

процесів у стрижні короткозамкненої обмотки. / Фільц Р. В., Макарчук О. В. // *Технічна електродинаміка*. – 1995. – № 1. – С. 3–8. 3. Фільц Р. В. Математична модель узагальненої неявнополюсної електричної машини з урахуванням насичення основного магнітного кола. / Фільц Р. В., Гладкий В. М. // *Вісник ЛПІ. Електроенергетичні та електромеханічні системи*. – 1999. – №372. – С. 181 – 189. 4. Фільц Р. В. Оператор сдвига и его применение в задачах электромеханики // *Изв. вузов, Электромеханика*. – 1991. – № 4. – С. 5–12. 5. Макарчук О. В. Математичне моделювання електромеханічних перехідних процесів у явнополюсних електричних машинах: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.01. – Львів, 1996. – 203 с. 6. Чуа Л. О. Машинный анализ электронных схем. / Чуа Л. О., Пен-Мин Лин. // М.: Энергия. – 1980. – 638 с. 7. Повстенъ В. А. Использование интегральных уравнений для расчета электрических параметров роторных стержней асинхронных двигателей. // *Изв. вузов. Электромеханика*. – 1981. – № 4. – С. 374–379. 8. Сивокобыленко В. Ф. Математическое моделирование глубокопазных асинхронных машин. / Сивокобыленко В. Ф., Костенко В. И. // *Электричество*. – 1980. – № 4. – С. 32–36. 9. Цуканов В. В. Коэффициенты вытеснения тока и проводимости пазового рассеяния с учетом зазора между стержнем обмотки и пазом ротора электрической машины / Цуканов В. В., Георгиади В. Х. // *Электричество*. – 1990. – № 1. – С. 67–71. 10. Петрушин В. С. Влияние насыщения стали магнитопровода и вытеснения тока в обмотке ротора на динамические характеристики регулируемых асинхронных двигателей. / Петрушин В. С., Бухалфа Бендахман, Якимец А. М., Каленик О. В. // *Електротехніка і Електромеханіка*. – 2010. – № 2. – С. 21–23. 11. Сивокобыленко В. Ф. Математична модель асинхронного двигуна з урахуванням насичення сталі та витіснення струму в роторі / Сивокобыленко В. Ф., Василець С. В. // *Моделювання та інформаційні технології*. – 2013. – Вип. 69. – С. 3–10.

УДК 62-83:621.313.3

І. Р. Головач, Л. Ф. Карплюк, Б. Я. Панченко, В. Б. Цяпа
Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра електроприводу і комп’ютеризованих електромеханічних систем

СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ КРИВОШИПНО-ШАТУННОГО МЕХАНІЗМУ З НЕЛІНІЙНИМИ ЗВОРОТНИМИ ЗВ’ЯЗКАМИ

© Головач І. Р., Карплюк Л. Ф., Панченко Б. Я., Цяпа В. Б., 2016

Проаналізовано роботу системи керування електроприводу кривошипно-шатунного механізму. Розроблено методику налаштування регуляторів. Результати досліджень можуть бути використані під час розроблення нових систем електроприводів.

Ключові слова: кривошипно-шатунний механізм, електропривід, система регулювання, нелінійні зворотні зв’язки.

The control system of electric drives with Crankshaft mechanism load has been analyzed. Method of tuning speed feedback adjusting was developed. The result can be used for the designing new systems of electric drives.

Key words: crankshaft mechanism, electric drive, control system, nonlinear feedbacks.

Постановка задачі

Особливий інтерес становить застосування сучасних частотно-регульованих електроприводів змінного струму для машини з кривошипно-шатунними або ексцентриковими механізмами, робота

яких характеризується циклічно-змінними моментами інерції та навантаження. Як показав досвід експлуатації, впровадження на таких механізмах цих нових, потенційно енергоощадних систем електроприводу, не завжди дозволяє отримати сподіваного підвищення енергетичної ефективності. Особливістю таких механізмів є те, що значення еквівалентного моменту двигуна залежать від кута повороту кривошипа і можуть приймати від'ємні значення із підгальмовуванням електроприводу і необхідно додатково витратити енергію на відновлення швидкості механізму. Структура і параметри системи автоматичного регулювання, які вибрані з урахуванням можливості такого режиму дозволяють мінімізувати витрати енергії на роботу такої електромеханічної системи.

