

ПІДПОРЯДКОВАНА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ КООРДИНАТАМИ ЕЛЕКТРОПРИВОДА НА ОСНОВІ КОНЦЕПЦІЇ ЗВОРОТНИХ ЗАДАЧ ДИНАМІКИ

*М. Я. Островерхов, к.т.н., доц., В. М. Пижов, к.т.н., доц., М. П. Бурик, асп.
Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут"
пр. Перемоги, 37, 03056, м. Київ, Україна
E-mail: ostroverkhov@fea.kpi.ua*

Розглянуто метод підвищення якості керування координатами електропривода шляхом синтезу законів керування на основі концепції зворотних задач динаміки при мінімізації локальних функціоналів миттєвих значень енергій, що забезпечує слабку чутливість до параметричних та координатних збурень.

Ключові слова: бажана якість керування, зворотна задача динаміки.

Вступ. Однією з проблем практичного застосування законів керування координатами електроприводів, отриманих на підставі методів класичної теорії автоматичного керування, є необхідність наявності повної та достовірної інформації про структуру та параметри об'єкта керування, бо ці закони за своєю природою є компенсаційного типу. Наприклад, передаточні функції регуляторів струму, швидкості, положення та інших координат електропривода, що налаштовані на поширений модульний або симетричний оптимум компенсують відповідні ланки об'єкта керування з метою одержання необхідної передаточної функції контуру керування. У результаті для забезпечення заданої якості керування потрібні точні значення параметрів об'єкта, а при їх зміні – додаткові алгоритми ідентифікації або адаптації, що підвищує складність і громіздкість системи керування.

Аналіз попередніх досліджень. Серед методів синтезу законів керування, які забезпечують слабку чутливість до параметричних збурень, найбільш придатні релейні чи згладжені методи зі змінною структурою, комбіновані методи із спостерігачем невизначеності та методи зворотних задач динаміки [1–3]. Розвиток зворотної задачі динаміки обумовлений сучасною проблемою керування складними, в

основному механічними, об'єктами, у ході якого необхідно знайти керуючу дію за математичною моделлю об'єкта, його початковим станом та заданою траєкторією руху. Пошук керуючих функцій здійснюється при мінімізації локальних функціоналів миттєвих значень енергій руху. Характерною рисою оптимізації є досягнення не абсолютного мінімуму функціонала якості, що характерно для традиційних систем, а деякого мінімального значення, яке відповідає допустимій за технологічними умовами динамічній похибці системи.

Мета роботи. Підвищення якості керування системою підпорядкованого регулювання координат електропривода шляхом синтезу регуляторів на основі концепції зворотних задач динаміки при мінімізації локальних функціоналів миттєвих значень енергій.

Матеріал і результати дослідження. Методика синтезу законів керування викладається на прикладі відомої і поширеної системи підпорядкованого регулювання швидкістю двигуна постійного струму з незалежним збудженням, яка зображена на рис.1. Для простоти викладання матеріалу в системі прийняті одиничні зворотні зв'язки за швидкістю ω та струмом якоря I двигуна.

