

УДК 378.14

Б.І. Кузнецов, Л.Б. Курцева, Н.С. Єршоміна, Ю.О. Алферов

Українська інженерно-педагогічна академія, Харків

## ЦИФРОВА ДВОХМАСОВА СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ ШВИДКІСТЮ ОБЕРТАННЯ І НАТЯГОМ БАГАТОДВИГУНОВИМ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ ПАПІРО-ОБМОТУВАЛЬНОЇ МАШИНИ З УРАХУВАННЯМ ВИКОНАВЧИХ ПРИВОДІВ

*Проведені дослідження динамічних характеристик цифрової двохмасової системи управління швидкістю обертання і натягом багатодвиговим електроприводом папірообмотувальної машини з урахуванням виконавчих приводів.*

**Ключові слова:** папірообмотувальна машина, двохмасова система управління, гальмувальний механізм, ривняння стану, перехідний процес, момент інерції, динамічні характеристики, цифровий оптимальний регулятор.

### Вступ

**Постановка проблеми.** До системи регулювання натягу обмотувальних стрічок і швидкості обертання приводного механізму пред'являються високі вимоги по точності підтримки регульованих параметрів. Складність управління обмотувальною машиною як об'єктом управління полягає, по-перше, в наявності зв'язків між каналами регулювання натягу обмотувальної стрічки і швидкості обертання приводного механізму: при збільшенні зусилля гальмувального механізму одночасно із збільшенням натягу обмотувальної стрічки швидкість обертання приводного механізму зменшується, оскільки гальмувальний механізм створює додатковий момент на приводний механізм. Причому, цей взаємозв'язок виявляється як в перехідних, так і в сталих режимах. З іншого боку, при збільшенні сили приводного механізму швидкість обертання приводного механізму зростає, проте при цьому в перші моменти часу натягнення обмотувальної стрічки також зростає. Потім після закінчення певного часу величина натягу обмотувальної стрічки повертається в початковий стан, а швидкість обертання приводного механізму залишається на тому ж високому рівні.

Таким чином, в обмотувальній машині як в об'єкті управління є взаємозв'язки між каналами, що виявляються як в сталих, так і в перехідних режимах, тоді як потрібно підтримувати регульовані координати на заданому рівні з необхідною точністю.

**Аналіз останніх досягнень і публікацій.** Аналіз останніх досягнень показав, що дослідження цифрової двомасової системи управління швидкістю обертання і натягом папірообмотувальної машини дозволить стабілізувати швидкість електроприводів при роботі їх в перехідних і гальмувальних режимах, що одержуються за рахунок формування лінійного оптимального закону управління цифровим астатичним регулятором швидкості і натягу

для забезпечення регулювання приводного і гальмувального механізмів.

**Аналіз останніх публікацій** по синтезу систем управління з використанням оптимальних цифрових регуляторів [1 – 6] показує, що даний напрям є актуальним. **Метою статті** є синтез цифрової двохмасової системи управління швидкістю обертання і натягом багатодвиговим електроприводом папірообмотувальної машини з урахуванням виконавчих приводів та з використанням оптимального астатичного цифрового регулятора і побудова на ПЕОМ її динамічних характеристик.

### Виклад матеріалу дослідження, отриманих наукових результатів

Ефективним методом управління складними електромеханічними системами є відмова від структури системи підлеглого регулювання і реалізації управління по повному вектору стану. Для визначення коефіцієнтів підсилення зворотних зв'язків по всіх змінних стану в даний час найбільшого поширення набули два методи: метод модального управління і метод оптимального управління по інтегральному квадратичному критерію якості. Багато труднощів по обґрунтуванню і вибору стандартної форми при модальному управлінні можуть бути усунені при визначенні коефіцієнтів посилення зворотних зв'язків по повному вектору стану в результаті рішення завдання оптимального управління по інтегральному квадратичному критерію якості. В цьому випадку основні вимоги до системи управління можуть бути забезпечені відповідним вибором вагових матриць в інтегральному квадратичному критерії якості. Одночасно з реалізацією заданих перехідних процесів системи можуть бути враховані обмеження, що накладаються на змінні стани і управління, а побічно можуть бути враховані і обмеження на величини коефіцієнтів підсилення зворотних зв'язків по відповідних змінних стану системи.

Конкретна постановка завдання управління визначається типом рівнянь, що описують динаміку об'єкту управління, видом мінімізованого функціонала якості і особливо для електромеханічних систем - обмеженнями на управління і змінні стани об'єкту управління.

