)

FREQUENCY-CURRENT SPEED CONTROL SYSTEM OF THE INDUCTION MOTOR, BASED ON FREQUENCY TRANSFORMER WITH CONTROLLED RECTIFIER AND AUTONOMOUS CURRENT REVERSER

Об'єктом розробок і досліджень є система частотно-струмового керування швидкістю асинхронних двигунів (далі АД) на основі перетворювача частоти з керованим випрямлячем та автономним інвертором струму. Метою роботи є рішення комплексних задач моделювання системи частотно-струмового керування асинхронним двигуном, яке доцільно використовувати в електроприводах гірської промисловості.

Ключові слова: асинхронний двигун з короткозамкненим ротором, частотно-струмове керування, структурна схема, перетворювач частоти, регулятор швидкості, регулятор струму, математичне моделювання, Simulink

Объектом разработок и исследований является система частотно-токового управления скоростью асинхронных двигателей (далее АД) на основе преобразователя частоты с управляемым выпрямителем и автономным инвертором тока. Целью работы является решение комплексных задач моделирования системы частотно-токового управления асинхронным двигателем, которое целесообразно использовать в электроприводах горной промышленности.

Ключевые слова: асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором, частотно-токовое управление, структурная схема, преобразователь частоты, регулятор скорости, регулятор тока, математическое моделирование, Simulink

The object of research is the frequency-current speed control system of induction motors (AM in the article) based on frequency transformer with controlled rectifier and autonomous current reverser. The aim of the article is to solve complex problems of modeling the frequency-current induction motor control system, which should be used in electric drives in the mining industry.

Keywords: asynchronous motor, frequency-current control, block diagram, frequency converter, speed controller, current controller, mathematical modeling, Simulink

Вступ. Гірнична промисловість України потребує ремонту обладнання. Не винятком також є і більшість електроприводів працюючих шахтних апаратів [1]. Зараз із розвитком напівпровідникової техніки стало можливим введення нових засобів керування електричними двигунами. Аналіз досліджень останніх років показує, що найбільш привабливим для гірничої промисловості є

частотно-керований привід АД. Тому саме для цього механізму були виконані розробки.

Ціль і завдання. Існують два найпоширеніші види управління асинхронними двигунами – це системи скалярного частотного управління та системи векторного управління.

Системи скалярного частотного управління забезпечують гарні регульовальні властивості електропривода в статичних режимах роботи, коли магнітний потік двигуна стабілізований або змінюється за певним законом зі зміною статичного моменту. Динамічні властивості електропривода при скалярному частотному управлінні визначаються функцією завдання частоти в перехідному процесі й параметрами самого електропривода, у першу чергу відношенням електромеханічної постійної часу T_m до електромагнітної T_e . Магнітний потік двигуна в перехідному процесі не залишається постійним, тому в перехідному процесі можливі коливання електромагнітного моменту й швидкості. Для багатьох механізмів з помірними вимогами до динаміки (особливо інерційних, не швидкодіючих механізмів) скалярні системи частотного управління, як більш прості і дешеві, є раціональним технічним рішенням застосування регульованого електропривода.

Результати досліджень. При частотно-струмовому управлінні здійснюється взаємопов'язане змінювання амплітуди та частоти струму статора двигуна. Частіше усього при такому регулюванні швидкості задаються вимогою постійного потоку на необхідному рівні, після чого розраховують відповідну залежність струму статора від абсолютного ковзання.

Триланкові перетворювачі частоти з проміжною ланкою постійного струму звичайно використовуються у системах частотно-струмового керування АД. Певне керування вентилями КВ забезпечує необхідну величину струму у ланці постійного струму, реактор у ланці постійного струму, який згладжує пульсації струму на виході КВ, керування АІС забезпечує необхідне значення частоти зміни струму на його вході.

