

УДК 378.14

Л.Б. Курцева, Н.С. Єршоміна, Ю.М. Шкоріна

Українська інженерно-педагогічна академія, Харків

## ЦИФРОВА ТРЬОХМАСОВА СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ ШВИДКІСТЮ ОБЕРТАННЯ І НАТЯГОМ БАГАТОДВИГУНОВИМ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ ПАПІРООБМОТУВАЛЬНОЇ МАШИНИ

Проведені дослідження динамічних характеристик цифрової трьохмасової системи управління швидкістю обертання і натягом багатодвигуновим електроприводом папірообмотувальної машини. Для перетворення аналогової системи управління у цифрову використований метод екстраполятора нульового порядку.

**Ключові слова:** папірообмотувальна машина, трьохмасова система управління, гальмівний механізм, рівняння стану, перехідний процес, момент інерції, динамічні характеристики.

### Вступ

**Постановка проблеми.** Кабельне виробництво в цілому є достатньо традиційним, а технологія – відпрацьованою. Одним з основних технологічних процесів при виробництві кабельних виробів є процес екструзії, який вдає із себе витискування, як правило розплавленого, полімеру на рухому кабельну заготовку. Ізоляція багатьох типів кабелів і проводів складається з паперових або пластмасових стрічок або з ниток (бавовняна пряжа, скляне волокно, синтетичне волокно і т.ін.). Основним способом накладення такої ізоляції є обмотка стрічками або нитками струмопровідних жил. Тому різні обмотувальні машини для накладення стрічкової і волокнистої ізоляції є типовим устаткуванням кабельних заводів. Подібні машини широко застосовуються у виробництві силових кабелів всієї напруги, обмотувальних і монтажних проводів, кабелів зв'язку. Використання цифрової техніки у системах управління обмотувальними машинами дозволяє збільшити точність та швидкодію перехідних процесів, тому і є важливою проблемою.

**Аналіз останніх досягнень і публікацій.** Аналіз останніх досягнень [1 – 4], показав, що дослідження цифрової трьохмасової системи управління швидкістю обертання і натягом папірообмотувальної машини дозволить стабілізувати швидкість електроприводів при роботі їх в перехідних і гальмувальних режимах та підтверджує **актуальність** синтезу систем управління.

$$A_{dl} = \begin{bmatrix} 0.03047 & -8.393e-6 & 0.5778 & -1.146e-5 & 0.3752 & -6.527e-11 & -1.031e-8 & 3.859e-4 & -3.417e-5 \\ 2.397e+4 & -0.5352 & 8762 & 0.5588 & -3.087e+4 & 1.202e-5 & 16.68e-4 & -53.3 & 3.829 \\ 5.778e-1 & -30.68e-5 & -51.95e-2 & -75.89e-7 & 0.8671 & -83.95e-11 & -10.08e-8 & 26.83e-4 & -15.22e-5 \\ 3.273e+4 & 0.5588 & 2.167e+4 & -13.84e-2 & -4.79e+4 & 13.16e-5 & 0.01369 & -301.3 & 13.14 \\ 2.791e-2 & 8.04e-7 & 6.449e-2 & 12.47e-7 & 73.88e-2 & -7.028e-9 & -60.93e-8 & 10.56e-3 & -33.45e-5 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 51.82e-2 & -3.773 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 37.73e-3 & 89.56e-2 & 0 & 0 \\ 25.63e-5 & 12.4e-10 & 17.82e-5 & 7.007e-9 & 94.35e-4 & -35.63e-7 & -16.41e-5 & 98.98e-2 & 33.95e-5 \\ 39.83e-2 & 15.63e-5 & 1.774 & 5.362e-5 & 52.43 & 74.7e-6 & 50.14e-4 & -59.58 & 97.92e-2 \end{bmatrix};$$

**Метою статті** є розробка математичної моделі цифрової трьохмасової системи управління швидкістю обертання і натягом багатодвигуновим електроприводом папірообмотувальної машини і побудова на ПЕОМ її динамічних характеристик.

