

УДК 378.14

Л.Б. Курцева, Н.С. Єршоміна

Українська інженерно-педагогічна академія, Харків

## ДИНАМІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЦИФРОВОЇ ДВОМАСОВОЇ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ПРОКАТНОЇ КЛІТИ ЗА ЗМІНОЮ ПЕРІОДУ ДИСКРЕТНОСТІ ТА З ОПТИМАЛЬНИМ DLQR – РЕГУЛЯТОРОМ

*Проведені дослідження динамічних характеристик цифрової двомасової системи управління за зміною періоду дискретності електроприводом прокатної кліти стана холодної прокатки, які отримані по повному вектору стану за задаючою і збурюючою діях. Побудовані динамічні характеристики за всіма змінними стану: швидкості робочих валків, моменту пружності, швидкості двигуна, моменту двигуна, ривка двигуна, напруги на вході системи, напруги у зворотному зв'язку і напруги на виході інтегруючої частини ПІ – регулятора за збурюючою та задаючою діях.*

**Ключові слова:** прокатний стан, двомасова система управління, математична модель, задаюча дія, збурююча дія, період дискретності, перехідний процес, динамічні характеристики.

### Вступ

**Постановка проблеми.** Обробка металу прокаткою займає важливе місце в металургійному виробництві. Прокатний стан - це пристрій, що складається з великої кількості механізмів, об'єднаних єдиним технологічним процесом. У прокатному стані є головні механізми - робочі валки прокатної кліти і допоміжні механізми, що забезпечують безперервність технологічного процесу. Головні механізми, призначені для обробки металу, забезпечують обтискання металу і надають йому необхідну перетин і форму готової продукції. Цифрові системи управління знаходять широке застосування в промисловості. Вони грають важливу роль в управлінні виробничими процесами, в яких спільна робота комп'ютера і виконавчого пристрою забезпечує виконання ряду відповідальних операцій.

Основні переваги цифрових методів обробки полягають у принциповій можливості виключення апаратної похибки при обчисленнях, оперативності зміни алгоритму обробки та низькій вартості цифрових вузлів. Вони значною мірою залежать від рівня техніки аналого-цифрового та цифро-аналогового перетворення, тобто від аналого-цифрових (АЦП) та цифро-аналогових перетворювачів (ЦАП). Для адекватного відображення миттєвих значень неперервного сигналу та цифрової інформації відповідно у цифрову та аналогову форму необхідні лінійні від аналого-цифрові та цифро-аналогові перетворення. Тому АЦП і ЦАП є основними функціональними вузлами цифрової техніки, які визначають точність, швидкодію та конструктивні параметри цифрових систем управління і є актуальною проблемою.

**Аналіз останніх досягнень і публікацій.** Аналіз останніх публікацій по синтезу систем управління з використанням оптимальних регуляторів показує, що

даний напрям є актуальним. Як показали численні дослідження застосування метода оптимального управління дозволяє достатньо ефективно демпфувати власні коливання двомасової системи управління [1 – 3], обумовлені наявністю пружних елементів в трансмісіях машин. Основне питання і основна трудність застосування таких методів полягає в правильному обґрунтуванні і виборі критерію якості функціонування системи. Функції в системах управління протікають різним чином залежно від конкретної дії на них з боку системи управління. При цьому природне прагнення вибирати в деякому розумінні оптимальну управляючу дію, що дозволяє найкращим чином в порівнянні зі всіма іншими можливими способами здійснити управління швидкістю обертання електроприводом прокатної кліти за зміною періоду дискретності. Теорія оптимізації особливої практичну важливість отримала останнім часом у зв'язку з широким застосуванням в техніці обчислювальних машин і технічної можливості реалізації оптимальних законів управління. Аналіз останніх публікацій по синтезу цифрових систем управління з використанням оптимальних регуляторів показує, що даний напрям є актуальним.