Аналіз останніх досягнень

Механізми зі змінним моментом інерції створюють змінне навантаження для електроприводу і тому, з метою зменшення потужності привідного двигуна, комплектуються механізмами накопичення кінетичної енергії – маховиками [1,2]. Необхідною вимогою цих механізмів є регулювання швидкості, тому для їх приведення в рух традиційно застосовують електропривід з двигунами постійного струму за їх живлення від генераторів постійного струму (система Г-Д). Останнім часом для таких електроприводів застосовують тиристорні перетворювачі з двигунами постійного струму (система ТП-Д) або швидкодіючі частотні перетворювачі з асинхронними та синхронними двигунами змінного струму (відповідно, системи ТПЧ-АД та вентильний двигун постійного струму) [3]. Формування статичних і динамічних характеристик сучасних систем електроприводу, зазвичай, здійснюють застосуванням двоконтурної системи підпорядкованого регулювання (СПР) з внутрішнім контуром струму, або, за можливістю, моменту та зовнішнім контуром швидкості з налаштуванням регуляторів за принципом “технічної оптимізації”. У такому випадку система електроприводу забезпечує основні якісні показники процесів регулювання координат: перерегулювання не перевищують допустимі значення, забезпечується точна стабілізація швидкості при зміні навантаження. Але в режимах гальмування повзуна механізмів з маховиками за точної стабілізації швидкості привідного двигуна механізму момент досягає від'ємних значень і пригальмовує швидкість обертових мас, які в такому режимі повинні відбирати кінетичну енергію за рахунок збільшення швидкості, що призводить до погіршення енергетичних показників системи електроприводу, а за використання частотно-керованого електроприводу з ланкою постійного струму і некерованим випрямлячем в колах живлення інвертора, тобто, без повернення енергії в мережу живлення перетворювача, ще й до перенапруг на конденсаторах, що спричиняє аварійні відмикання перетворювача частоти.

У роботах [4–6] пропонуються такі способи впливу на електропривід для забезпечення роботи без входження в режими рекуперації:

- формування м'якої механічної характеристики,
- введення відсічки за режимом рекуперації,
- застосування вузла посилення зворотного зв'язку за моментом у режимах зміни знака моменту.

Мета досліджень

Метою роботи є вдосконалення структури системи підпорядкованого регулювання електроприводу механізму зі змінним моментом інерції та дослідження особливостей її налаштування і роботи при нахилі генераторного навантаження.

Виклад основного матеріалу

Структурна схема системи регульованого електроприводу, яка відповідає його роботі на лінійній ділянці механічної характеристики, приведена до відносних одиниць, зображена на рис. 1, а. Система керування – двоконтурна СПР з внутрішнім контуром регулювання моменту M_d (регулятор РМ) та зовнішнім контуром регулювання швидкості ω_d (регулятор РШ).

На схемі позначено: T_e , T_{em} – електромагнітна і електромеханічна сталі часу електроприводу, T_u – еквівалентна стала часу перетворювача частоти.

Обчислюємо параметри регуляторів для електроприводу ТПЧ-АД з двигуном потужністю $P_n = 45$ кВт, $n_n = 1450$ об/хв ($T_e = 0.02$ с, $T_{em} = 0.3$ с, $T_u = 0.002$ с).