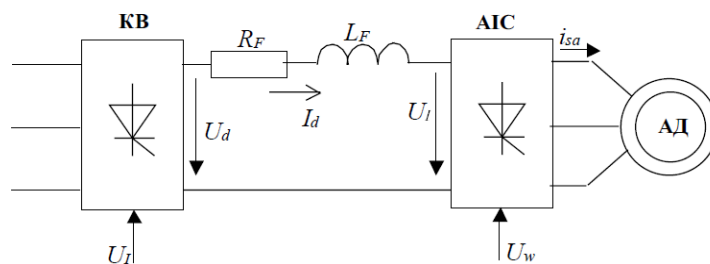


Рис. 1. Принципова схема силової частини системи ЕП з частотно-струмовим керуванням

Модель ПЧ з ланкою постійного струму отримують на основі математичного опису об'єкта "ланка постійного струму – ідеалізований АІС", який у синхронній системі координат з додатковою орієнтацією за вектором струму статора має вигляд:

$$\begin{cases} U_d = U_I + (R_F + pL_F)I_d \\ i_{sx} = \frac{2\sqrt{3}}{\pi}; i_{sy} = 0; U_{sx} = \frac{\pi}{3\sqrt{3}}U_I \end{cases} \quad (1)$$

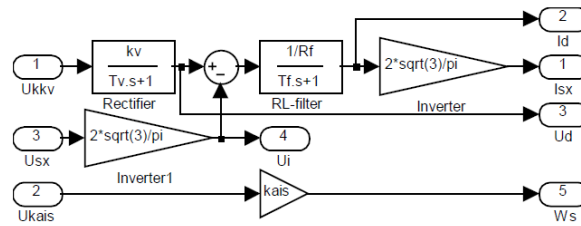


Рис. 2. Структурна схема ПЧ з ланкою постійного струму

Використовуємо перетворенні рівняння Парка-Горева для орієнтації моделі АД за вектором струма статора I_s :

$$\begin{cases} U_{s1} = R_s i_{s1} + p\psi_{s1} - \omega_k \psi_{s2} \\ U_{s2} = R_s i_{s2} + p\psi_{s2} + \omega_k \psi_{s1} \\ U_{r1} = R_r i_{r1} + p\psi_{r1} - (\omega_k - \omega_r)\psi_{r2} \\ U_{r2} = R_r i_{r2} + p\psi_{r2} + (\omega_k - \omega_r)\psi_{r1} \\ \psi_{s1} = L_s i_{s1} + L_m i_{r1} \\ \psi_{s2} = L_s i_{s2} + L_m i_{r2} \\ \psi_{r1} = L_r i_{r1} + L_m i_{s1} \\ \psi_{r2} = L_r i_{r2} + L_m i_{s2} \end{cases} \quad (2)$$

Умови обертання системи координат оберемо у вигляді:

$$I_{s1} = I_{sm}, I_{s2} = 0. \quad (3)$$

Тобто, дійсна вісь системи координат жорстко сполучена із напрямком вектора потокозчеплення ротора як у перехідних, так і в усталених режимах роботи – система координат орієнтована за вектором I_s .

Використавши (2) і підставивши в (1) за умови $\widetilde{U}_r = 0$ отримуємо:

$$\begin{cases} U_{s1} = R_s i_{sm} + p(L_s i_{sm} + L_m i_{r1}) - \omega_k (L_m i_{r2}) \\ U_{s2} = p(L_m i_{r2}) + \omega_k (L_m i_{r1} + L_s i_{sm}) \\ 0 = R_r i_{r1} + p(L_r i_{r1} + L_m i_{sm}) - (\omega_k - \omega_r)(L_r i_{r2}) \\ 0 = R_r i_{r2} + p(L_r i_{r2}) + (\omega_k - \omega_r)(L_r i_{r1} + L_m i_{sm}) \end{cases} \quad (4)$$