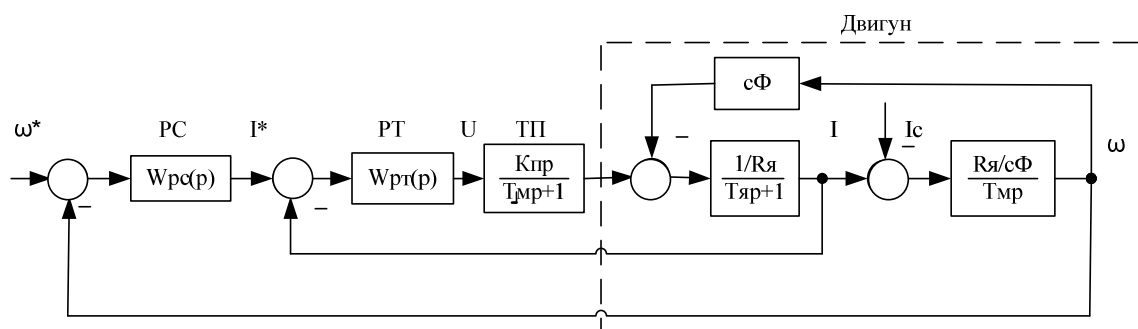


Рисунок 1 – Структурна схема електропривода

Об'єктом керування внутрішнього контуру струму є ланка якорного кола двигуна, яка при нехтуванні некомпенсованою сталою часу T_μ та дією ЕРС описується диференціальним рівнянням першого порядку $I + (1/T_\mu)I = [k_{np} / (R_{\Sigma} T_\mu)]u$, де: k_{np} – коефіцієнт передачі силового перетворювача; R_{Σ} – сумарний

опір якорного кола; T_μ – електромагнітна стала часу; u – сигнал керування регулятора струму. Бажана якість керування замкнутого контуру струму задається диференціальним рівнянням першого порядку, що забезпечує монотонний перехідний процес з астатизмом першого порядку [4] $\dot{z} + \gamma_0 z = \gamma_0 I^*$, де: I^* – зада-

ний струм. За допомогою коефіцієнту $\gamma_0 = 3/t_{mn}$ задається необхідна тривалість перехідного процесу t_{mn} . Ступінь наближення реального процесу до бажаного оцінюється функціоналом, який характеризує нормовану за індуктивністю енергію першої похідної магнітного поля $G(u) = \frac{1}{2} [\dot{z}(t) - \dot{I}(t, u)]^2$. При знаходженні керуючої функції $u=u(I)$ класичними методами, за умови абсолютного мінімуму функціонала $\min_u G(u)=0$, отримується традиційний закон керування компенсаційного типу, для реалізації якого необхідна точна інформація про структуру та параметри об'єкту, тобто функції $f(I, u)$. Відхилення параметрів об'єкту від розрахункових значень призводить до погіршення якості керування.

Цей недолік усувається, якщо відмовитися від точного виконання умови $\min_u G(u)=0$, а обмежитися вимогою, щоб значення функціонала належало околиці екстремуму-мінімуму, що забезпечує допустиму за технічними умовами динамічну похибку.

Для цього мінімізація функціоналу здійснюється за градієнтною схемою першого порядку [3]

$$\frac{du(t)}{dt} = -\lambda_i \frac{dG(u)}{du},$$
 (де $\lambda_i > 0$ – константа). Після чого закон керування струмом якоря приймає вигляд (де k_i – коефіцієнт підсилення регулятора струму):

$$\begin{aligned} u(t) &= k_i (z - I); \\ z &= \gamma_0 \int (I^* - I) dt. \end{aligned} \quad (1)$$

Як видно з системи рівнянь (1), регулятор струму якоря вміщує тільки параметр γ_0 бажаного закону керування та не залежить від параметрів об'єкту керування, що характерно для класичних законів керування. Це надає системі керування властивості природної адаптації, тобто слабкої чутливості до параметричних збурень.

Дуже важливим є те, що для побудови структури регулятора не потрібна детальна математична модель об'єкту керування, достатньо знати тільки характер взаємозв'язку, тобто порядок диференційного рівняння. Перевагою закону керування з точки зору подальшої реалізації є відсутність операцій диференціювання.

Підставивши закон керування струмом якоря (1) в рівняння об'єкта внутрішнього контуру струму, отримуємо диференціальне рівняння замкнутого контуру струму якоря

$$\ddot{I} + \left(\frac{1}{T_\mu} + \frac{k_{np} k_i}{R_{\Sigma} T_\mu} \right) \dot{I} + \frac{\gamma_0 k_{np} k_i}{R_{\Sigma} T_\mu} I = \frac{\gamma_0 k_{np} k_i}{R_{\Sigma} T_\mu} I^*$$

яке показує, що замкнута система є стійкою навіть при необмеженому підвищенні коефіцієнта підсилення регулятора струму $k_i \rightarrow \infty$, бо згідно критерію Гурвиця коефіцієнти рівняння замкнутого контуру струму є додатні

$$\left(\frac{1}{T_\mu} + \frac{k_{np} k_i}{R_{\Sigma} T_\mu} \right) > 0; \quad \frac{k_{np} k_i}{R_{\Sigma} T_\mu} \gamma_0 > 0.$$

Повне наближення реальної та бажаної якості керування має місце при коефіцієнті підсилення регулятора $k_i \rightarrow \infty$, це очевидно, якщо всі члени рівняння замкнутого контуру струму якоря поділити на

$$\frac{k_{np} k_i}{R_{\Sigma} T_\mu}.$$

Звичайно, при допустимому з точки зору технічної реалізації коефіцієнті підсилення існує похибка керування, максимально допустима величина якої встановлюється технічними вимогами.

