

УДК 62.83.52

ПОРІВНЯННЯ МЕТОДІВ СИНТЕЗУ ЦИФРОВИХ РЕГУЛЯТОРІВ СТАНУ ДЛЯ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПРИВОДА З ПРУЖНИМИ ЗВ'ЯЗКАМИ

Старостін С.С., к.т.н., доц., Толочко О.І., д.т.н., проф.

Донецький національний технічний університет

83001, м. Донецьк, вул. Артема, 58

E-mail: starostin@mail8.dgtu.donetsk.ua

Получены выражения, позволяющие определять параметры цифровых регуляторов состояния для электроприводов с упругими связями с учетом интервалов дискретности силовых преобразователей и системы регулирования. Проанализирован упрощенный метод, базирующийся на подходах к синтезу непрерывных систем регулирования. Сделаны выводы относительно условий, при которых упрощенный метод дает приемлемые результаты.

Ключевые слова: электропривод, упругие связи, регулятор состояния, синтез.

The expressions are obtained which allows determining the parameters of digital state space controllers for electrical drives with elastic joints in view of sampling intervals for power converters and control systems. The simplified method is analyzed which is based on the approaches to the synthesis of continuous control systems. The conclusions have been made concerning the conditions at which the simplified method gives the acceptable results.

Key words: electrical drive, elastic joints, state space controller, synthesis.

Вступ. Сучасні цифрові системи електропривода характеризуються дискретністю функціонування як силових перетворювачів електроенергії, так і мікропроцесорних контролерів, що реалізують алгоритми управління [1]. Вплив перетворювачів на об'єкти регулювання достатньо точно відображають ідеальні імпульсні елементи [2, 3], що дає підстави для використання теорії імпульсних систем регулювання при аналізі та синтезі таких систем електропривода.

Вимоги до покращення динамічних характеристик систем електропривода обумовлюють необхідність звертати увагу на пружні властивості кінематичних зв'язків у технологічних механізмах і при необхідності вирішувати задачі управління за допомогою регуляторів та спостерігачів стану.

Аналіз попередніх досліджень. Питанням регулювання стану у системах електропривода з пружними кінематичними зв'язками в останні роки присвячується багато наукових розробок. Більшість із них базується на теорії неперервних систем. Наприклад, такий підхід застосовано у ґрунтовних роботах [4, 5]. При цьому властивості перетворювачів електроенергії приблизно враховують включенням в систему регулювання фіктивних аперіодичних ланок. Але обґрунтування шляхів визначення сталих часу таких ланок у цих публікаціях є відсутніми. Між тим, ці сталі часу є базовими при розрахунку параметрів регуляторів стану, які визначають якість регулювання.

В [5] зроблено спробу врахування особливостей мікропроцесорної реалізації системи регулювання. Однак розглянуті підходи стосуються цифроаналогових систем і не можуть бути застосовані безпосередньо для сучасних систем електропривода з прямим цифровим керуванням. Між тим, є досвід визначення параметрів цифрових регуляторів швидкості електропривода для одномасових систем на підставі результатів синтезу неперервних систем ре-

гулювання [6].

У ряді розробок, узагальненням яких можна вважати публікацію [7], враховується дискретність функціонування системи електропривода при цифровому керуванні силовим перетворювачем. Але розглянуто тільки окремий випадок керування перетворювачем із затримкою на один інтервал дискретності, що є притаманним тільки тиристорному електроприводу постійного струму.

Отже, доцільно, по-перше, на основі загального підходу з урахуванням дискретності системи отримати вирази для визначення параметрів цифрового регулятора стану. По-друге, слід розглянути можливість використання результатів синтезу неперервних регуляторів стану при здійсненні цифрового регулювання. На основі порівняння перехідних процесів зробити висновки щодо умов застосування цих підходів.

Мета роботи. З'ясувати можливості застосування результатів, отриманих із позицій синтезу неперервних систем, при практичній реалізації дискретного регулювання стану у системах електропривода з пружними зв'язками при прямому цифровому керуванні напівпровідниковими перетворювачами.