### Виклад матеріалу дослідження, отриманих наукових результатів

Введемо вектор стану цифрової трьохмасової системи управління з урахуванням пружних елементів, компонентами якого є: швидкість приводного механізму  $V_n(k)$ , швидкість сходу стрічки з кружка  $V_c(k)$  і натягу стрічки  $S(k)$ .

$$\bar{X}(k) = \begin{Bmatrix} V_d(k), F_{y1}(k), V_p(k), F_{y2}(k), \\ V_n(k), V_m(k), F_m(k), V_c(k), S(k) \end{Bmatrix}.$$

Введемо вектор управління цифрової трьохмасової системи управління  $\bar{U}(k)$ , компонентами якого є сила приводного двигуна  $F_d(k)$  і напруга на гальмувальному двигуні  $U_T(k)$ :

$$\bar{U}(k) = \{F_d(k), U_T(k)\}^T.$$

Для початкового радіусу розмотки  $r_n = 0,4m$ , середнього радіусу розмотки  $r_n = 0,2495m$ , початкового радіусу розмотки  $r_n = 0,4m$  цифрової трьохмасової системи управління матриці стану і управління мають такий вигляд:

$$\begin{aligned}
 A_{d2} &= \begin{pmatrix} 0.03058 & -8.386e-6 & 0.5791 & -1.14e-5 & 0.3689 & -1.058e-10 & -1.658e-8 & 50.22e-5 & -4.436e-5 \\ 2.395e+4 & -0.5362 & 8604 & 0.5522 & -3.015+4 & 1.933e-5 & 26.79e-4 & -69.22 & 4.954 \\ 5.791e-1 & -30.13e-5 & -51.24e-2 & -73.53e-6 & 0.8374 & -13.49e-10 & -16.16e-8 & 34.75e-4 & -19.59e-5 \\ 3.255e+4 & 0.5522 & 2.1e+4 & -30.98e-3 & -4.524e+4 & 21.11e-5 & 0.0219 & -388.8 & 16.8 \\ 36.09e-3 & 10.32e-7 & 81.91e-3 & 15.49e-7 & 66.87e-2 & -11.25e-9 & -97.13e-8 & 13.55e-3 & -42.27e-5 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 51.82e-2 & -3.773 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 37.73e-3 & 89.56e-2 & 0 & 0 \\ 25.73e-5 & 12.42e-10 & 17.8e-5 & 6.974e-9 & 71e-4 & -43.99.63e-7 & -20.27e-5 & 99.21e-2 & 26.18e-5 \\ 51.71e-2 & 20.22e-6 & 2.284 & 6.856e-5 & 50.37 & 92.19e-6 & 61.87-4 & -59.56 & 97.86e-2 \end{pmatrix}; \\
 A_{d3} &= \begin{pmatrix} 0.03064 & -8.382e-6 & 0.5797 & -1.136e-5 & 0.3653 & -6.255e-11 & -9.749e-9 & 56.94e-5 & -5.023e-5 \\ 2.394e+4 & -0.5367 & 8521 & 0.5484 & -2.973e+4 & 1.136e-5 & 15.74e-4 & -78.4 & 5.6 \\ 5.797e-1 & -29.84e-5 & -50.86e-2 & -72.17e-6 & 0.8205 & -79.23e-10 & -94.86e-9 & 39.29e-4 & -22.09e-5 \\ 3.246e+4 & 0.5487 & 2.064e+4 & -40.81e-3 & -43.73e+4 & 12.39e-5 & 0.01284 & -438.8 & 18.87 \\ 40.43e-3 & 11.56e-7 & 91.38e-3 & 17.17e-7 & 62.96e-2 & -65.92e-9 & -56.82e-8 & 15.25e-3 & -47.18e-5 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 51.82e-2 & -3.773 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 37.73e-3 & 89.56e-2 & 0 & 0 \\ 59.63e-7 & 28.81e-10 & 41.34e-5 & 16.35e-9 & 14.51e-4 & -22.81e-7 & -10.52e-5 & 99.84e-2 & 54.33e-6 \\ 57.91e-2 & 22.67e-6 & 2.56 & 77.25e-6 & 49.3 & 47.78e-6 & 32.08-4 & -59.56 & 98.31e-2 \end{pmatrix}; \\
 B_{d1} &= \begin{pmatrix} 2.009e-5 & -3.926e-11 \\ 0.9504 & 8.012e-6 \\ 1.169e-5 & -6.4e-10 \\ 0.3655 & 11.42e-5 \\ 2.326e-7 & -7.221e-9 \\ 0 & 3.773 \\ 0 & 0.1044 \\ 1.408e-10 & -6.232e-6 \\ 2.625e-6 & 9.607e-5 \end{pmatrix}; \quad B_{d2} = \begin{pmatrix} 2.009e-5 & -6.392e-11 \\ 0.9503 & 1.29e-5 \\ 1.17e-5 & -1.03e-9 \\ 0.3643 & 18.36e-5 \\ 30.196e-8 & -11.59e-9 \\ 0 & 3.773 \\ 0 & 0.1044 \\ 1.416e-10 & -76.94e-7 \\ 34.16e-6 & 11.86e-5 \end{pmatrix}; \quad B_{d3} = \begin{pmatrix} 2.009e-5 & -3.725e-11 \\ 0.9502 & 7.591e-6 \\ 1.17e-5 & -6.055e-10 \\ 0.3673 & 10.79e-5 \\ 3.38e-7 & -6.802e-9 \\ 0 & 3.773 \\ 0 & 0.1044 \\ 3.276e-10 & -39.88e-7 \\ 38.21e-6 & 6.144e-5 \end{pmatrix}.
 \end{aligned}$$