**Метою статті** є розробка математичної моделі цифрової двохмасової системи управління швидкістю обертання електроприводу прокатної кліти за зміною періоду дискретності з використанням оптимального регулятора і побудова на ПЕОМ її динамічних характеристик.

### Виклад матеріалу дослідження, отриманих наукових результатів

Цифрові значення перетвореного аналогового сигналу видаються АЦП не як аналогові, а лише в дискретні моменти часу, в інтервалах, між якими виконуються операції по перетворенню аналогового сигналу в двійковий код.

У системі управління із зворотним зв'язком функції регулятора або корегуючого пристрою може виконувати цифровий комп'ютер. Оскільки введення інформації в комп'ютер здійснюється через певні інтервали часу, то необхідно розробити спеціальний метод математичного опису і аналізу якості цифрових систем управління.

Цифрова система оперує з даними, що одержуються з аналогового сигналу шляхом вибірки його значень в рівновіддалені моменти часу. В результаті виходить часова послідовність даних, що називається дискретним сигналом. Цю послідовність можна перетворити в область змінної  $s$  і, кінець кінцем, в область змінної  $z$  за допомогою співвідношення  $z = e^{sT}$ . Область комплексної змінної  $z$  володіє властивостями, дуже схожими на властивості області змінної  $s$  перетворення Лапласа.

Для аналізу стійкості і якості цифрової системи можна використовувати  $z$ -перетворення передавальної функції. Таким чином досить просто можна визначити характеристики замкненої системи управління, в якій комп'ютер виконує функції корегуючого пристрою (або регулятора). До цифровій системі підлеглого регулювання скористуємося методом екстраполятора нульового порядку. Рівняння передаточних функцій цифрової системи підлеглого регулювання приймуть наступний вигляд

$$\Phi_{\omega_d U_{зш}}(s) = \frac{1 - e^{-sT}}{s} \frac{1}{K_{\Gamma}} \times \frac{4T_{\mu ш} s + 1}{8T_{\mu ш}^3 s^3 + 8T_{\mu ш}^2 s^2 + 4T_{\mu ш} s + 1}; \quad (1)$$

$$\Phi_{I_d U_{зш}}(s) = \frac{1 - e^{-sT}}{s} \frac{T_M}{K_{\Gamma} R_{\Sigma}} \times \frac{s(4T_{\mu ш} s + 1)}{8T_{\mu ш}^3 s^3 + 8T_{\mu ш}^2 s^2 + 4T_{\mu ш} s + 1}; \quad (2)$$

$$\Phi_{\omega_d I_c}(s) = -\frac{1 - e^{-sT}}{s} \frac{R_{\Sigma} \cdot K_d \cdot 8T_{\mu ш}^2}{T_m} \times \frac{s(4T_{\mu ш} s + 1)}{8T_{\mu ш}^3 s^3 + 8T_{\mu ш}^2 s^2 + 4T_{\mu ш} s + 1}; \quad (3)$$

$$\Phi_{I_d I_c}(s) = \frac{1 - e^{-sT}}{s} \times \frac{4T_{\mu ш} s + 1}{8T_{\mu ш}^3 s^3 + 8T_{\mu ш}^2 s^2 + 4T_{\mu ш} s + 1}. \quad (4)$$

Проведено моделювання системи підлеглого регулювання на ПЕОМ, на рис. 1 отримані графіки динамічних характеристик цифрової системи підлеглого управління за задаючою і збурюючою діями за допомогою пакету прикладних програм MatLab.