Важливою задачею є визначення властивостей контуру струму при кінцевих значеннях коефіцієнта підсилення регулятора. Передавальна функція розімкнутого контуру струму, яка отримана на основі диференційного рівняння замкнутого контуру струму якоря,

$$W_{pi}(p) = \frac{(k_n / (R_{\Sigma} T_\mu)) k_i \gamma_0}{p [p + (1/T_\mu + k_{np} k_i / (R_{\Sigma} T_\mu))]},$$

що контур струму має астатизм першого порядку та добротність за швидкістю, рівну

$$D_\omega = \frac{\gamma_0}{R_{\Sigma} / k_{np} k_i + 1}.$$

Умовою забезпечення допустимої похибки струму якоря є співвимірність задана та реальна добротність $D_\omega = D_\omega^3$, що виконується при великому коефіцієнті підсилення регулятора струму.

У контурі струму знаходиться мала постійна часу силового перетворювача T_μ , що не враховувалась при синтезі закону керування. Оцінка впливу неврахованої інерційності на динамічні властивості контуру струму здійснюється за допомогою рівняння замкнутої системи, яке отримане аналогічно рівнянню замкнутого контуру струму якоря без урахування сталої часу силового перетворювача T_μ :

$$T_\mu \ddot{I} + \frac{T_\mu + T_\mu}{T_\mu} \dot{I} + \frac{R_{\Sigma} + k_{np} k_i}{R_{\Sigma} T_\mu} I = \frac{\gamma_0 k_{np} k_i}{R_{\Sigma} T_\mu} I^*$$

Відповідно критерію Гурвиця, для стійкості контуру струму вимагається виконання наступної умови, а саме: $\gamma_0 < (T_\mu + T_\mu) / (T_\mu T_\mu)$. Таким чином, стала часу T_μ обмежує максимально допустиму бажану швидкодію контуру струму, яка задається коефіцієнтом γ_0 .

При синтезі закону керування регулятора швидкості нехтується інерційність оптимізованого контуру струму на основі припущення, що задана швидкодія контуру швидкості буде суттєво меншою за швидкодію контуру струму. При цьому об'єкт керування регулятора швидкості описується диференціальним рівнянням першого порядку $\dot{\omega} = [(R_{\Sigma} / c\Phi) / T_M] I^*$, де: T_M – електромеханічна стала часу; $c\Phi$ – коефіцієнт кола збудження.

Для об'єкту першого порядку порядок рівняння бажаної якості керування швидкістю також приймається рівним одиниці з забезпеченням астатизму першого порядку та заданою добротністю за швидкістю $D_\omega^3 = \alpha_0$ [4] $\dot{z} + \alpha_0 z = \alpha_0 \omega^*$, де ω^* – задана швидкість. За допомогою коефіцієнту $\alpha_0 = 3/t_{mn}$ задається необхідна тривалість перехідного процесу t_{mn} . Ступінь наближення реального процесу до бажаного оцінюється функціоналом, який характеризує нормовану за моментом інерції енергію першої похідної

кінетичної енергії $G(I^*) = \frac{1}{2}[\dot{z}(t) - \dot{\omega}(t, I^*)]^2$. Мінімізація функціоналу здійснюється за градієнтним законом першого порядку [3]: $\frac{dI^*(t)}{dt} = -\lambda_{\omega} \frac{dG(I^*)}{dI^*}$,