Матеріал і результати дослідження. Дискретні властивості систем регулювання електроприводів (рис. 1) обумовлені дискретністю функціонування наступних елементів [6]:

1) силових перетворювачів електроенергії (інтервал дискретності T_u);

2) регуляторів струму перетворювачів (інтервал дискретності $T_i = \lambda T_u$);

3) регуляторів стану системи електропривода (інтервал дискретності $T_v = vT_i$). Як правило, всі зазначені інтервали дискретності розпочинаються одночасно та є кратними один одному, отже, коефіцієнти λ та v є цілими числами.

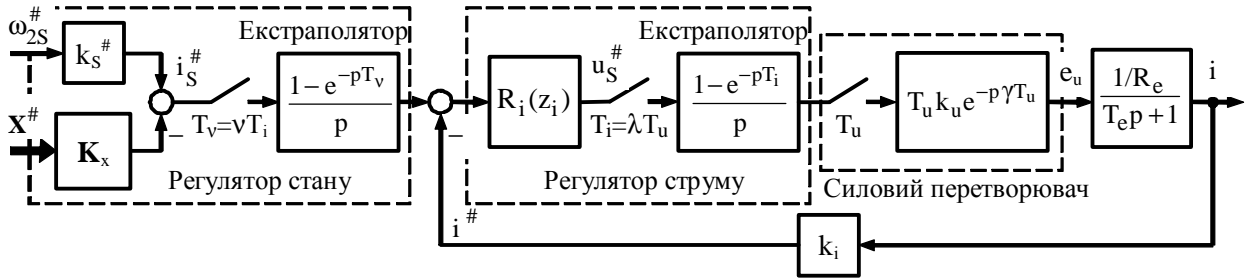


Рисунок 1 – Структурна схема цифрових регуляторів та силового перетворювача

Для синтезу та аналізу регулювання стану системи електропривода доцільно охарактеризувати динамічні властивості формування електромагнітного моменту двигуна в загальному вигляді [6]. З достатньою точністю можна вважати, що при стрибкоподібному завданні момент змінюється за експоненціальним законом (рис. 2).

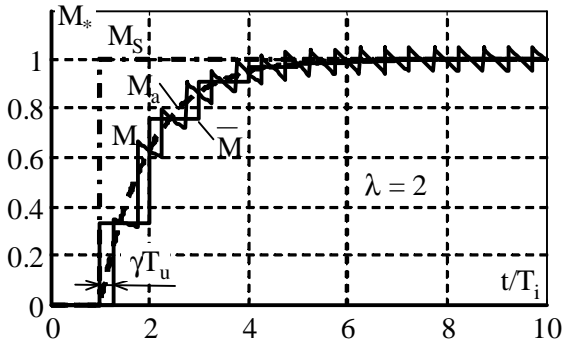


Рисунок 2 – Процес формування електромагнітного моменту двигуна

З урахуванням розглянутого [1], такий процес забезпечує регулятор моментотворюючого струму (рис. 1) з передавальною функцією:

$$R_i(z_i) = \frac{i(z_i)}{i_s^{\#}(z_i)} = \frac{R_e(1-d_m)}{k_u k_i c_1} \cdot \frac{1-d_e z_i^{-1}}{1-z_i^{-1}}, \quad (1)$$

де $i_s^{\#}$, i – відповідно цифрове завдання на струм та миттєвий моментотворюючий струм двигуна; R_e – еквівалентний опір силового кола "перетворювач-двигун"; $d_m = \exp(-T_i/T_m)$ – параметр, що характеризує динаміку формування моменту; T_m – стала часу експоненціального формування моменту; k_u – коефіцієнт передачі силового перетворювача за напругою; k_i – коефіцієнт зворотного зв'язку за струмом;

$$c_1 = \frac{T_u d_e^{1-\gamma} (1-d_e^\lambda)}{T_e (1-d_e)}; \quad d_e = \exp(-T_u/T_e); \quad z_i = \exp(pT_i);$$

T_e – електромагнітна стала часу силового кола "перетворювач-двигун".