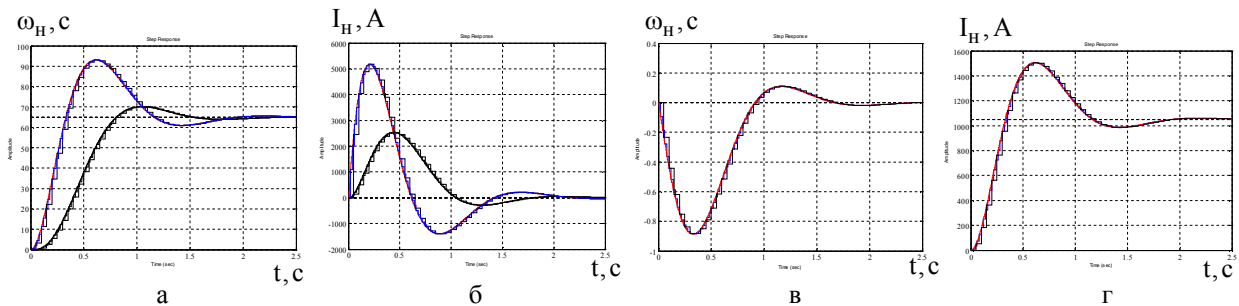


Рис. 1. Графіки динамічних характеристик швидкості (а, в) та струму (б, г) двигуна за задаючою (а, б) та збурюючою (в, г) діями за зміною періоду дискретності при  $\Delta_1 = 0,02$ ;  $\Delta_2 = 0,05$ ;  $\Delta_3 = 0,005$

Для побудови динамічних характеристик цифрової двомасової системи управління з урахуванням пружних елементів введемо вектор управління

$$\vec{U}(k) = \{U_{вх}(k), M_{пр}(k)\}^T. \quad (5)$$

Також введемо вектор стану цифрової двомасової системи управління з урахуванням пружних елементів, компонентами якого є:

$$\vec{X}(k) = \left\{ \omega_M(k), M_{п}(k), \omega_d(k), M_d(k), \rho(k), U_{фзш}(k), U_{зш}(k), U_{ш}(k) \right\}^T \quad (6)$$

Оскільки регулювання аналоговою системою здійснюється в дискретні моменти часу  $t_k$ , відстаючи один від одного на період дискретності  $\Delta$ , то аналоговій системі управління поставлена у відповід-

ність цифрова система управління. Розглянемо цифрову двомасову систему управління, що описується різницеvim рівнянням стану

$$\vec{X}(k+1) = A_d \cdot \vec{X}(k) + B_d \cdot \vec{U}(k), \quad (7)$$

де  $\vec{X}(k)$ ,  $(k = k_0, k_0 + 1, \dots, k_1 - 1)$  – вектор стану цифрової системи управління з керованою змінною

$$\vec{Y}(k) = C_d \cdot \vec{X}(k) + D_d \cdot \vec{U}(k), \quad (8)$$

де  $\vec{X}(k)$  – вектор стану цифрової системи, розмірності  $n \times 1$ ;  $\vec{U}(k)$  – вектор управління цифрової системи, розмірності  $m \times 1$ ;  $\vec{Y}(k)$  – вектор виходу цифрової системи, розмірності  $r \times 1$ .

Матриці стану  $A$ , управління  $B$ ,  $C$  і  $D$  – виходу цифрової двомасової системи управління у чисель-

ному вигляді. Виконано моделювання оптимальної цифрової двомасової системи управління за задаючою дією за допомогою програми Матлаб по векторно-матричній моделі, рис. 2.

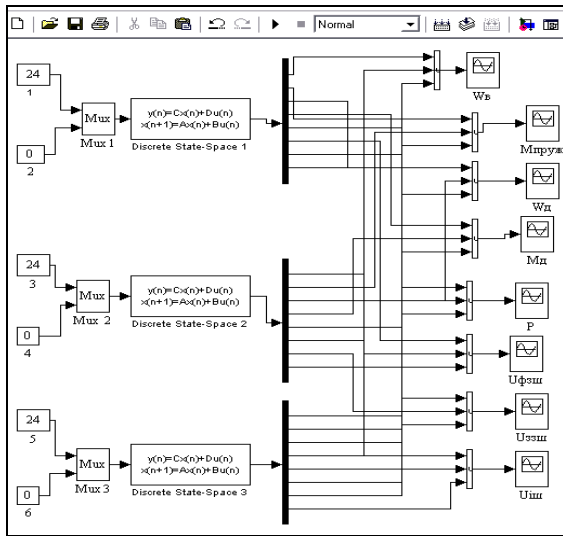


Рис. 2. Відображення вікна цифрової векторно-матричної моделі при зміні періоду дискретності у пакеті прикладних програм MatLab середовища Simulink

