

УДК 62-83.621

Н.В. Єрмілова, С.Г. Кислиця, С.М. Рибка

Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка, Полтава

## ОЦІНКА ЗБУРЮВАЛЬНИХ ВПЛИВІВ В КОНТУРАХ СТРУМУ МІКРОПРОЦЕСОРНОЇ СИСТЕМИ ВЕКТОРНОГО КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ НА БАЗІ АД З КОРОТКОЗАМКНЕНИМ РОТОРОМ

Проведено оцінку збурювальних впливів в контурах струму розробленої системи векторного керування для різних типів регуляторів струму. Оцінка проводилася за такими показниками, як якість та швидкодія перехідного процесу за керуючим впливу, реакція системи на збурювальні впливи, робастність системи регулювання. Визначений тип регулятора з найкращими показниками.

**Ключові слова:** збурювальний вплив, мікропроцесорна система, асинхронний двигун.

### Вступ

**Постановка проблеми.** Динаміка ємності внутрішнього ринку металопродукції обумовлена змінами основних макропоказників розвитку економіки країни, розвитком машинобудування і металообробки, а також обсягами капіталовкладень. Виробництво метизів є однією з небагатьох експортно-орієнтованих галузей, однак Україна також активно імпортує металовироби, які не виробляються на підприємствах країни. Аналіз стану електрообладнання метизної промисловості показує, що головні електроприводи волочильних станів (ВС) і намотувальних пристроїв (НП) сталевого дроту мають знос до 80%, а використовувані системи електроприводів на базі асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором (АДКЗ) й електромагнітними муфтами ковзання характеризуються вкрай низькою ефективністю і надійністю. Тому підвищення продуктивності праці й зниження енерговитрат в метизній промисловості є актуальною науково-технічною задачею, вирішення якої пов'язане з реконструкцією чи повною заміною систем електроприводів.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** В створення і розвиток теорії й практики частотно-регульованого асинхронного електроприводу з векторним регулюванням координат значний внесок зробили видатні вчені різних країн [1 – 5]. Аналіз робіт показує на великі перспективи векторного регулювання координат та необхідність продовження досліджень у цьому напрямку.

**Мета статті** – розробка, дослідження та впровадження електроприводів намотувальних пристроїв сталевого дроту по системі перетворювач частоти ПЧ–АДКЗ з мікропроцесорним векторним регулюванням, що забезпечують збільшення продуктивності обладнання, зниження споживання електроенергії, зменшення капітальних витрат і відходів виробництва; дослідження різних типів регуляторів струму та визначення регулятора з найкращими показниками.

### Матеріал і результати дослідження

Для проведення оцінки збурювальних впливів в контурах струму розробленої системи векторного керування була побудована спрощена структурна схема АДКЗ в системі координат  $x$ - $y$ , яка наведена на рис. 1.

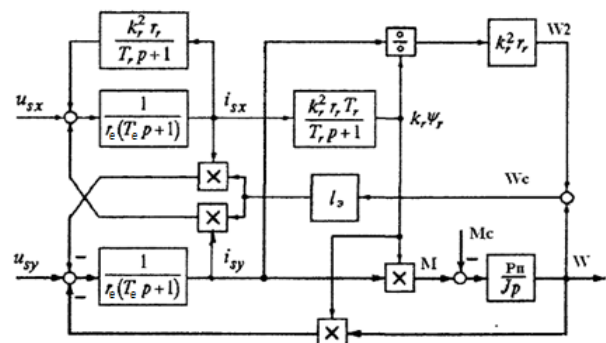


Рис. 1. Структурна схема АДКЗ в системі координат  $x$ - $y$ , яка орієнтована за вектором потокозчеплення ротора

На базі цієї схеми в програмі MATLAB була розроблена математична модель цифрової багатоконтурної системи векторного регулювання CAPvest, що включає в себе: регулятори струму по вісях  $d$  та  $q$ , регулятор потокозчеплення ротора, регулятор швидкості з регульованим статизмом, цифровий задатчик інтенсивності швидкості, блок взаємного обмеження струмів завдання та блок завдання потоку. За допомогою моделі була проведена оцінка збурювальних впливів в контурах струму.