Представимо у нормальній формі Коши:

$$\begin{cases} p(L_s i_{sm} + L_m i_{r1}) = -R_s i_{sm} - U_{s1} + \omega_k (L_m i_{r2}) \\ p(L_m i_{r2}) = -U_{s2} - \omega_k (L_m i_{r1} + L_s i_{sm}) \\ 0 = R_r i_{r1} + p(L_r i_{r1} + L_m i_{sm}) - (\omega_k - \omega_r)(L_r i_{r2}) \\ 0 = R_r i_{r2} + p(L_r i_{r2}) + (\omega_k - \omega_r)(L_r i_{r1} + L_m i_{sm}) \end{cases} \quad (5)$$

Після перетворень отримаємо:

$$\begin{cases} i_{r1} = \frac{1/R_r}{1+T_r p} ((\omega_k - \omega_r)L_r i_{r2} - L_m p i_{sm}) \\ i_{r2} = \frac{1/R_r}{1+T_r p} (\omega_k - \omega_r)(L_r i_{r1} + L_m i_{sm}) \\ U_{s1} = L_m p i_{r1} - \omega_k L_m i_{r2} + R_s i_{sm} + L_s p i_{sm} \\ U_{s2} = -L_m p i_{r2} - \omega_k (L_s i_{sm} + L_m i_{r1}) \end{cases}, \text{ де:} \quad (6)$$

$T_r = L_r/R_r$ – електромагнітна стала часу ротора.

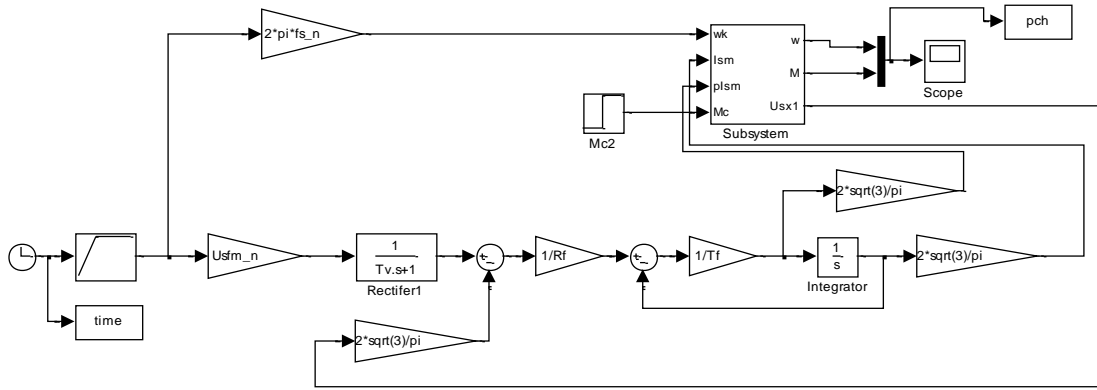


Рис. 3. Модель об'єкту «перетворювач частоти – асинхронний двигун» в системі координат орієнтованій за вектором струму статора