У передавальній функції (1) враховано дискретність функціонування силового перетворювача T_u , дискретність регулювання моментотворюючого струму T_i (дискретність формування електромагнітного моменту), а також часову затримку γT_u відносно початку інтервалу T_i (рис. 1 та рис. 2), яка характеризує особливості функціонування перетворювачів електроенергії [2, 3].

Процесу (рис. 2) відповідає дискретна передавальна функція відносно середнього значення моменту \bar{M} :

$$K_M(z_i) = \frac{\bar{M}(z_i)}{M_S(z_i)} = \frac{(1-d_m)z_i^{-1}}{(1-d_m z_i^{-1})} \cdot (d_1 + d_2 z_i^{-1}), \quad (2)$$

де M_S – завдання на момент двигуна; d_1, d_2 – коефіцієнти, що характеризують перехід до середнього значення моменту; $d_1 = 1/(1-d_e^\lambda) - (d_e^{1-\gamma})/\lambda(1-d_e)$;

$$d_2 = \frac{d_e^{1-\gamma}}{\lambda(1-d_e)} - \frac{d_e^\lambda}{1-d_e^\lambda}.$$

Найчастіше урахування пружності механічного об'єкту здійснюють на основі двомасової моделі (рис. 3) у відносних одиницях ($\omega^* = \omega/\omega_B$, $M^* = M/M_B$) із застосуванням наступних позначень:

T_T – стала часу, що характеризує динаміку регулювання моментотворюючого струму (формування електромагнітного моменту);

ω_1, ω_2 – відповідно кутові швидкості двигуна та механізму;

M_{12} – пружний момент у механічній передачі;

$T_{J1} = J_1 \omega_B / M_B$, $T_{J2} = J_2 \omega_B / M_B$ – сталі часу, що характеризують відповідні моменти інерції двигуна J_1 та механізму J_2 ;

$T_{c12} = M_B / C_{12} \omega_B$ – стала часу жорсткості механічної передачі (C_{12} – коефіцієнт жорсткості);

КРС або КРМ – відповідно контур регулювання струму або моменту.

З урахуванням рис. 3, в дискретному вигляді відносно середніх значень моментів система регулювання стану має вигляд, наданий на рис. 4. Дискретні передавальні функції двомасового об'єкту регулювання визначено з урахуванням інтервалу дискретності T_v за принципами, розглянутими в [1]. Для передавальної функції (2), що характеризує динаміку формування моменту, здійснено зведення до інтервалу дискретності T_v , у результаті чого отримано передавальну функцію $K_M(z_v)$ (рис. 4).

Позначення на рис. 4 мають наступний зміст:

$$k_{d1} = d_1 + d_2 - (d_m d_1 + d_2) \cdot \frac{1-d_m^v}{v(1-d_m)};$$

$$k_{d2} = (d_m d_1 + d_2) \cdot \frac{1-d_m^v}{v(1-d_m)} - d_m^v (d_1 + d_2);$$

$$v = T_v / T_i; \quad k_{J1} = T_v / T_{J1}; \quad k_{c12} = T_v / T_{c12};$$

$$k_{J2} = T_v / T_{J2}; \quad z_v = \exp(pT_v).$$

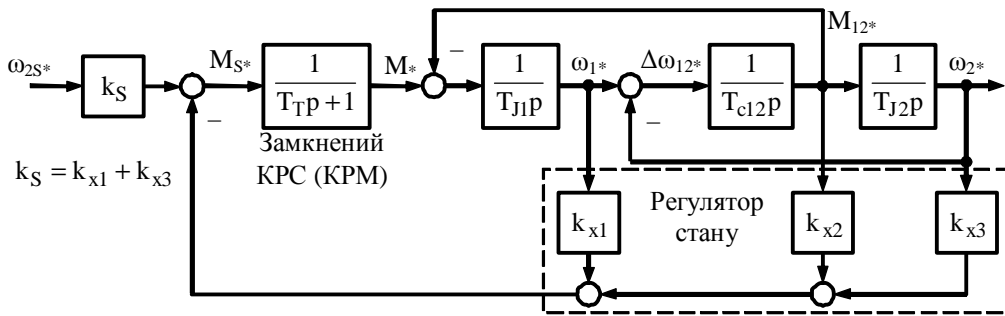


Рисунок 3 – Структурна схема системи неперервного регулювання стану для електропривода з пружними зв'язками