Робота системи регулювання визначається такими показниками, як якість та швидкодія перехідного процесу по керуючому впливу, реакція системи на гасіння збурювальних впливів, робастність системи регулювання. За цими показниками були проаналізовані наступні регулятори струму:

1) пропорційно-інтегральний регулятор з налаштуванням на технічний оптимум (ІІ);

- 2) робастний регулятор з додатковим контуром адаптації;
- 3) двоконтурний (астатичний) регулятор;
- 4) ланцюговий регулятор;
- 5) подвійний регулятор струму.

Типовий ПІ-регулятор з налаштуванням на технічний оптимум має передавальну функцію

$$W_1(s) = \frac{U_{yn}(s)}{U_{ET}(s) - U_{OT}(s)} = \frac{R_E(1 + T_E S)}{2T_\mu K_{OT} K_{PI} S}, \quad (1)$$

де  $\psi_T$  – мінімальна постійна часу;  $i_{sy}$  – коефіцієнти зворотного зв'язку по струму та підсилення ПЧ;  $I_N$  – еквівалентний активний опір та постійна часу обмотки роторного ланцюга. За допомогою цієї функції компенсується інерційність якірної або статорної обмотки, та формується по керуючому впливу оптимальний перехідний процес. Робастний регулятор струму відрізняється від ПІ-регулятора додатковим ланцюгом з передавальною функцією

$$W_{22}(s) = \frac{dU_{22}(s)}{U_{OT}(s) - U_1(s)} = \frac{K_d S}{I_r T_d S}, \quad (2)$$

Сигнал формується тільки тоді, коли відбувається відхилення роботи основного ПІ-регулятора при впливі збурюючих перешкод або при параметричних змінах в контурі регулювання. Робастний регулятор тільки коригує роботу основного регулятора, а глибина коригування задається коефіцієнтом  $T_r$  та постійною часу  $T_d$ , причому при великих коефіцієнтах корекції може статися перекомпенсація ослаблення впливів, що збурюють.

Двоконтурний регулятор струму має два контури регулювання струму. Внутрішній (перший) контур має стандартний ПІ-регулятор:

$$W_{31}(s) = \frac{U_{yn}(s)}{U_{3PI}(s) - U_{OT}(s)} = W_1(s). \quad (3)$$

Зовнішній (другий) регулятор має інтегральну передавальну функцію, яка робить контур струму астатичним до впливу, що збурює:

$$W_{32}(s) = \frac{U_{3PI}(s)}{U_{3T2}(s) - U_{OT}(s)} = \frac{1}{4T_\mu S} = W_{52}(s); \quad (4)$$

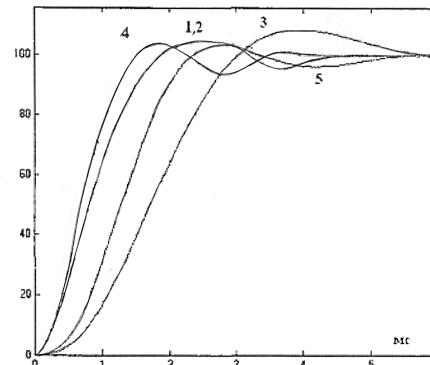
Ланцюговий регулятор повторює внутрішній контур двоконтурного регулятора, а зовнішній регулятор, за рахунок передавальної функції, забезпечує більшу швидкодію всього контуру:

$$W_4(s) = \frac{U_{3PI}(s)}{U_{3T2}(s) - U_{OT}(s)} = \frac{1 + 2T_\mu S}{2T_\mu S} = W_{52}(s); \quad (5)$$

Подвійний регулятор струму має два контури регулювання струму. Внутрішній (перший) контур має пропорційний регулятор, коефіцієнт підсилення якого формує аперіодичний перехідний процес та розраховується за формулою:

$$W_{51}(s) = \frac{U_{yn}(s)}{U_{3T1}(s) - U_{OT}(s)} = K_p = \frac{(T_3 - 2T_\mu) R_E}{2T_\mu K_o K}. \quad (6)$$

Зовнішній (другий) регулятор має таку ж інтегральну передавальну функцію (4), як двоконтурний регулятор  $\psi_T$ . На рис. 2 представлені перехідні процеси струму для заданих схем регуляторів при стрибку сигналу, що задає (керуючий вплив).