На рис. 3, 4 представлені графіки динамічних характеристик цифрової двомасової системи управління за задаючою та збудуючою діях і за зміною періоду дискретності. Досліджуємо завдання перекладу цифрової двомасової системи управління з довільного початкового  $\bar{X}(k_0) = \bar{X}_0$  в нульовий кінцевий стан  $\bar{X}(k_1) = 0$  так, щоб мінімізувати квадратичний критерій якості

$$\sum_{k=k_0}^{k=k_1} \left[ \bar{z}^T(k+1) \cdot R_3 \cdot \bar{z}(k+1) + \bar{U}^T(k) \cdot R_2 \cdot \bar{U}(k) \right], \quad (9)$$

де  $R_3 > 0$ ,  $R_2 > 0$  – симетричні вагові матриці.

Виконавши мінімізацію по  $\bar{U}$ , знайдемо оптимальне регулювання товщини в замкнутій формі

$$\bar{U}(k-1) = -F_d \cdot \bar{X}(k-1), \quad (k = k_0 + 1, \dots, k_1), \quad (10)$$

де  $F(k-1)$  – матриця коефіцієнтів підсилення, визначається із співвідношення

$$F_d = \left\{ R_2 + B_d^T \cdot [R_1(k) + P(k) \cdot B_d]^{-1} \times \right. \\ \left. \times B_d^T \cdot [R_1 + P(k)] \cdot A_d \right. \quad (11)$$

Таким чином, оптимальне регулювання лінійною цифровою системою по квадратичному критерію є лінійним по повному вектору стану

$$\bar{U}(k) = -F_d \cdot \bar{X}(k), \quad (k = k_0, k_0 + 1, \dots, k_1 - 1), \quad (12)$$

де  $F_d$  – матриця коефіцієнтів підсилення оптимального регулятора, визначається різницевим рівнянням

$$F_d = \left\{ R_2 + B_d^T \cdot [R_1 + P(k+1)] \cdot B_d \right\}^{-1} \times \\ \times B_d^T \cdot [R_1 + P(k+1)] \cdot A_d, \quad (13)$$

а послідовність матриць  $P(k)$ ,  $(k = k_0, \dots, k_1 - 1)$  задовольняє матричному різницевому рівнянню

$$P(k) = A_d^T \cdot [R_1 + P(k+1)] \cdot [A_d - B_d \cdot F_d], \quad (14)$$

$(k = k_0, k_0 + 1, \dots, k_1 - 1)$ , з нульовою кінцевою умовою. Рівняння (14) еквівалентне рівнянню Ріккати для аналогової системи, і його зручно вирішувати в зворотному цифровому часі.