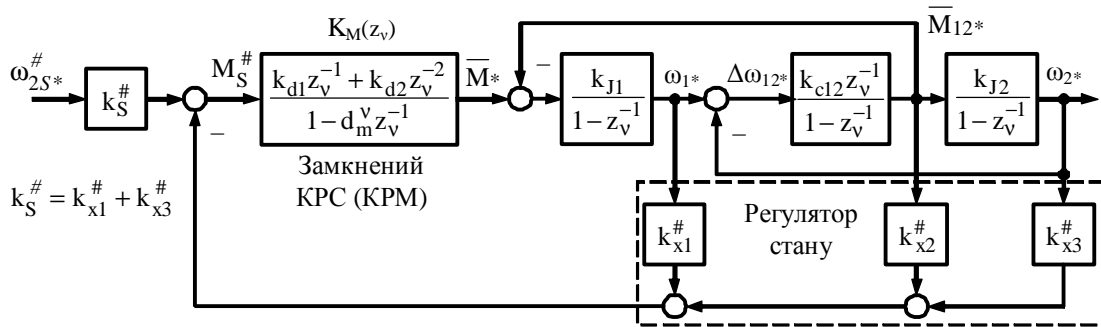


Рисунок 4 – Структурна схема системи дискретного регулювання стану для електропривода з пружними зв'язками

Розглянемо підходи щодо визначення параметрів регуляторів стану при неперервному та дискретному регулюванні.

Параметри неперервного регулятора стану де (рис. 3), як правило, визначають на основі бажаного характеристичного полінома системи $G(p)$, який може бути заданий, наприклад, методом подвійних пропорцій [4] у вигляді:

$$G(p) = 64T_T^4 p^4 + 64T_T^3 p^3 + 32T_T^2 p^2 + 8T_T p + 1. \quad (3)$$

При такому характеристичному поліномі неперервної системи (рис. 3) отримуємо вирази для параметрів регулятора стану:

$$\begin{aligned} k_{x1} &= \frac{T_{J1}}{2T_T} - \frac{T_T}{T_{c12}} \cdot \left(1 + \frac{T_{J1}}{T_{J2}}\right); \\ k_{x2} &= \frac{T_{J1}T_{c12}}{8T_T^2} - \left(1 + \frac{T_{J1}}{T_{J2}}\right); \\ k_{x3} &= \frac{T_{J1}T_{J2}T_{c12}}{64T_T^3} - k_{x1}. \end{aligned} \quad (4)$$

Визначення параметрів дискретного регулятора стану (рис. 4) на підставі методики, розглянутої в [8], дало наступні результати:

$$\begin{aligned} k_{x1}^{#} &= K_1 - \frac{k_{c12}(k_{J1} + k_{J2}) \cdot [k_{d1} + k_{d2}(2 - d_m^v)]}{k_{J1}(k_{d1} + k_{d2})^2}; \\ k_{x2}^{#} &= K_2 - \frac{(k_{J1} + k_{J2}) \cdot (1 - d_m^v)}{k_{J1}(k_{d1} + k_{d2})}; \end{aligned}$$

$$k_{x3}^{#} = K_3 - K_1 + \frac{k_{c12}(k_{J1} + k_{J2}) \cdot k_{d2}(k_{d1}d_m^v + k_{d2})}{k_{J1}(k_{d1} + k_{d2})^2}, \quad (5)$$

$$K_1 = \frac{(1 - d_q)^2}{k_{J1}[k_{d1}(1 + d_q) + k_{d2}(3 - d_q)]};$$

$$K_2 = K_1 \cdot \frac{(k_{d1} + k_{d2}) \cdot (1 - d_q)}{k_{c12}[k_{d1}(3 + d_q) + k_{d2}(7 - 3d_q)]};$$