де $\lambda_{\omega} > 0$ – константа. Після чого закон керування струмом якоря приймає вигляд:

$$I^*(t) = k_{\omega}(z - \omega); \quad (2)$$

$$z = \alpha_0 \int (\omega^* - \omega) dt.$$

де k_{ω} – коефіцієнт підсилення регулятора швидкості

Зі збільшенням коефіцієнта підсилення регулятора швидкості динамічні процеси в контурі наближаються до заданого рівняння. Система, відповідно критерію Гурвиця, є стійкою навіть при необмеженому збільшенні коефіцієнта підсилення регулятора швидкості $k_{\omega} \rightarrow \infty$, що видно з рівняння замкнутого контуру швидкості:

$$\ddot{\omega} + \frac{k_{\omega} R_{\Sigma}}{c\Phi \cdot T_M} \dot{\omega} + \frac{\alpha_0 k_{\omega} R_{\Sigma}}{c\Phi \cdot T_M} \omega = \frac{\alpha_0 k_{\omega} R_{\Sigma}}{c\Phi \cdot T_M} \omega^*.$$

Передаточна функція розімкнутого контуру швидкості $W_{p\omega}(p) = \frac{(R_{\Sigma} / (c\Phi \cdot T_M)) \alpha_0 k_{\omega}}{p(p + k_{\omega} (R_{\Sigma} / (c\Phi \cdot T_M)))}$

показує, що система володіє заданим астатизмом першого порядку та заданою добротністю по швидкості, яка дорівнює $D_{\omega} = D_{\omega}^3 = \alpha_0$ при помірних коефіцієнтах підсилення регулятора швидкості k_{ω} .

Оцінка впливу неврахованої при синтезі інерційності контуру струму на динамічні властивості контуру швидкості здійснюється за допомогою характеристичного рівняння замкнутої системи

$$\frac{c\Phi \cdot T_M}{\gamma_0 R_{\Sigma}} p^3 + \frac{c\Phi \cdot T_M}{R_{\Sigma}} p^2 + k_{\omega} p + k_{\omega} \alpha_0 = 0.$$

Для стійкості контуру швидкості вимагається

виконання наступної умови: $\frac{c\Phi \cdot T_M}{R_{\Sigma}} k_{\omega} > \frac{c\Phi \cdot T_M}{\gamma_0 R_{\Sigma}} k_{\omega} \alpha_0$,

яка перетворюється на нерівність $\gamma_0 > \alpha_0$. Таким чином, інерційність контуру струму обмежує бажану швидкодію контуру швидкості.

Для забезпечення контуру швидкості астатизму другого порядку за керуючою дією рівняння, яким задається бажана якість, керування повинно мати другий порядок $\ddot{z} + \alpha_1 \dot{z} + \alpha_0 z = \alpha_1 \dot{I}^* + \alpha_0 I^*$. За допомогою коефіцієнтів α_1 та α_0 задається на основі кореневих методів чи стандартних поліномів [4] тривалість та вид перехідного процесу швидкості. Ступінь наближення реального процесу до бажаного оцінюється функціоналом, який характеризує нормовану за моментом інерції енергію другої похідної

кінетичної енергії $G(I^*) = \frac{1}{2}[\ddot{z}(t) - \ddot{\omega}(t, I^*)]^2$. У результаті мінімізації закон керування швидкістю приймає вид:

$$I^*(t) = k_{\omega}[z - \omega];$$

$$z = \int f_0 dt; \quad (3)$$

$$f_0 = \alpha_0 \int (\omega^* - \omega) dt + \alpha_1 (\omega^* - \omega).$$

Структурна схема регулятора швидкості, побудована за рівнянням (3), представлена на рис. 2. Цей регулятор також має тільки параметри бажаного закону керування α_0 та α_1 , за допомогою яких встановлюється необхідне перерегулювання та час перехідного процесу швидкості.