Полюса системи для початкового радіусу розмотки  $r_n = 0,4m$  рівні

$$\begin{aligned}
 z_{1,2} &= -0.89433 \pm j0.093; z_{3,4} = 0.32123 \pm j0.91732 \\
 z_{5,6} &= 0.95253 \pm j0.17643; z_7 = 0.91095; \\
 z_{8,9} &= 0.70692 \pm j0.32679.
 \end{aligned}$$

Полюса системи управління для середнього радіусу розмотки при  $r_c = 0,2594m$ :

$$\begin{aligned}
 z_{1,2} &= -0.89394 \pm j0.08948; z_{3,4} = 0.29831 \pm j0.91703 \\
 z_{5,6} &= 0.93866 \pm j0.161094; z_7 = 0.90431; \\
 z_{8,9} &= 0.70692 \pm j0.32679.
 \end{aligned}$$

Полюса системи для кінцевого радіусу розмотки  $r_c = 0,1m$ :

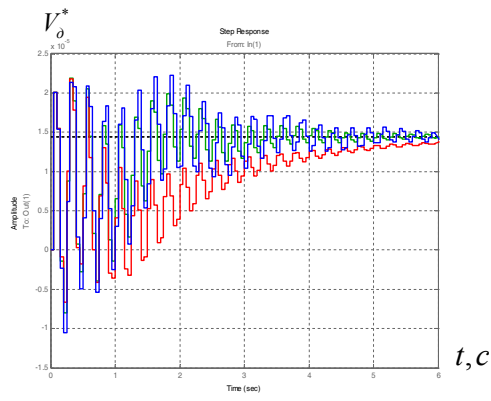
$$\begin{aligned}
 z_{1,2} &= -0.89394 \pm j0.08948; z_{3,4} = 0.29831 \pm j0.91703 \\
 z_{5,6} &= 0.93866 \pm j0.16109; z_7 = 0.90431; \\
 z_{8,9} &= 0.70692 \pm j0.32679.
 \end{aligned}$$

На рис. 1 представлені динамічні характеристики сили двигуна по приводному каналу для трьох значень радіусів розмотки, на рис. 2 – динамічні характеристики напруги на гальмувальний канал. Стале значення сили пружності  $F_y^*(t)$  рівне силі

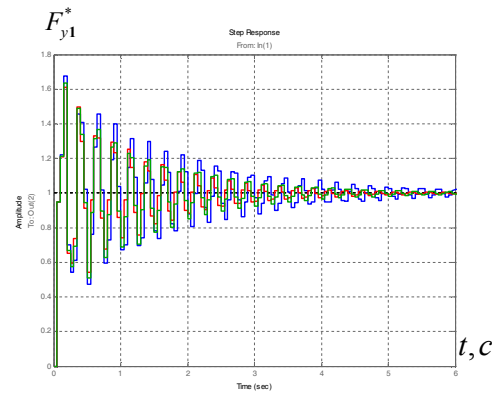
приводного механізму  $F_n^*(t)$ . У перехідному процесі спостерігаються високочастотні коливання, викликані наявністю пружних елементів. Динамічні характеристики швидкості редуктора  $V_p(t)$ , показані на рис. 1, в, схожі на динамічні характеристики швидкості двигуна  $V_d(t)$  (рис. 1, а).