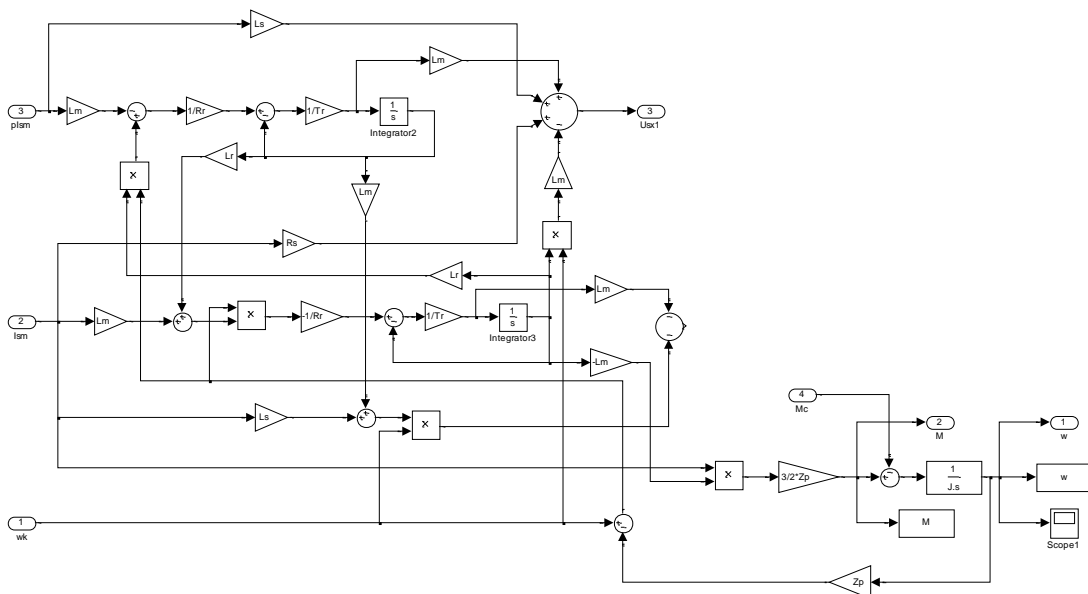


Рис. 4. Модель асинхронного двигуна в системі координат орієнтованій за вектором струму статора

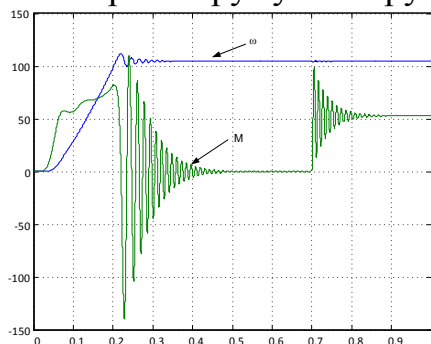


Рис. 5. Динамічні характеристики АД при пуску від перетворювача частоти
Синтез системи полягає в послідовному визначенні параметрів РС і РШ. Для визначення ПФ регулятора струму можна використовувати структурну схему.

Двигун представлений спрощеної передавальної функцією, отриманої з спрощеного математичного опису в синхронній системі координат.

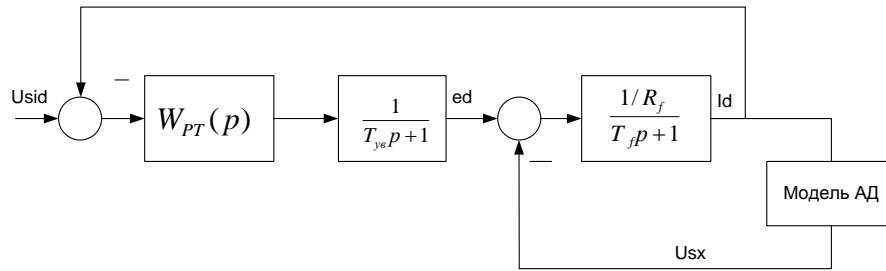


Рис.6. Структурна схема контуру струму в системі частотно-струмового управління на основі АІТ

На підставі структурної схеми можна визначити ПФ об'єкта регулювання для контуру струму:

$$W_{об.КРС}(p) = \frac{k_{ув}k_{д.с.}}{T_{ув}p+1} \cdot \frac{\rho_I/R_f}{\rho_I T_0 p+1}, \quad де: \quad (7)$$

$\rho_I = \frac{R_f}{R_f + k_I k_u R_{дв}/s}$ – безрозмірний коефіцієнт, що залежить від ковзання двигуна; k_I та k_u приймаємо рівними одиниці.

$$T_0 = T_f + \frac{k_I k_u R_{дв}}{R_f s} – стала часу об'єкта “АІС – АД”.$$

Переймаючись деяким настроювальним значенням ковзання s_0 , синтезують ПІ-регулятор струму з передавальної функцією:

$$W_{РС}(p) = \frac{\rho_I T_0 p + 1}{k_{ув} k_{д.с.} \frac{\rho_I}{R_f} T_f p} \quad (8)$$

Регулятор швидкості синтезують, виходячи з таких міркувань:

у контур регулювання швидкості, крім контуру струму, входять також ланки, що відображають формування електромагнітного моменту і швидкості АД. Між струмом статора і моментом існує нелінійна зв'язок, причому цей зв'язок відображен у функціональному перетворювачі ФП.