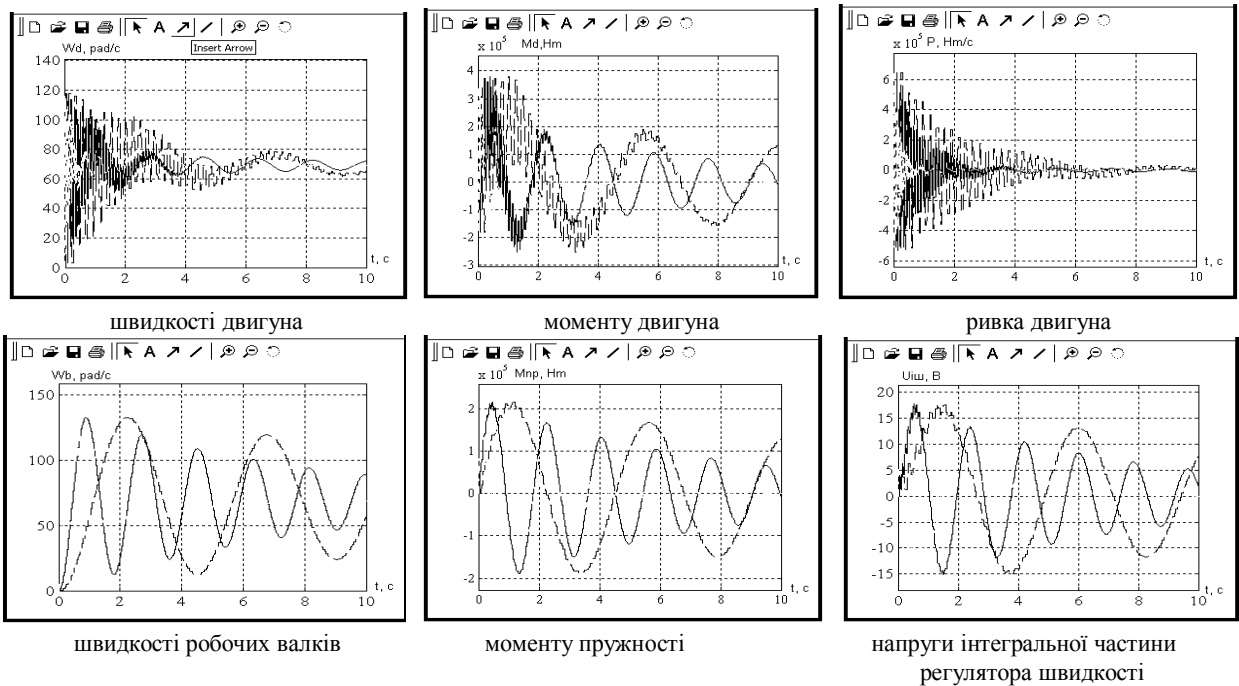


Рис. 3. Графіки динамічних характеристик цифрової двомасової системи управління за задаючою дією і за зміною періоду при різних  $\Delta$