При подачі сили двигуна на приводний канал зміни стану: швидкість гальмувального механізму –  $V_T = 0$  (рис. 1, е) і сила гальмувального механізму –  $F_T = 0$  (рис. 1, е) рівні нулю, так як ці зміни стану змінюються тільки при зміні завдання напруги  $U_T(t)$  на гальмувальний механізм.

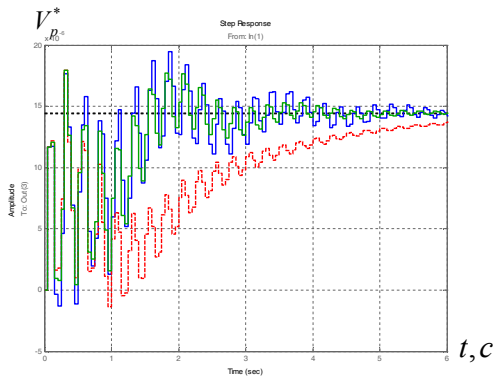
Динамічні характеристики, рис. 1, при початковому радіусі розмотування  $r_n$  і середньому радіусі розмотування і при кінцевому радіусі розмотування сильно коливальні. Стале значення швидкостей з ходу стрічки з кружка  $V_c(t)$ , швидкостей двигуна  $V_d(t)$ , редуктора  $V_p(t)$  і приводного механізму  $V_n(t)$  рівні і всі перехідні функції закінчуються приблизно через 8 с.