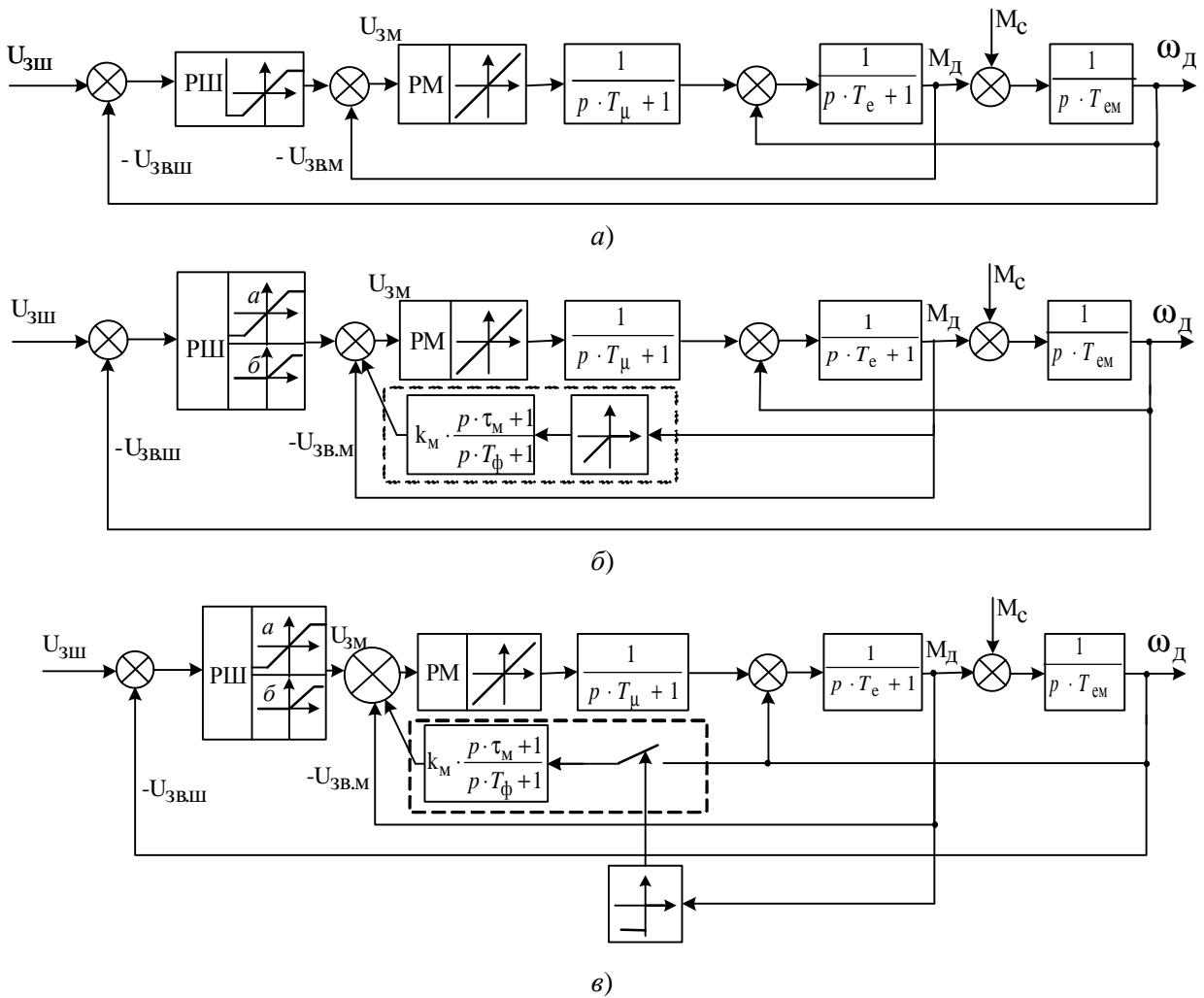


Рис. 1. Структурні схеми електроприводу

Призначення внутрішнього контуру регулювання – компенсація електромагнітної сталої двигуна T_e і він може бути налаштованим за "технічним оптимумом" з коефіцієнтом оптимізації $a_m = 2$. За умови формування крутопадаючої характеристики на відрізку формування моменту, необхідно застосувати ПІ-регулятор моменту з такою передатною функцією :

$$W_{PM}(p) = \frac{p \cdot T_e + 1}{p \cdot a_m \cdot T_\mu} = 10 + \frac{1}{0,004p} \quad (1)$$