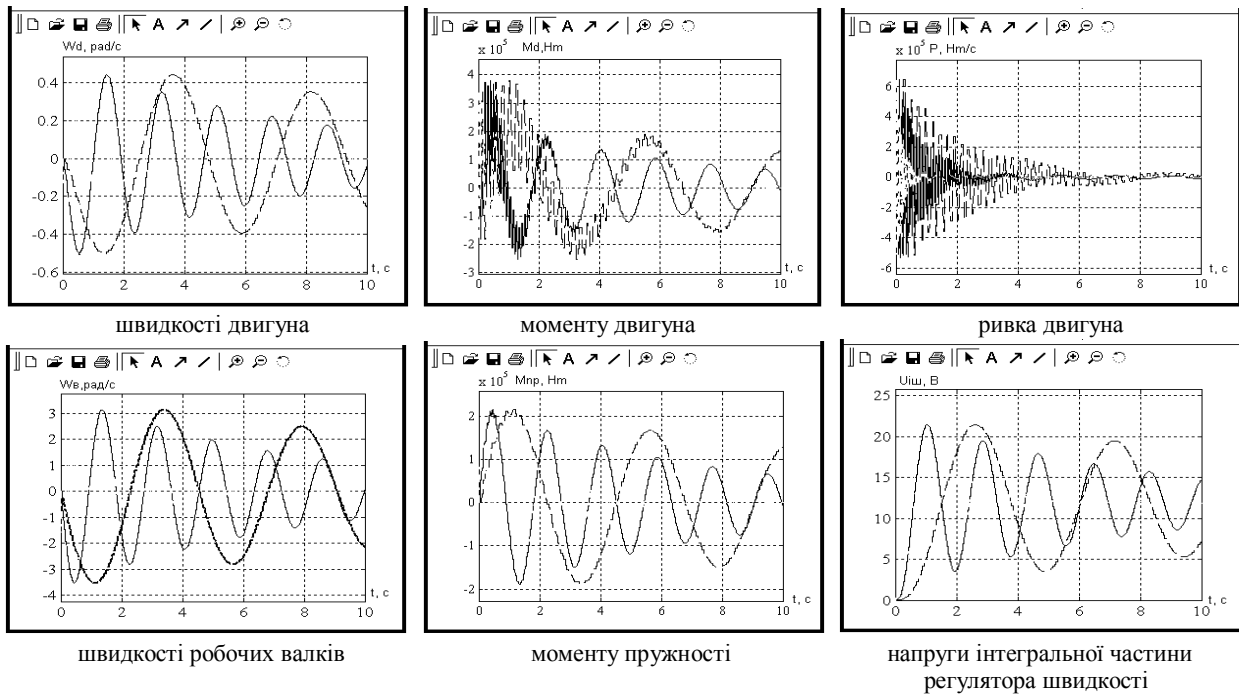


Рис. 4. Графіки динамічних характеристик цифрової двомасової системи управління за задаючою дією і за зміною періоду при різних  $\Delta$

Графіки динамічних характеристик оптимальної цифрової двомасової системи управління за задаючою та збурюючою дією (синя лінія – аналогова система, зелена - цифрова) показані на рис. 5, 6.

З графіка швидкості робочих валків (рис. 6) визначаємо показники якості перехідного процесу: перерегулювання складає  $\sigma = 23\%$ , час регулювання  $t_p = 6$  с, тобто зменшився відповідно з некоригованою двомасовою системою у 7 разів.

### Висновки

Розраховані динамічні характеристики цифрової двомасової системи управління за зміною періоду дискретності електроприводом прокатної кліти стана холодної прокатки, які отримані по повному вектору стану за задаючою і збурюючою діях.

Побудовані динамічні характеристики за всіма змінними стану: швидкості робочих валків, моменту пружності, швидкості двигуна, моменту двигуна,