Рис/ 2/ Перехідні процеси в контурах струму

У табл. 1 наведені результати дослідження основних показників перехідних процесів (час максимуму  $t$  та величина перерегулювання  $\sigma$ ) для системи ПЧ-АДКЗ при  $\psi_T = 0,4$  мс,  $u_{sx}$ ,  $u_{sy} = 20$  мс та значеннях температурного коефіцієнта  $a = 1,0; 0,7; 1,5$  (температура обмотки  $\theta = 40; -40; 150^\circ\text{C}$ ).

Таблиця 1  
Показники перехідних процесів

Показник	Тип регулятора					
	1	2	3	4	5	a
t, мс	2,55	2,55	3,95	1,77	2,73	1,0
$\sigma$ , %	4,3	4,3	8,25	5,3	3,3	
t, мс	2,549	2,5	3,947	1,76	2,723	0,7
$\sigma$ , %	5,52	4,67	8,85	5,9	3,8	
t, мс	2,494	2,58	4,0	1,785	2,76	1,5
$\sigma$ , %	2,39	3,8	7,28	4,38	2,6	
$\Delta t$ , мс	-0,055	0,08	-0,053	-0,025	0,037	$\Delta 0,8$
$\Delta \sigma$ , %	-3,13	-0,87	-1,57	-1,52	-1,2	

Перехідні процеси та ЛАЧХ розраховувалися за допомогою програмного пакету MATLAB Simulink. Робастність регуляторів оцінювалася зміною часу максимуму  $\psi_T$  та зміною перерегулювання  $U_r = 0$  при температурних коефіцієнтах  $a_1 = 1,5; a_2 = 0,7$ . Проведений аналіз показав, що кращі показники робастності має робастний регулятор 2.

При збільшенні активного опору на 80% величина перерегулювання зменшилася для цього регулятора лише на 0,87% зі збільшенням часу максимуму на 0,08 мс, в той час, як у ПІ-регулятора 1 цей показник дорівнює 3,13%. Непогані показники у ланцюгового 4 – 1,52% та подвійного регуляторів 5 – 1,2%. Очевидно, що двоконтурний регулятор 3 в подальшому необхідно прибрати, адже у нього час максимуму майже в 2 рази більше ніж у інших регуляторів та перерегулювання становить 8,25%.

Вплив збурювальних дій регуляторів оцінювався по логарифмічних амплітудно-частотних характеристиках цих же змінних (рис. 3).

Похибка струму від дії ЕРС для ПІ-регулятора 1 має максимальне стає значення з часом перехідного процесу  $x$ .

Встановлене значення похибки для подвійного регулятора 5 в 24 рази менше, ніж у ПІ-регулятора, а час перехідного процесу  $\psi_T$  ( $\psi_{Tx} = \psi_T$ ). Решта регуляторів мають нульову сталу похибку, а час перехідного процесу можна порівняти з часом ПІ-регулятора 1, причому у двоконтурного регулятора 3 величина похибки перевищує похибку подвійного регулятора 5 більш ніж в два рази.