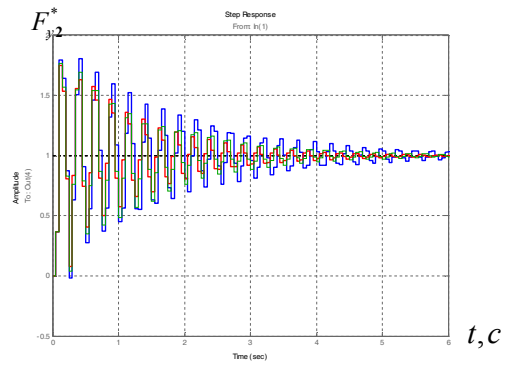
а – швидкість двигуна



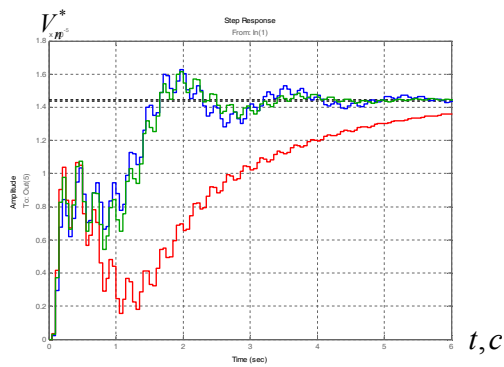
б – сила пружності швидкохідного валу



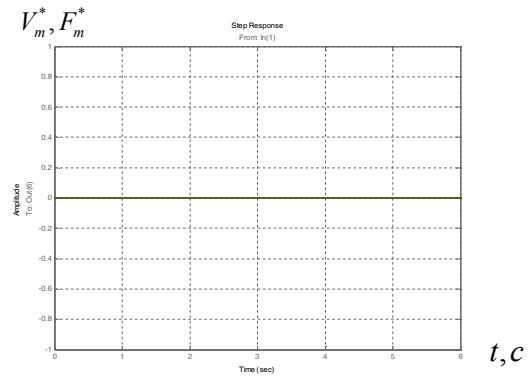
в – швидкість редуктора



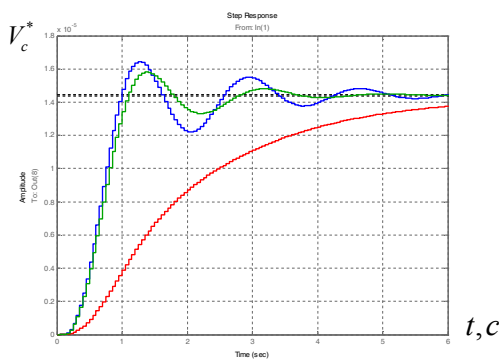
г – сила пружності тихохідного валу



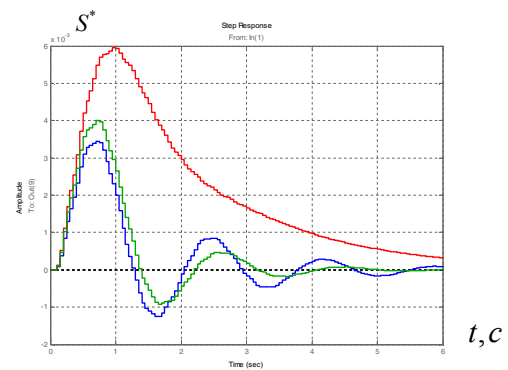
д – швидкість приводного механізму



е – швидкість і сила гальмувального механізму

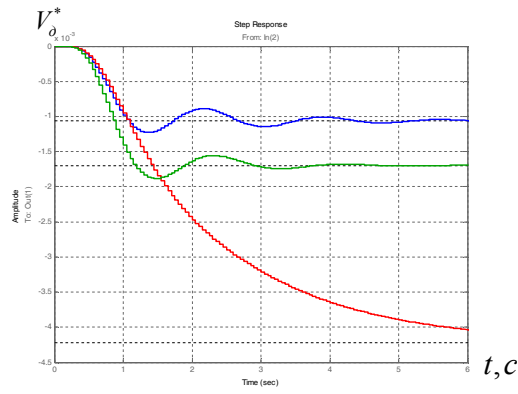


ж – швидкість з ходу стрічки

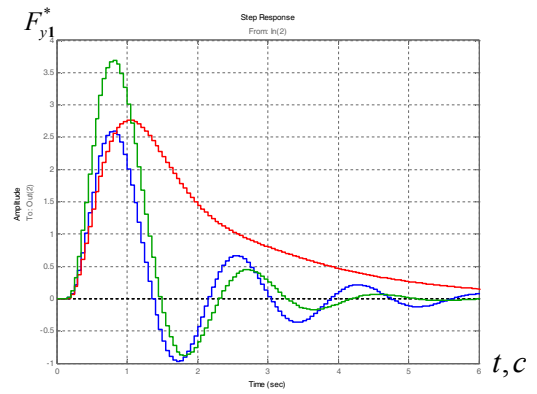


з – натяг стрічки

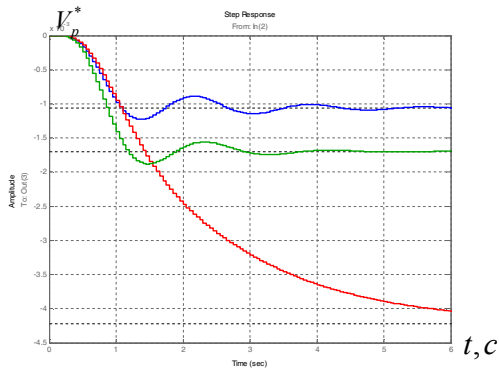
Рис. 1. Динамічні характеристики сили на приводний канал