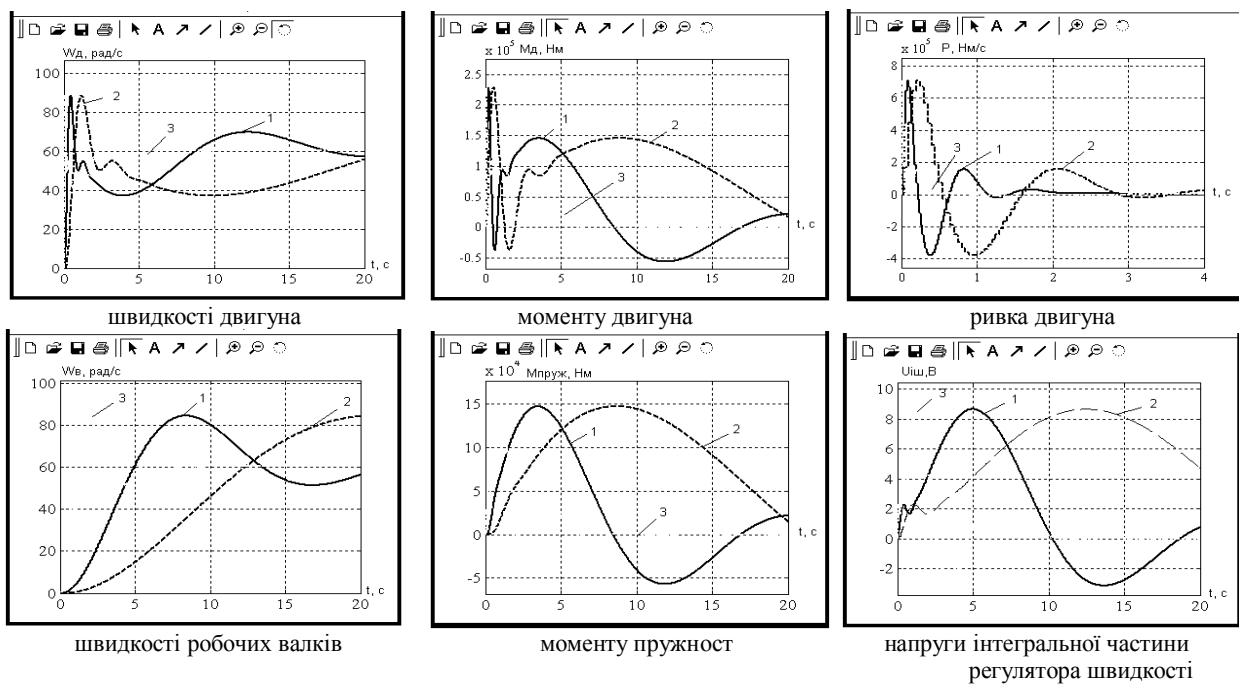


Рис. 5. Графіки динамічних характеристик оптимальної цифрової двомасової системи управління за задаючою дією і за зміною періоду дискретності при різних  $\Delta$

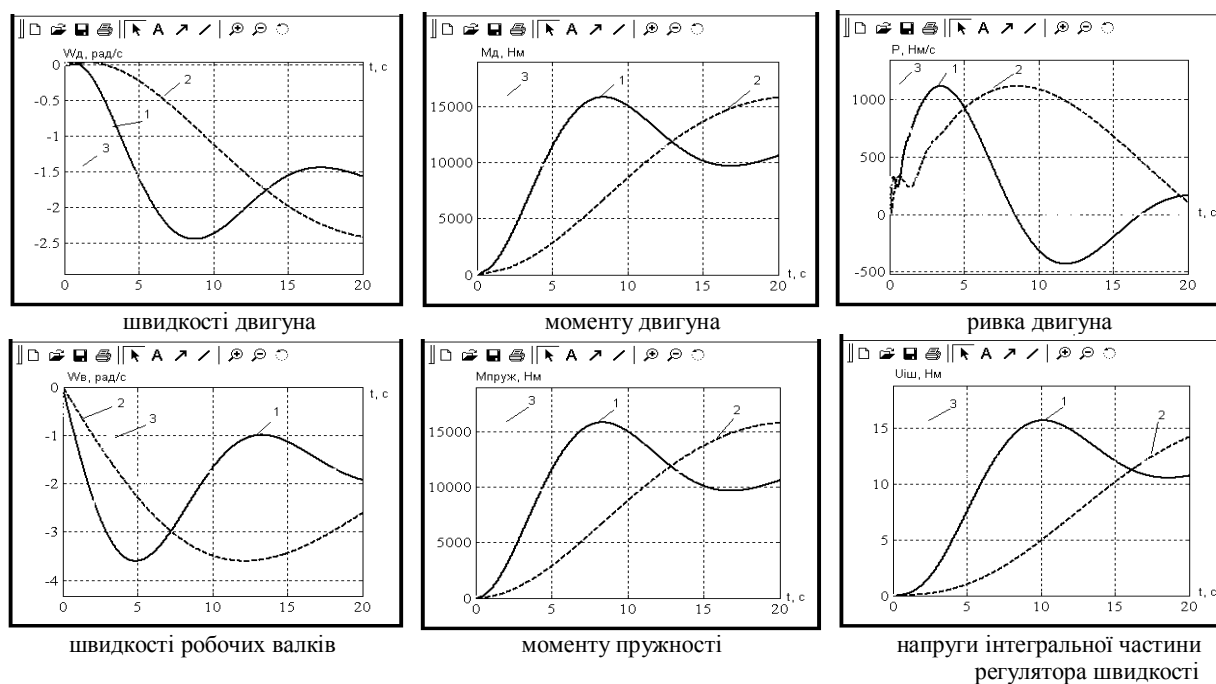


Рис. 6. Графіки динамічних характеристик оптимальної цифрової двомасової системи управління за збурюючою дією і за зміною періоду дискретності при різних  $\Delta$