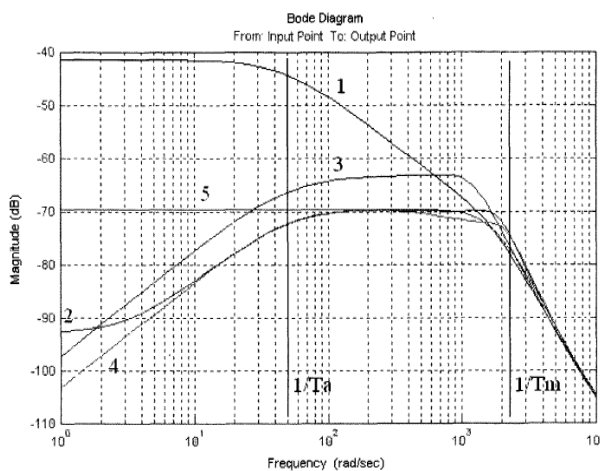


Рис. 3. ЛАЧХ контурів струму по збуренню від ЕРС в системі ПЧ-АДКЗ

Отримані перехідні процеси повністю пояснюються наведеними ЛАЧХ, за якими величина помилки від дії ЕРС визначається висотою ЛАЧХ. Характеристики всіх регуляторів на частотах, більших  $\psi_{IT}$ , мають нахил,  $-40$  дБ/дек, що говорить про добре гасіння високочастотних перешкод. Для регуляторів 2, 3 та 4 на низьких частотах нахил дорівнює  $+20$  дБ/дек до  $-63$  дБ, що говорить про невеликі помилки на низьких частотах або відсутність помилок по закінченню перехідного процесу. На низьких та середніх частотах ПІ-регулятор 1 має найвищу характеристику  $-42$  дБ, а на низьких частотах нахил характеристики дорівнює  $0$  дБ/дек, що говорить про

статистичну помилку по струму та максимальний час перехідного процесу.

Подвійний регулятор струму 5 має на низьких частотах характеристику  $-69,5$  дБ з нахилом  $0$  дБ (відмінність на  $27,5$  дБ), але ця ділянка на середніх частотах найнижча для всіх регуляторів, що говорить про мінімальний час перехідного процесу та статистичну похибку, яка в 24 рази менша, ніж у ПІ-регулятора.

## Висновки

Таким чином, проведені дослідження показують, що подвійний регулятор струму є найпростішим та відносно нескладним в налаштуванні, має гарні робастні характеристики, він трохи гірше гасить збурюючі впливи у порівнянні з іншими типами регуляторів, але при цьому має мінімальний час перехідних процесів, тому може бути рекомендований для застосування в мікропроцесорних системах регулювання ПЧ-АД.

## Список літератури

1. Васильковський Ю.Н., Коваленко М.А. Исследование устройства контроля короткозамкнутой обмотки ротора асинхронного двигателя // *Електротехніка і електромеханіка*, 2011. – № 6. – С. 18–22.
2. Дартау В.А., Рудаков В.В., Столяров И.М. Асинхронные электроприводы с векторным управлением / В.А.Дартау, В.В.Рудаков, И.М.Столяров. – Л.: Энергоатомиздат, 1987. – 342с.
3. Попович М.Г., Лозинський О.Ю., Клепиков В.Б. *Електромеханічні системи керування та електроприводи: Навч. посібник*. – К.: Либідь, 2005. – 680 с.
4. Рудаков В.В., Столяров И.М., Дартау В.А. Асинхронные электроприводы с векторным управлением. – Л.: Энергоатомиздат, 1987. – 136 с.
5. Чорний О.П., Луговой А.В., Родькін Д.Й., Сисюк Г.Ю., Садовой О.В. *Моделирование электромеханических систем*. – Кременчук, 2001. – 410 с.

Надійшла до редколегії 31.05.2016

**Рецензент:** д-р техн. наук, доц. О.В. Шульга, Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка, Полтава.

## ОЦЕНКА ВОЗМУЩАЮЩИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ В КОНТУРАХ ТОКА МИКРОПРОЦЕССОРНОЙ СИСТЕМЫ ВЕКТОРНОГО УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ НА БАЗЕ АД С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ

Н.В. Єрмилова, С.Г. Кислиця, С.М. Рыбка

Проведена оцінка возмущаючих воздействий в контурах тока разработанной системы векторного управления для разных типов регуляторов тока. Оценка проводилась по таким показателям, как качество и быстродействие переходного процесса по управляющему воздействию, реакция системы на возмущающее воздействие, робастность системы регулирования. Определен тип регулятора с наилучшими показателями.

**Ключевые слова:** возмущающее воздействие, микропроцессорная система, асинхронный двигатель.

## DISTURBANCES ESTIMATION IN THE CURRENT CIRCUITS OF MICROPROCESSOR VECTOR CONTROL FOR ELECTRIC DRIVE BASED ON SQUIRREL CAGE AD

N.V. Yermilov, S.G. Kyslytsia, S.M. Ribka

Carried out disturbances evaluation in the current circuits of developed vector control system for the different types of current regulators. The evaluation was conducted on indicators such as the quality and speed of transition process on the control action, system response on the disturbance, regulation system robustness. Determined the best performance type of regulator.

**Keywords:** disturbance, microprocessor system, asynchronous motor.