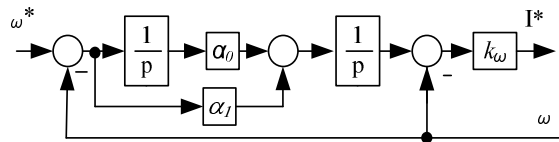


Рисунок 2 – Структурна схема регулятора швидкості

З передаточної функції розімкнутого контуру швидкості для закону керування

$$W_{p\omega}(p) = \frac{(R_{\Sigma} / (c\Phi \cdot T_M)) \alpha_1 k_{\omega} p + (R_{\Sigma} / (c\Phi \cdot T_M)) \alpha_0 k_{\omega}}{p^2 (p + k_{\omega} (R_{\Sigma} / (c\Phi \cdot T_M)))}$$

видно, що контур володіє астатизмом другого порядку та добротністю по прискоренню, яка дорівнює заданій $D_{\varepsilon} = D_{\varepsilon}^2 = \alpha_0$.

Дослідження якості керування системи підпорядкованого регулювання швидкістю двигуна проведено шляхом моделювання при дії параметричного збурення у вигляді дворазового збільшення розрахункового моменту інерції електроприводу з 0,3 кг·м² до значення 0,6 кг·м².

Двигун постійного струму з незалежним збудженням має наступні дані: $P_n=5,3$ кВт – номінальна потужність; $U_n=220$ В – номінальна напруга; $I_n=28$ А – номінальний струм якоря; $n_n=1500$ об/хв – номінальна частота обертання; $M_n=34$ Нм – номінальний момент; $\eta_n=0,855$ – номінальний ККД; $R_{\Sigma}=0,416$ Ом – опір якорного кола.

Силовий перетворювач характеризується коефіцієнтом передачі $k_{np}=23$ та сталою часу $T_{\mu}=0,01$ с.

Параметри регуляторів дорівнюють $\gamma_0=100$, $k_i=400$, $\alpha_0=4000$, $\alpha_1=70$, $k_{\omega}=2000$. Коефіцієнти підсилення регуляторів визначають ступінь наближення реальних процесів до бажаних і визначаються допустимими динамічними похибками за технічними умовами роботи системи.

У ході моделювання здійснювався плавний пуск без навантаження за час 1 с з наступним накиданням номінального навантаження на 2 с процесу.

На рис. 3, а та 3, б представлено графіки перехідних процесів швидкості та її похибок запропонованої системи при двох значеннях моменту інерції. Як видно з рисунку, система практично нечутлива до параметричного збурення, а графіки зливаються між собою. Максимальна динамічна похибка під час пуску становить всього 0,83 рад/с, а при накиданні навантаження досягає незначного значення 0,05 рад/с.

Для порівняння отриманих результатів на рис. 3, в) та 3, г) показано похибки керування швидкістю при роботі традиційних ПІ-регуляторів струму та швидкості, налаштованих на модульний і симетричний модулі відповідно. Збільшення вдвоє моменту інерції електропривода (графік пунктирною лінією)

приводить до збільшення тривалості перехідних процесів та динамічної похибки при розгоні з 3,3 рад/с до 4,7 рад/с. При навантаженні похибки складають 3,3 рад/с та 2,5 рад/с відповідно, що значно більше, ніж у запропонованій системі.