Перетворювач ФП формує сигнал заданого струму статора в функції абсолютного ковзання:

$$I_{s3} = \frac{\psi_{r3}}{L_m} \sqrt{1 + (\beta T_r)^2}, \quad де: \quad (9)$$

$\beta = \omega_s - \omega_r$ – абсолютне ковзання; $T_r = L_r / R_r$ – стала часу ротора АД.

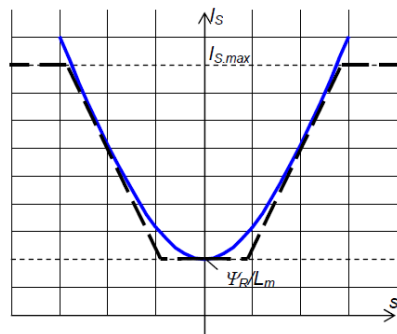


Рис. 7. Графічна залежність для визначення модуля вектору статора відносно заданого вектору потокозчеплення ротора

На основі цього було створено ПП-РШ, який був налаштований на модульний оптимум та має вид :

$$W_{\text{РШ}}(p) = \frac{T_T p + 1}{T_s p / 6 \cdot J p}, \text{ де:} \quad (10)$$

$T_s = 2 \cdot T_T$; коефіцієнт 6 було обрано для підвищення швидкодії системи; J – момент інерції двигуна.

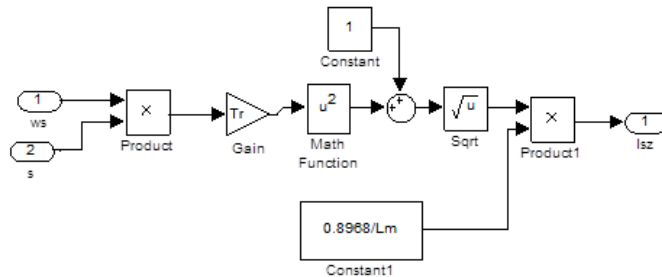


Рис. 8. Модель функціонального перетворювача, де $\psi_{r3} = 0.8968$ – потокозчеплення ротора.

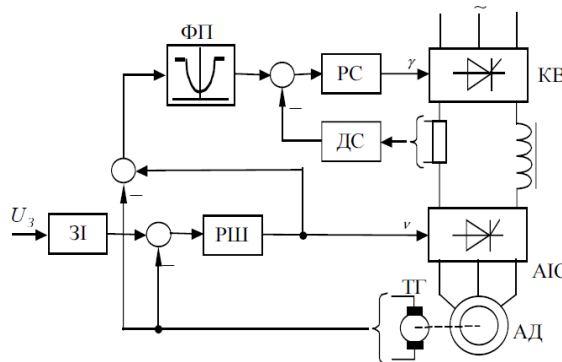


Рис. 9. Функціональна схема системи частотно-струмового управління з регулюванням спрямленого струму та швидкості

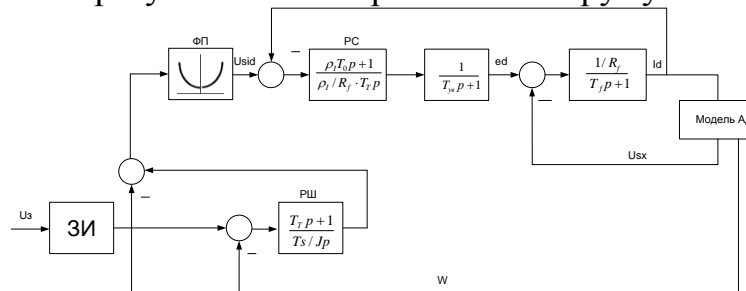


Рис. 10. Структурна схема системи частотно-струмового управління з регулюванням спрямленого струму та швидкості