$$K_3 = K_2 \cdot \frac{(k_{d1} + k_{d2}) \cdot (1 - d_q)}{k_{J2}[k_{d1}(5 + 3d_q) + k_{d2}(13 - 5d_q)]};$$

$$d_q = d_m^v - \frac{k_{c12}(k_{J1} + k_{J2}) \cdot k_{d2}(k_{d1}d_m^v + k_{d2})}{(k_{d1} + k_{d2})^2}.$$

Були проведені дослідження щодо можливості застосування параметрів неперервного регулятора стану, визначених формулами (4), для системи дискретного регулювання (рис. 4). У результаті зроблено висновок, що для отримання прийняттого процесу необхідно враховувати вплив дискретності функціонування системи у сталій часу T_T , як це розглянуто в [6]:

$$T_T = T_m + T_E + T_3; \quad T_E = T_v/2; \quad T_3 = \gamma T_u/2, \quad (6)$$

де T_m , T_E , T_3 – параметри, які враховують відповідно динаміку формування моменту електропривода, екстраполяцію завдання на струм (момент) та затримку, що характеризує функціонування силового перетворювача.

На рис. 5 надано низку результатів розрахунків коефіцієнтів регулятора стану на підставі формул

(4) з урахуванням (6) у порівнянні з результатами розрахунків за формулами (5) при варіаціях параме-

трів, що характеризують дискретні властивості системи регулювання.