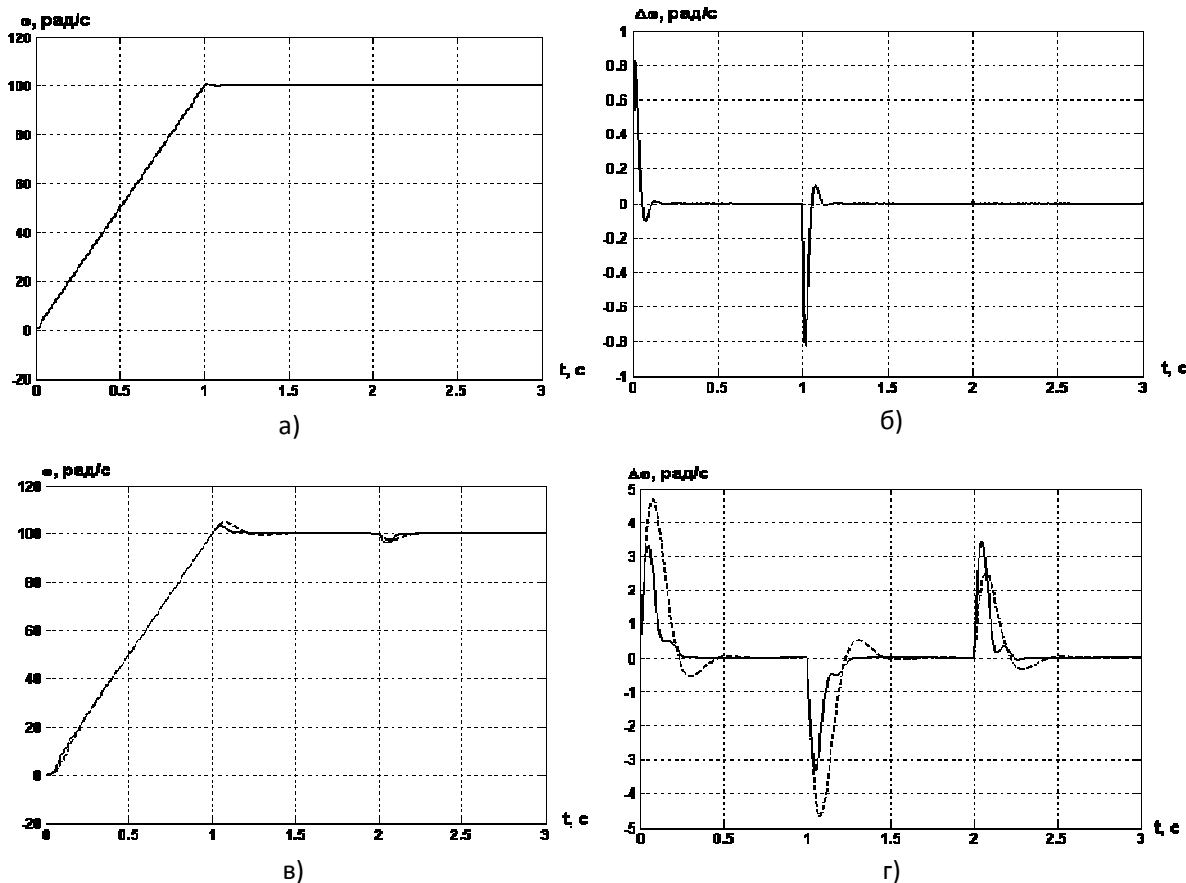


Рисунок 3 – Графіки перехідних процесів

На рис. 4 а) представлено графіки перехідних процесів струму якоря запропонованої системи, а на рис 4 б) зображено графіки перехідних процесів

струму якоря підпорядкованої системи з традиційними ПІ-регуляторами струму та швидкості.

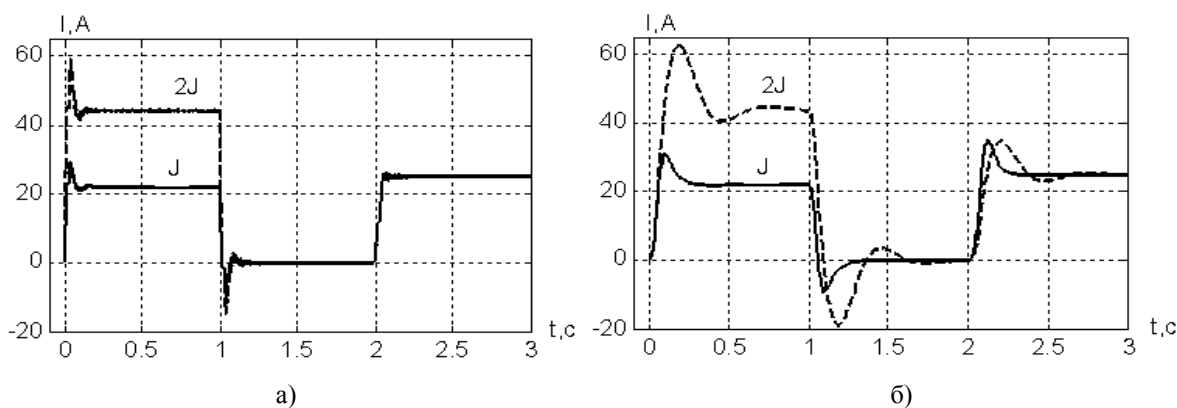


Рисунок 4 – Графіки перехідних процесів струму якоря

Як видно з рис. 4, б), зростання вдвоє моменту інерції електропривода (графік 2J) призводить до збільшення тривалості перехідних процесів та миттєвого значення струму якоря двигуна під час пуску та накидання номінального навантаження при

використанні традиційних ПІ-регуляторів струму та швидкості.