Зовнішній контур регулювання, з метою компенсації механічної інерційності і забезпечення максимальної швидкодії, налаштовують з коефіцієнтом оптимізації $a_{ш} = 2$. Для цього необхідний ПІ-регулятор швидкості з коефіцієнтом підсилення:

$$k_{PII} = \frac{T_{ем}}{a_{ш} \cdot T_{шш}} = 75 \quad (2)$$

Система електроприводу з таким налаштуванням регуляторів забезпечить запроєктовану швидкодію з перерегулюванням регульованих координат 4,3%. Статична точність підтримання швидкості становить

$$\frac{\Delta\omega_3}{\omega_H} = \frac{a_{ш} \cdot T_{шш}}{T_{ем}} \cdot \frac{\Delta\omega_p}{\omega_H} \quad (3)$$

де $\Delta\omega_p$, $\Delta\omega_3$ – відповідно статична похибка розімкненої та замкненої системи електроприводу.

Дослідження роботи електроприводу проведено на математичній моделі в середовищі "Matlab Simulink". Перехідні процеси в електроприводі при розгоні, накиді навантаження в першому і дру-

гому квадрантах наведені на рис. 2, а. Як видно, система електроприводу забезпечує стабілізацію швидкості з входженням у режим рекуперації енергії. Для покращення енергетичних показників роботи електроприводу кривошипно-шатунного механізму, як було зазначено вище, необхідно уникати зміни знака моменту двигуна. У такому разі ротор двигуна і приєднані до нього махові маси зможуть збільшити швидкість, відбираючи кінетичну енергію повзуна під час його гальмування.

У роботі [5] розроблена методика вибору параметрів регулятора швидкості, який забезпечує зниження жорсткості ділянки стабілізації швидкості двигуна за допомогою збільшення коефіцієнта оптимізації контуру регулювання швидкості вище від значення, рекомендованого для налаштування за критерієм «технічної оптимізації» ($a_{ш} > 2$), що, як відомо, призведе до зменшення швидкодії системи електроприводу. Ще одним істотним недоліком такої системи є параметрична чутливість до нестабільності амплітуд навантаження. Вказаного недоліку уникають, реалізуючи в системі регулювання двох інших способів, зокрема (як це показано на рис.1, б), введенням одноквADRANTНОЇ характеристики регулятора швидкості типу б, впливом на внутрішній контур регулювання моменту [6] нелінійним зворотним зв'язком із його істотним посиленням в зоні від'ємних моментів (вузол обведено пунктиром), причому у [6] показано, що перевагу слід віддати останньому. Дослідження показали, що у таких системах можливе досягнення поставленого завдання, але наявні перерегулювання моменту все ж сягають від'ємних значень. У роботі [7] встановлені переваги введення зворотного зв'язку за вихідною регульованою координатою, у нашому випадку це швидкість у режимах, коли необхідно зменшення перерегулювання проміжної координати – моменту. Тобто система регулювання повинна під час досягнення моменту від'ємних значень вводити сильний зворотний зв'язок за швидкістю. Класична ділянка застосування такої системи – обмеження викидів струмів і моментів копаючих механізмів екскаваторів у режимах жорстких стопорінь.

Для формування одноквADRANTНОЇ механічної характеристики системи такого типу пропонується застосувати додатковий зворотний зв'язок (рис. 1, в) з коефіцієнтом передачі $k_{ш}$, який вводиться при переході в другий квадрант механічної характеристики. Для забезпечення стійкої роботи системи одночасно з посиленням коефіцієнта зворотного зв'язку доцільно ввести сигнал за його похідною з коефіцієнтом передачі $\tau_{ш}$.