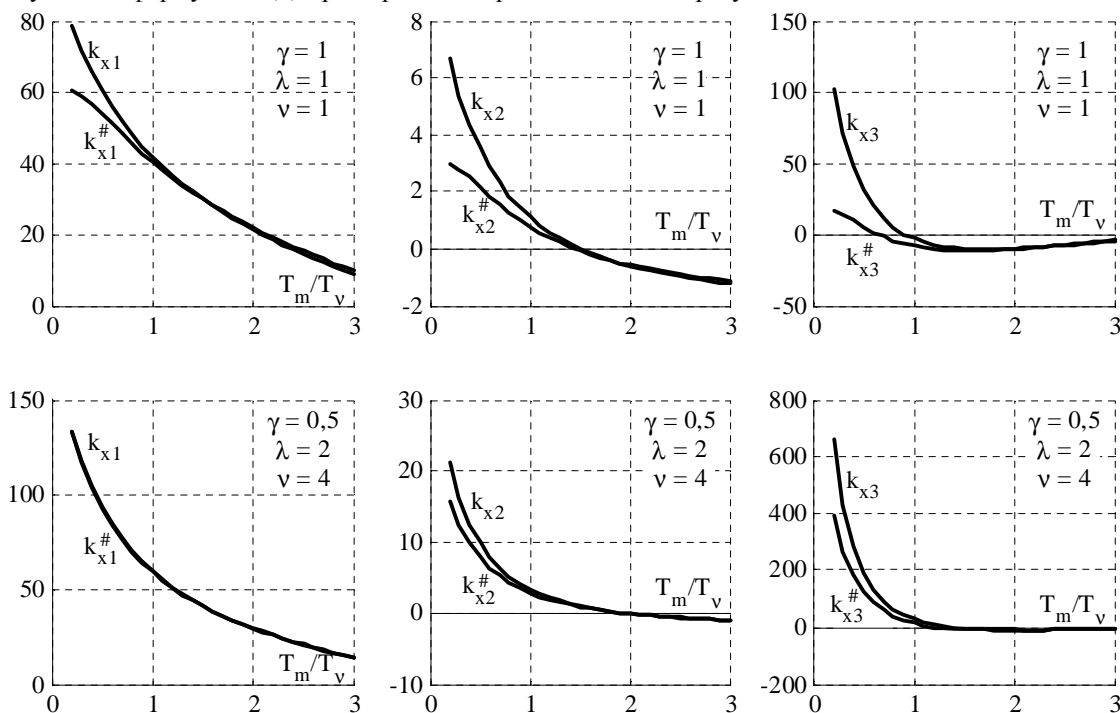


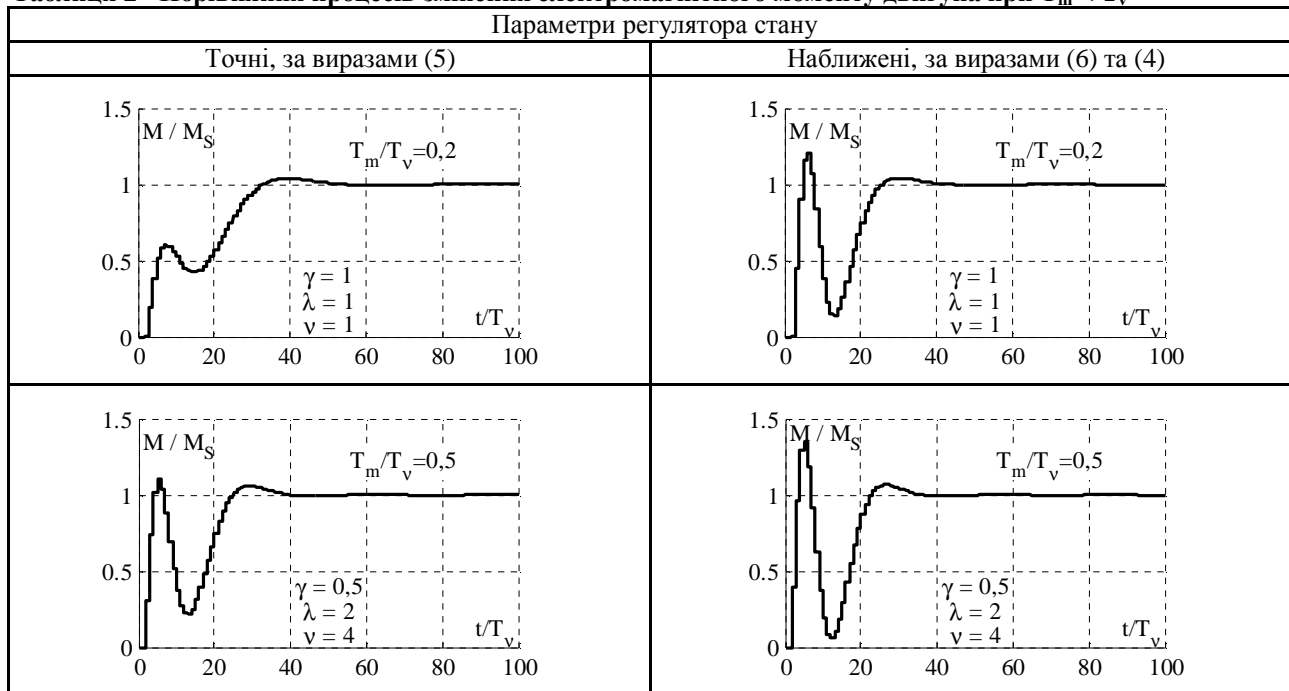
Рисунок 5 – Графіки залежностей коефіцієнтів регулятора стану від швидкодії формування моменту електропривода

З графіків (рис. 5) можна зробити висновок, що різниця між параметрами регулятора стану, визначеними за двома методами, стає суттєвою при зменшенні відносного значення T_m , тобто при збільшенні швидкодії формування моменту двигуна відносно швидкодії регулювання стану двомасового об'єкта, яка напряму залежить від інтервалу дискретності T_v .