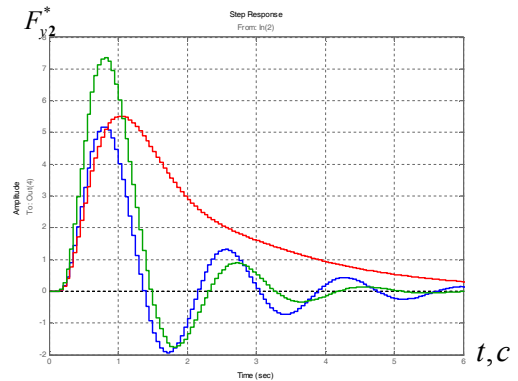
а – швидкість двигуна



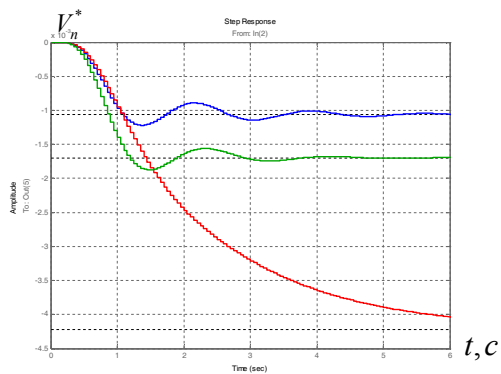
б – сила пружності швидкохідного валу



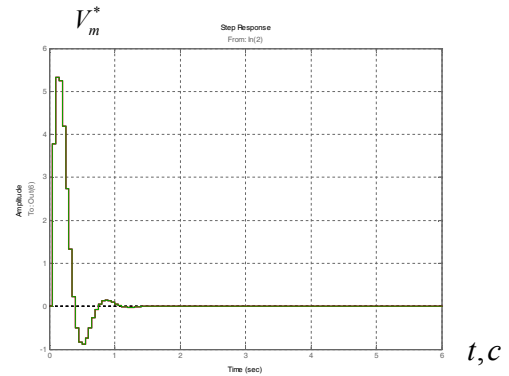
в – швидкість редуктора



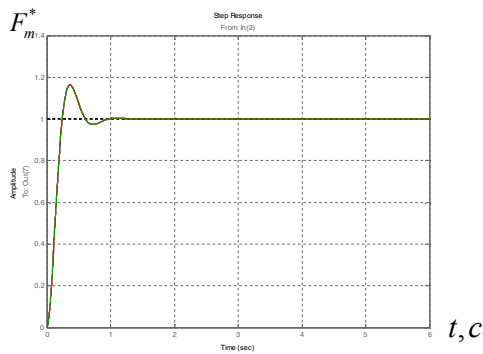
г – сила пружності тихохідного валу



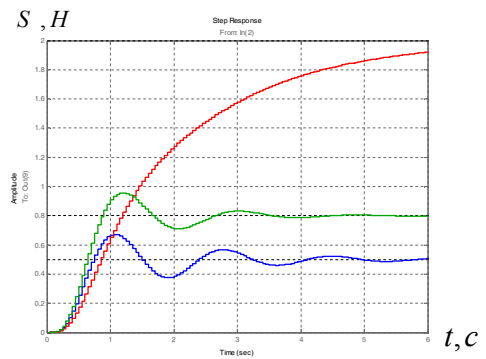
д – швидкість приводного механізму



е – швидкість гальмувального механізму



ж – сила гальмувального механізму



з – натяг стрічки

Рис. 2. Динамічні характеристики напруги на гальмувальний канал

Швидкість обертання приводного двигуна  $V_d(t)$ , редуктора  $V_p(t)$  і приводного механізму  $V_n(t)$  співпадають між собою. Сили пружності швидкохідного і тихохідного валів трьохмасової системи управління також співпадають і сильно коливаються. Динамічні характеристики при подачі одиничного ступінчастого сигналу напруги на вхід гальмувального каналу рис. 2, а ÷ з. На рис. 2, а показані графіки динамічних характеристик швидкості приводного двигуна  $V_d(t)$ . При зміні радіусу розмотування просадка швидкості (стале значення) пропорційна радіусу розмотування. Це відбувається за рахунок того, що при однаковому гальмувальному моменту потрібний різний момент опору кружка стрічки з різним радіусом. Динамічні характеристики коливальні. На рис. 2, б, в показані динамічні характеристики сил пружності  $F_{n1}(t)$ ,  $F_{n2}(t)$ . У початковий момент часу спостерігається збільшення сили пружності, а потім сила пружності повертається знов до нульового значення. Динамічні характеристики сильно коливальні.

На рис. 2, з показані динамічні характеристики зміни натягу стрічки  $S^*(t)$ . У початковий момент часу натяг збільшується, оскільки за рахунок збільшення натягу відбувається збільшення швидкості обертання кружка із стрічкою. Стале значення натягу рівне постійному значенню. Динамічні характеристики мають одне коливання.