Висновки. Запропонований метод синтезу законів керування координатами електропривода на основі концепції зворотних задач динаміки при мі-

німізації локальних функціоналів миттєвих значень енергії забезпечує високу якість керування в статичному режимі та під час перехідних процесів в умовах дії параметричних збурень без застосування додаткових алгоритмів адаптації.

Дуже важливим є те, що для побудови структури регулятора не потрібна детальна математична модель об'єкту керування, достатньо знати тільки характер взаємозв'язку, тобто порядок диференційного рівняння.

Перевагою закону керування з точки зору подальшої реалізації є відсутність операцій диференціювання.

На прикладі широко розповсюдженої системи підпорядкованого керування швидкістю двигуна постійного струму викладена методика синтезу законів керування регуляторів.

Збільшення вдвоє моменту інерції електропривода практично не впливає на вид перехідних процесів швидкості.

ЛІТЕРАТУРА

1. Кунцевич В.М. Управление в условиях неопределенности: гарантированные результаты в за-

дачах управления и идентификации. – К.: Наукова думка, 2006. – 264 с.

2. Никифоров В.О. Адаптивное и робастное управление с компенсацией возмущений. – СПб.: Наука, 2003.

3. Крутько П.Д. Робастно устойчивые структуры управляемых систем динамической точности. Алгоритмы и динамика управления движением модельных объектов // Изв. РАН. ТиСУ. – 2005. – С.120 – 140.

4. Островерхов М.Я. Метод синтеза регуляторов электромеханических систем на основе концепции зворотних задач динаміки в поєднанні з мінімізацією локальних функціоналів миттєвих значень енергії / Вісник НТУ "Харківський політехнічний інститут". – Харків: НТУ "ХПІ", 2008. – № 30. – С. 105 – 110.

Стаття надійшла 06.06.2011 р.
Рекомендовано до друку к.т.н., доц.
Сергієнко С.А.

ПОДЧИНЕННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ КООРДИНАТАМИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА НА ОСНОВЕ КОНЦЕПЦИИ ОБРАТНЫХ ЗАДАЧ ДИНАМИКИ

Н. Я. Островерхов, к.т.н., доц., В. М. Пыжов, к.т.н., доц., Н. П. Бурик, асп.

Национальный технический университет Украины "Киевский политехнический институт"

пр. Победы, 37, 03056, г. Киев, Украина

E-mail: ostroverkhov@fea.kpi.ua

Представлен метод улучшения качества управления координатами электропривода путем синтеза законов управления на основании концепции обратных задач динамики при минимизации локальных функционалов мгновенных значений энергий, что обеспечивает слабую чувствительность к параметрическим и координатным возмущениям.

Ключевые слова: желаемое качество управления, обратная задача динамики.

SYSTEM OF SLAVE CONTROL COORDINATES OF ELECTRIC DRIVE ON THE BASE CONCEPTS OF THE INVERSE PROBLEM DYNAMICS

M. Ostroverkhov, Cand.Sc. (Eng.), Assoc. Prof., V. Pyzhov, Cand.Sc. (Eng.), Assoc. Prof., N. Buryk, post-grad.

National Technical University of Ukraine "Kiev Polytechnic Institute"

pr. Peremohy 37, 03056, Kiev, Ukraine

E-mail: ostroverkhov@fea.kpi.ua

We discuss the possibility of improving the quality of control by synthesizing the coordinates of the electric control laws based on the concept of inverse dynamics problems, while minimizing local functionals, which provides a weak sensitivity to parameter perturbations and simple decomposition of the control system.

Key words: desired quality of control, inverse dynamics problem.