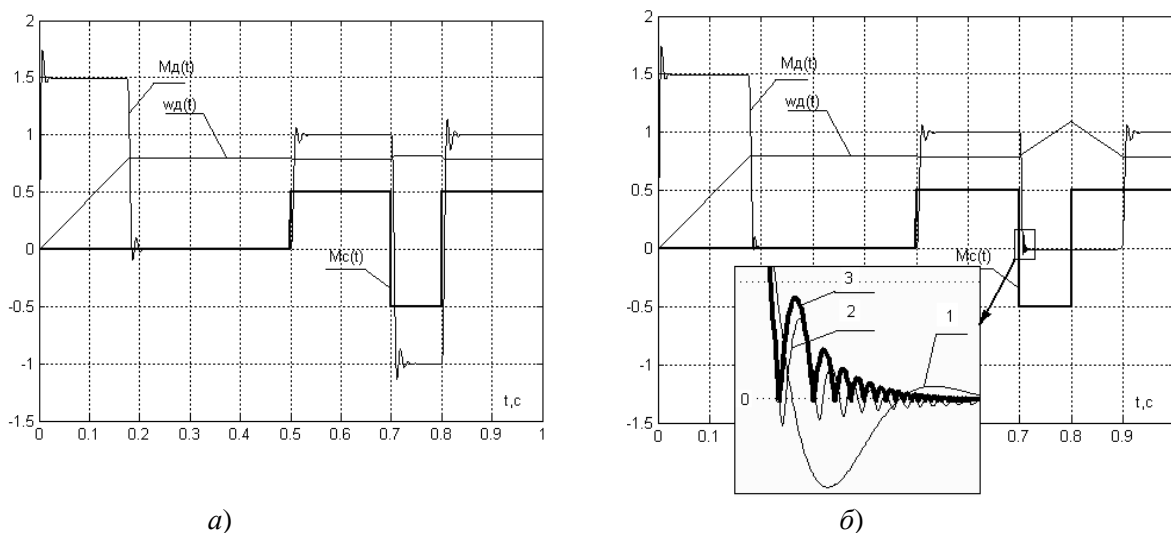


Рис. 2. Перехідні процеси в системі електроприводу

У структурній схемі він фігурує, як реальна форсуюча ланка з передавальною функцією

$$W_{PM}(p) = \frac{p \cdot \tau_{ш} + 1}{p \cdot T_{\phi} + 1},$$

де $T_{\phi} = 0,001$ с.

Граничні параметри зворотного зв'язку, за якого система залишається стійкою, можна визначити за методикою, запропонованою в [8]. Реалізується такий алгоритм розрахунку коефіцієнта жорсткого зворотного зв'язку та сталої часу гнучкого зворотного зв'язку:

- Знаходимо передавальну функцію замкненої системи:

$$W_3(p) = \frac{b_1 \cdot p + b_0}{a_4 \cdot p^4 + a_3 \cdot p^3 + a_2 \cdot p^2 + a_1 \cdot p + a_0} = \frac{0,0006p + 0,3}{0,3 \cdot 10^{-7} p^4 + 4,57 \cdot 10^{-5} p^3 + 0,016p^2 + (k \cdot \tau + 0,353)p + k + 1} \quad (4)$$

де $a_4 = T_e T_\mu T_\phi T_{em} = 0,3 \cdot 10^{-7}$;

$$a_3 = T_e T_{em} (T_\mu + T_\phi) + (T_e + T_{em}) T_\mu T_\phi = 4,57 \cdot 10^{-5};$$

$$a_2 = T_e T_{em} + (T_e + T_{em})(T_\mu + T_\phi) + T_\mu T_\phi = 0,016;$$

$$a_1 = k\tau + T_e + T_\mu + T_\phi + T_{em} = k_{ш} \tau_{ш} + 0,353;$$

$$a_0 = k_{ш} + 1;$$

$$b_1 = T_e T_{em} = 0,0006;$$

$$b_0 = T_{em} = 0,3.$$

- Замість p підставляємо $j\omega$ і знаходимо дійсну $M(\omega)$ та уявну $N(\omega)$ частини характеристичного рівняння:

$$W(j\omega) = \frac{0,0006p + 1}{k + M(\omega) + j \cdot [N(\omega) + \tau \cdot k \cdot \omega]}, \quad (5)$$

$$M(\omega) = 0,3 \cdot 10^{-7} \omega^4 - 0,016\omega^2, \quad (6)$$

$$N(\omega) = -4,57 \cdot 10^{-5} \omega^3 + 0,353\omega. \quad (7)$$

- З рівнянь для дійсної та уявної частин знаходимо:

$$k_{ш} = -M(\omega), \quad (8)$$

$$\tau_{ш} = -N(\omega) / \omega \cdot k_{ш}. \quad (9)$$

- Диференціюючи рівняння (6) за частотою ω , знаходимо:

$$\frac{dk}{d\omega} = \frac{dM(\omega)}{d\omega} = 1,2 \cdot 10^{-7} \omega^3 - 0,32\omega.$$

- Знаходимо значення частоти, для якої $\frac{dM(\omega)}{d\omega} = 0$, в нашому випадку воно становить

$$\omega = 517 \text{ Гц.}$$

- Підставляючи значення частоти в рівняння (8) і (9), знаходимо параметри $k_{ш} = 2150$ і $\tau_{ш} = 0,0056$.