На рис. 2, е, ж показані динамічні характеристики швидкості і сили гальмувального механізму. Сталі значення швидкості і сили гальмівного механізму рівні постійному значенню. Динамічні характеристики не мають високочастотних коливань і тут не виявляється наявності пружних коливань. Динамічні характеристики закінчуються приблизно за 1 с.

## Висновки

Складена математична модель двоканальної цифрової трьохмасової системи управління з наявністю виконавчих приводів і з урахуванням пружних елементів між валом двигуна, редуктора і приводним механізмом. Розглянутий вплив зміни параметрів математичної моделі папірообмотувальної машини як трьохмасової системи управління. По диференціальним рівнянням стану аналогової трьохмасової системи управління [2], за допомогою системи пакету «MATLAB» побудовані динамічні характеристики. При цьому також виконаний розрахунок динамічних характеристик для трьох радіусів розмотування стрічки з кружка. Для перетворення аналогової системи управління у цифрову використований метод екстраполятора нульового порядку.

В перспективі доцільно досліджувати динамічні характеристики цифрової двохмасової системи управління папірообмотувальної машини.

## Список літератури

1. Кузнецов Б.І., Курцева Л.Б., Калюжна О.В. Цифрова система регулювання багатодвигуновим електроприводом. Україна. Патент № 78140, МПК H02P 5/46. (2006.01), заявл. 03.09.2012; опубл. 11.03.2013, Бюл. № 5.
2. Кузнецов Б.И. Синтез электромеханических систем со сложными кинематическими цепями: монография / Б.И. Кузнецов, Т.Б. Никитина, В.В. Коломиец. – Х., 2005. – 512 с.
3. Александров Е.Е. Оптимизация электромеханических систем с упругими элементами / Е.Е. Александров, Б.И. Кузнецов, А.Е. Радиевский. – Х.: Основа, 1995. – 304 с.
4. Медведев В.С. Control System Toolbox. MATLAB 5 для студентов / В.С. Медведев, В.Г. Потемкин. – М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 1999. – 287 с.

Надійшла до редколегії 10.02.2015

Рецензент: канд. техн. наук, проф. С.В. Хуторненко, Українська інженерно-педагогічна академія, Харків.

## ЦИФРОВАЯ ТРЬОХМАСОВАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ СКОРОСТЬЮ ВРАЩЕНИЯ И НАТЯЖЕНИЕМ МНОГОДВИГАТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ БУМАГООБМОТОЧНОЙ МАШИНЫ

Л.Б. Курцева, Н.С. Еремина, Ю.М. Шкорина

Составлена математическая модель двухканальной цифровой трьохмасовой системы управления с наличием исполнительных приводов и с учетом упругих элементов между валом двигателя, редуктора и приводным механизмом. Рассмотрено влияние изменения параметров математической модели бумагообмоточной машины как трьохмасовой системы управления. Построенные динамические характеристики и выполнен расчет динамических характеристик для трех радиусов размотки ленты с кружка. Для преобразования аналогового системы управления в цифровую использован метод экстраполятора нулевого порядка.

**Ключевые слова:** бумагообмоточная машина, трехмассовая система управления, тормозной механизм, уравнение состояния, переходный процесс, момент инерции, динамические характеристики.

## DIGITAL THREE MASS CONTROL THE SYSTEM BY SPEED OF ROTATION AND PULL MULTIMOTIVE THE ELECTROMECHANIC OF PAPER-LAPPING MACHINE

L.B. Kurceva, N.S. Eremina, Yu.M. Shkorina

The mathematical model of twochannel digital threemass control the system with a presence executive drives is made and taking into account resilient elements between the billow of engine, reducing gear and by a drive mechanism. Influence of change of parameters the mathematical model of paper-lapping machine as mpxemacовой control the system is considered. Built dynamic descriptions and the calculation of dynamic descriptions is executed for three radiuses of unwinding of ribbon from a group. For transformation of analog control the system to digital the method of extrapolation of a zero order is utilized.

**Keywords:** paper-lapping machine, three-mass control the system, brake mechanism, equalization of the state, transient, moment of inertia, dynamic descriptions.