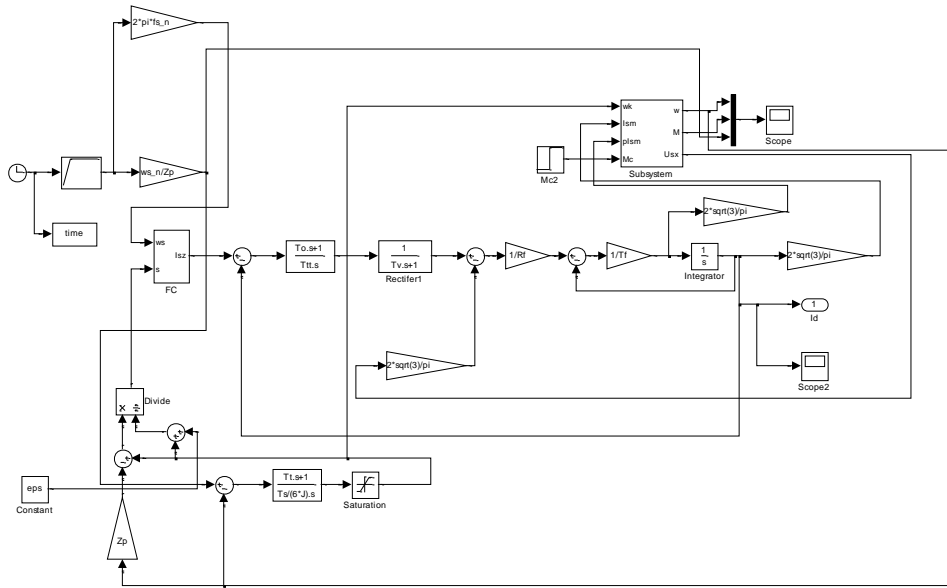


Рис. 11. Модель системи частотно-струмового управління з регулюванням спрямленого струму та швидкості

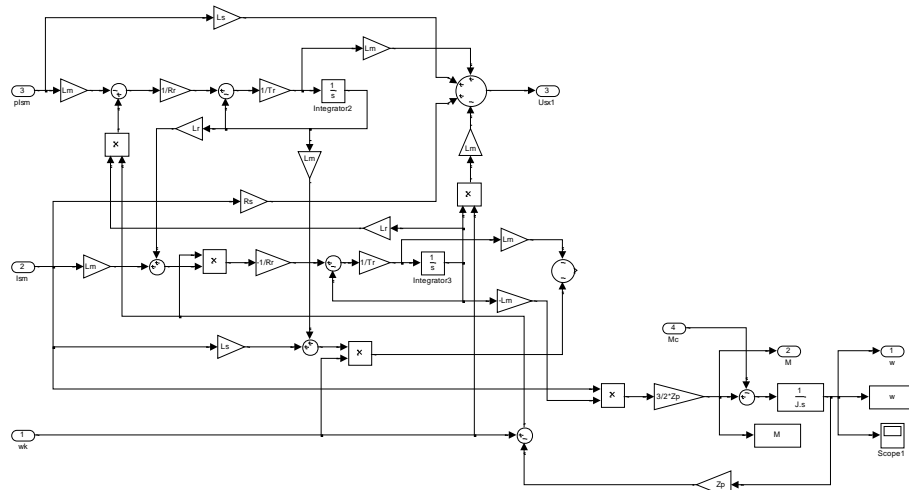


Рис. 12. Модель асинхронного двигуна в системі координат орієнтованій за вектором струму