Перехідні процеси в електроприводі із запропонованими структурами електроприводів наведені на рис 2, б. Окремо виділено зміни знака моментом двигуна при накиді генераторного навантаження. Як показує аналіз, тут середнє значення моменту двигуна не досягає від'ємних значень, що відповідає безрекупративним режимам роботи електроприводу. Швидкість двигуна при накиді навантаження, яке відповідає другому квадранту механічної характеристики, збільшується, що дозволяє маховим масам накопичувати енергію без перетоку її через двигун. Для зміни моменту двигуна у системі з одноквадрантним регулятором швидкості (позначено індексом 1) і з вузлом обмеження режимів рекуперації з нелінійними зворотним зв'язкам за моментом (позначено індексом 2) мають місце перерегулювання координат, які сягають від'ємних значень. Перерегулювання відсутні лише в системі і з введенням додаткового зворотного зв'язку за швидкістю (позначено індексом 3).

Висновки

1. Використання електроприводу з системою підпорядкованого регулювання для кривошипно-шатунних механізмів вимагає зміни структури системи автоматичного регулювання.
2. Перевагу слід віддати системам керування з можливістю введення додатного зворотного зв'язку за швидкістю в другому квадранті робочих характеристик.
3. Запропонована структура контуру регулювання моменту дозволить забезпечити вимоги до електроприводу кривошипно-шатунного механізму.

1. Андреев В. П. Основы электропривода / В. П. Андреев, Ю. А. Сабинин / М. Л.: Энергоиздат, 1963. – 772 с. 2. Гейлер Л. Б. Электропривод в тяжелом машиностроении. / Л. Б. Гейлер. – М.: Машигиз, 1958. – 587 с. 3. Piotr Huryn. Serwonapedy B&R Acorpos // Napedy i sterowanie. – 2004. – № 718(63/64). – Р. 18–20. 4. Карплюк Б. Л. Обмеження перенапруг на ланці постійного струму частотно-керованого електропривода зі змінним моментом інерції та навантаження / Карплюк Б. Л., Карплюк Л. Ф., Лозинський А. О. / Вісн. нац. ун-ту «Львівська політехніка»: «Електроенергетичні та електромеханічні системи». – 2007. – № 587. – С. 22–27. 5. Карплюк Б. Л. Вибір параметрів регулятора швидкості системи електроприводу для навантаження з кривошипно-шатунним механізмом / Б. Л. Карплюк, Л. Ф. Карплюк, Б. Я. Панченко // Вісн. нац. ун-ту «Львівська політехніка»: «Електроенергетичні та електромеханічні системи» – 2008. – № 563. – С. 39–42. 6. Карплюк Б. Л. Система керування електроприводу кривошипно-шатунного механізму / Л. Ф. Карплюк, Б. Я. Панченко / Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика. Тематичний випуск наук. тен. журналу ЕКОінформ. – Львів: Вид-во ЕКОінформ, 2009. – № 2. – С. 11–13. 7. Лозинський О.Ю. Удосконалення системи керування екскаваторними електроприводами що працюють у режимах перевантажень / О. Ю. Лозинський, Б. Я. Панченко, В. Б. Цяпа, Л. Ф. Карплюк / Вісн. нац. ун-ту «Львівська політехніка»: «Електроенергетичні та електромеханічні системи». – 2009. – № 563. – С. 132–137. 8. Patranabis D. On the application of the first derivation action to increase the critical gain in linear feedback system / Patranabis D. // Int. J. Control. – 1972. – № 2.