Таблиця 1 – Порівняння процесів зміння електромагнітного моменту двигуна при $T_m = T_v$

Параметри регулятора стану	
Точні, за виразами (5)	Наближені, за виразами (6) та (4)
<p>M/M_S vs t/T_v, $T_m/T_v=1$, $\gamma=1, \lambda=1, \nu=1$</p>	<p>M/M_S vs t/T_v, $T_m/T_v=1$, $\gamma=1, \lambda=1, \nu=1$</p>
<p>M/M_S vs t/T_v, $T_m/T_v=1$, $\gamma=0,5, \lambda=2, \nu=4$</p>	<p>M/M_S vs t/T_v, $T_m/T_v=1$, $\gamma=0,5, \lambda=2, \nu=4$</p>

Таблиця 2 - Порівняння процесів змінення електромагнітного моменту двигуна при $T_m < T_v$



Зроблений висновок підтверджують результати моделювання системи дискретного регулювання, деякі з яких зведено в табл. 1 та табл. 2. Випадки при $\gamma = 1$ відповідають тиристорному електроприводу постійного струму. Значення параметра $\gamma = 0,5$ характерно для електропривода змінного струму з широтно-імпульсними перетворювачами.

При моделюванні звернуто увагу на процес змінення електромагнітного моменту двигуна при лінійному збільшенні завдання $\omega_{2S} = \varepsilon \cdot t$ на вході регулятора стану. Бачимо, що у випадку приблизного визначення параметрів цифрового регулятора стану на підставі результатів синтезу неперервної системи регулювання, поведінка моменту двигуна при $T_m < T_v$ (табл. 2) суттєво змінюється у напрямку небажаного збільшення коливань.

Висновки. При цифровому регулюванні стану в системі електропривода з пружними зв'язками можливо використовувати результати, отримані методами проектування неперервних систем, враховуючи в еквівалентній сталій часу динамічні властивості формування електромагнітного моменту двигуна, часові дискретності функціонування регулятора стану та силового перетворювача електроенергії, якщо внутрішній контур (струму або моменту) має швидкодію зі сталою часу, яка більше інтервалу дискретності регулювання стану.

При наближенні до максимально можливої швидкодії формування електромагнітного моменту двигуна використання приблизних розрахунків для регулятора стану може привести до суттєвого збільшення коливань моменту. У цьому разі краще застосовувати методи параметричного синтезу, основані на теорії імпульсних систем.

тивостей силових перетворювачів електроенергії при синтезі електромехатронних систем // Вісник НТУ "Харківський політехнічний інститут". - Харків, НТУ "ХПІ", 2005. - Вип. 45. - С. 348-351.

2. Перельмутер В.М. Об импульсной модели тиристорного электропривода // Известия вузов. Электромеханика. - 1985. - №3. - С. 84 - 86.

3. Старостін С.С. Обґрунтування імпульсної моделі широтно-імпульсних перетворювачів електроенергії // Технічна електродинаміка. Тем. випуск "Силовая електроніка та енергоефективність". Частина 3. - 2006. - С. 114-117.

4. Riefenstahl U. Elektrische Antriebssysteme. - Wiesbaden: Teubner, 2006. - 443 S.

5. Борцов Ю.А., Соколовский Г.Г. Автоматизированный электропривод с упругими связями. - Санкт-Петербург: Энергоатомиздат, 1992. - 288 с.

6. Старостін С.С., Толочко О.І. Визначення параметрів цифрових регуляторів швидкості електропривода методами проектування неперервних систем // Зб. наук. праць Дніпродзержинського державного технічного університету. Тем. випуск. - Дніпродзержинськ: ДДТУ, 2007. - С. 179-182.

7. Толочко О.И., Коцегуб П.Х., Федоряк Р.В. Параметрический синтез цифровой системы модального управления двухмассовым электромеханическим объектом // Вісник НТУ "Харківський політехнічний інститут". - Харків: НТУ "ХПІ", 2003. - №10. - Т. 1.- С. 97-100.

8. Старостін С.С. Оптимізація дискретних регуляторів та спостерігачів стану електромеханічних об'єктів // Електромашинобудування та електрообладнання: Міжвідом. наук.-техн. збірник. - Київ: Техніка, 2004. - Вип. 63. - С.17 - 25.

ЛІТЕРАТУРА

1. Старостін С.С. Урахування дискретних влас-

Стаття надійшла 18.04.2008 р.