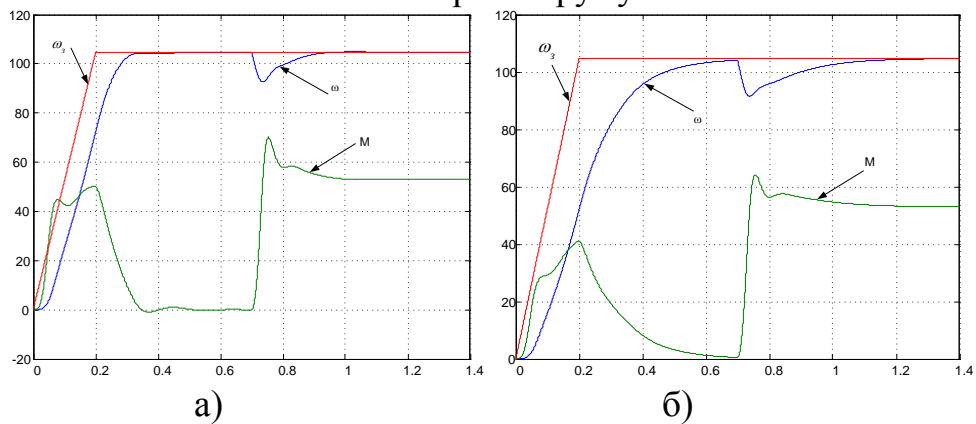


Рис. 13. Динамічні характеристики АД при роботі системи частотно-струмового управління з регулюванням спрямленого струму та швидкості та $T_T=2T_{VB}$ (а);

динамічні характеристики АД при роботі системи частотно-струмового управління з регулюванням спрямленого струму та швидкості та $T_T=4T_{УВ}$ (б).

Висновки

У результаті досліджень була змодельована система частотно-струмового керування швидкістю асинхронних двигунів на основі перетворювача частоти з керованим випрямлячем та автономним інвертором струму. Була вдосконалена структурна модель об'єкту "перетворювач частоти – асинхронний двигун" в системі координат орієнтованій за вектором струму статор та отримана "струмова" математична модель. Синтез регуляторів системи частотно-струмового управління з регулюванням спрямленого струму та швидкості стандартним способом для СПР також був змодельований. Виявлено, що всі контури не мають статичної помилки із-за використання ПІ-РС та ПІ-РШ. Були отримані перехідні характеристики при різних настройках контурів.

Список використаних джерел

1. Ofitsynyy sayt ministerstva enerhetyky ta vuhilnoyi promyslovosti Ukrainy. Informatsiyno-analitychnyy zvit pro rozvytok vuhilnoyi promyslovosti Ukrainy za sichen-lyuty 2014 roku (za faktychnymy danymy). [Elektroni resurs]. – Rezhym dostupu: http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/control/uk/publish/article?art_id=244926007&cat_id=194359;
2. І. А. Сыромјатников. Rezhim raboty asinhronnyh i sinhronnyh jelektrodvigatelej/ — 3-e izd., pererab. i dop. — М. ; L. : Gosjenergoizdat, 1963. — 528 s;
3. Chizhenko I. M., Andrienko P. D., Baran A. A. i dr. Spravochnik po preobrazovatelnoj tehnikе/ — Kiev : Tehnika, 1978. — 447 s;
4. І.Р. Chesnokov, А.Н. Petruhin. Perehodnye processy. Kurs lekcij. Chast 2. Kirov, 2007. 162 str.

Стаття надійшла до редакції 19.05.2014 р.

УДК 621.316.13

О. В. Кузьмик, аспірант, В. О. Комар, к.т.н., доцент (ІнЕЕЕМ ВНТУ)

АНАЛІЗ ВПЛИВУ РОЗОСЕРЕДЖЕНОГО ГЕНЕРУВАННЯ НА РЕЖИМ РОБОТИ РОЗПОДІЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ

О. Kuzmyk, postgraduate, V. Komar, cand. sc. (tech.), assoc. prof. (InPEEN VNTU)

ANALYSIS OF IMPACT DISPERSED GENERATION ON THE MODE OF THE ELECTRICAL DISTRIBUTION NETWORK