ривка двигуна, напруги на вході системи, напруги у зворотному зв'язку і напруги на виході інтегруючої частини ПІ – регулятора за збурюючою та задаючою діях. Проведений аналіз цифрової двомасової системи управління за зміною періоду дискретності, тобто чим менше період дискретності, тим швидше перехідний процес. Ясно, що при  $\Delta \rightarrow 0$  (при майже високій частоті квантування) вихідний сигнал  $s(t)$  буде приближатися до вхідному  $r(t)$ .

## Список літератури

1. Пат. UA №78140. МПК H02P 5/46. № 10374 (2006.01), 2012. Цифрова система регулювання багатодвигу-

новим електроприводом / Кузнецов Б.І., Курцева Л.Б., Калюжна О.В.; заявл. 03.09.2012; опубл. 11.03.2013, Бюл. №5.

2. Трьохмасова система управління швидкістю обертання і натягом багатодвигуновим електроприводом папірообмотувальної машини / Б.І. Кузнецов, Л.Б. Курцева, О.М. Пономаренко, М.В. Лучанінова // Системи обробки інформації. – Х.: ХУПС, 2013. – Вип. 9 (116). – С. 41-45.

3. Курцева Л.Б. Синтез та дослідження аналогової і цифрової системи управління прокатного стану / Л.Б. Курцева, А.О. Власов // Системи управління навігації та зв'язку. – Полтава: ПНТУ, 2014. – Вип. 2(30). – С. 53-57.

Надійшла до редколегії 21.08.2015

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Б.Т. Кононов, Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.

## ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЦИФРОВОЙ ДВУХМАСОВОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОКАТНОЙ КЛЕТИ С ИЗМЕНЕНИЕМ ПЕРИОДА ДИСКРЕТНОСТИ И С ОПТИМАЛЬНЫМ DLQR - РЕГУЛЯТОРОМ

Л.Б. Курцева, Н.С. Еремина

Выполнен расчет динамических характеристик цифровой двухмассовой системы управления за изменением периода дискретности электроприводом прокатной клетки стана холодной прокатки, полученные по полному вектору состояния по задающему и возмущающему действиям. Построены динамические характеристики по всем переменным состояниям: скорости рабочих валков, момента упругости, скорости двигателя, момента двигателя, рывка двигателя, напряжения на входе системы, напряжения в обратной связи и напряжения на выходе интегрирующей части ПИ - регулятора по задающему и возмущающему действиям. Проведен анализ цифровой двухмассовой системы управления за изменением периода дискретности.

**Ключевые слова:** прокатный стан, двухмассовая система управления, математическая модель, задающее действие, возмущающее действие, период дискретности, переходный процесс, динамические характеристики.

## DYNAMIC CHARACTERISTICS OF DIGITAL DUAL-MASS CONTROL SYSTEMS ROLLING MILL FOR THE PERIOD CHANGE DISCRETE AND OPTIMAL DLQR - REGULATOR

L.B. Kurtseva, N.S. Eremina

The calculation of dynamic descriptions of digital two mass control the system after a change period of discreteness is executed by the electro mechanic of rental cage of figure of the cold rolling, states got on a complete vector on a questioner and revolting actions. Dynamic descriptions are built on all of state variables: speed of workings rollers, moment of resiliency, speed of engine, moment of engine, jerk of engine, tension on the entrance of the system, tension in a feed-back and tension on the output of integrating part of PI - regulator on revolting and questioner actions. The analysis of digital two mass control the system after a change period of discreteness is conducted.

**Keywords:** flatting mill, two mass control the system, mathematical model, questioner an action, revolting an action, period of discreteness, transient, dynamic descriptions.