Розглянемо побудову цифрового оптимального астатичного регулятора. Початкова система з урахуванням допоміжних змінних стану має вигляд

$$Z_1(k+1) = V_3(k) - V_d(k),$$

$$Z_2(k+1) = S_3(t) - S(t).$$

для розширеного вектора стану

$$\bar{X}(k) =$$

$$= \{F_n(k), V_n(k), V_T(k), F_T(k), V_c(k), S(k), Z_1(k), Z_2(k)\}^T,$$

вектора управління

$$\bar{U}(k) = \{U_1(k), U_2(k)\}^T,$$

і вектора задаючих дій

$$\bar{U}_3(k) = \{V_3(k), S_3(k)\}^T.$$

Матриці стану та управління розширеного вектору аналогової двоканальної двомасової системи управління з урахуванням виконавчих електроприводів:

$$A = \begin{pmatrix} -\frac{K_1 R_n^2}{I_n} & -K_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{R_n^2}{I_n} & -\frac{\beta_n^*}{I_n} & 0 & 0 & 0 & -\frac{\lambda_n^2}{I_n} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -K_5 & -K_6 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{R_m^2}{I_c} & -\frac{\beta_c^*}{I_c} & \frac{r_{cc}^2}{I_c} & 0 & 0 \\ 0 & C_s & 0 & 0 & -C_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -K_n & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -K_T & 0 \end{pmatrix};$$

$$B = \begin{pmatrix} K_3 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & K_4 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}; \quad B1 = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ K_n & 0 \\ 0 & K_T \end{pmatrix}$$

Вагові матриці у критерії якості

$$R1 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 10 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 10 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1000 \end{pmatrix};$$

$$R2 = \begin{pmatrix} 10^{-5} & 0 \\ 0 & 0.1 \end{pmatrix}$$

Оптимальний цифровий регулятор для початкового радіусу розмотки при  $r_{cc} = 0,4m$  отримаємо

$$F_{d1} = \begin{pmatrix} -5.16 \cdot 10^{-7} & -9.84 \cdot 10^{-1} & 5.175 \cdot 10^{-11} \\ -1.83 \cdot 10^{-7} & -3.97 \cdot 10^{-1} & -1.912 \cdot 10^{-7} \\ 1.97 \cdot 10^{-8} & -1.42 \cdot 10^{-4} & 4.05 \cdot 10^{-4} \\ -5.75 \cdot 10^{-5} & 4.03 \cdot 10^{-1} & -9.997 \cdot 10^{-1} \\ 1.53 \cdot 10^{+1} & -1.112 \cdot 10^{-12} \\ -1.112 \cdot 10^{-1} & 1.53 \cdot 10^{+2} \end{pmatrix}.$$

Полюса замкненої системи з оптимальним цифровим регулятором для початкового радіусу

$$z_1 = 0.2244; z_2 = 0.2344;$$

$$z_{3,4} = 0.9744 \pm j0.0422;$$

$$z_{5,6} = 0.9593 \pm j0.0198;$$

$$z_7 = 0.98755; z_8 = 0.2344.$$

Оптимальний цифровий регулятор для середнього радіусу розмотки при  $r_{cc} = 0,2594m$  отримаємо:

$$F_{d2} = \begin{pmatrix} -5.834 \cdot 10^{-7} & -9.816 \cdot 10^{-1} & 8.8655 \cdot 10^{-11} \\ -2.067 \cdot 10^{-7} & -3.9661 \cdot 10^{-1} & -1.7417 \cdot 10^{-7} \\ 2.0697 \cdot 10^{-8} & -1.6115 \cdot 10^{-4} & 4.582 \cdot 10^{-4} \\ -5.2399 \cdot 10^{-5} & 4.03 \cdot 10^{-1} & 9.997 \cdot 10^{-1} \\ 1.5311 \cdot 10^{+1} & 1.5762 \cdot 10^{-12} \\ 1.5762 \cdot 10^{-15} & 1.5311 \cdot 10^{-2} \end{pmatrix}.$$

Полюса замкненої системи з оптимальним цифровим регулятором для середнього радіусу

$$z_1 = 0.23444; z_2 = 0.60653;$$

$$z_{3,4} = 0.9744 \pm j0.042219;$$

$$z_{5,6} = 0.99379 \pm j0.015984;$$

$$z_7 = 0.98925; z_8 = 0.2344.$$

Оптимальний цифровий регулятор для кінцевого радіусу розмотки при  $r_{cc} = 0,1m$  отримаємо:

$$F_{d3} = \begin{pmatrix} -6.5822 \cdot 10^{-7} & -9.7923 \cdot 10^{-1} & -6.9313 \cdot 10^{-11} \\ -2.3324 \cdot 10^{-7} & -3.9581 \cdot 10^{-1} & -7.5851 \cdot 10^{-8} \\ 9.0397 \cdot 10^{-8} & -1.8114 \cdot 10^{-4} & 5.1704 \cdot 10^{-4} \\ -2.282 \cdot 10^{-5} & 4.0304 \cdot 10^{-1} & -9.9981 \cdot 10^{-1} \\ 1.5311 \cdot 10^{+1} & -9.3743 \cdot 10^{-12} \\ -9.3743 \cdot 10^{-15} & 1.5311 \cdot 10^{-2} \end{pmatrix}.$$

Полюса замкненої системи з цифровим оптимальним регулятором для кінцевого радіусу

$$z_1 = 0.23444; z_2 = 0.60653;$$

$$z_{3,4} = 0.9744 \pm j0.042219;$$

$$z_{5,6} = 0.98785 \pm j0.012394;$$

$$z_7 = 0.9828; z_8 = 0.23444.$$

На рис. 1 (а ÷ е) показані динамічні характеристики по заданню на регулятор швидкості приводного механізму в системі з урахуванням виконавчих приводів на приводний механізм. Стале значення

швидкості приводного механізму рівне заданню, і, отже, система регулювання швидкості обертання приводного механізму є астатичною. Час регулювання швидкості приводного механізму складає 1,5с.

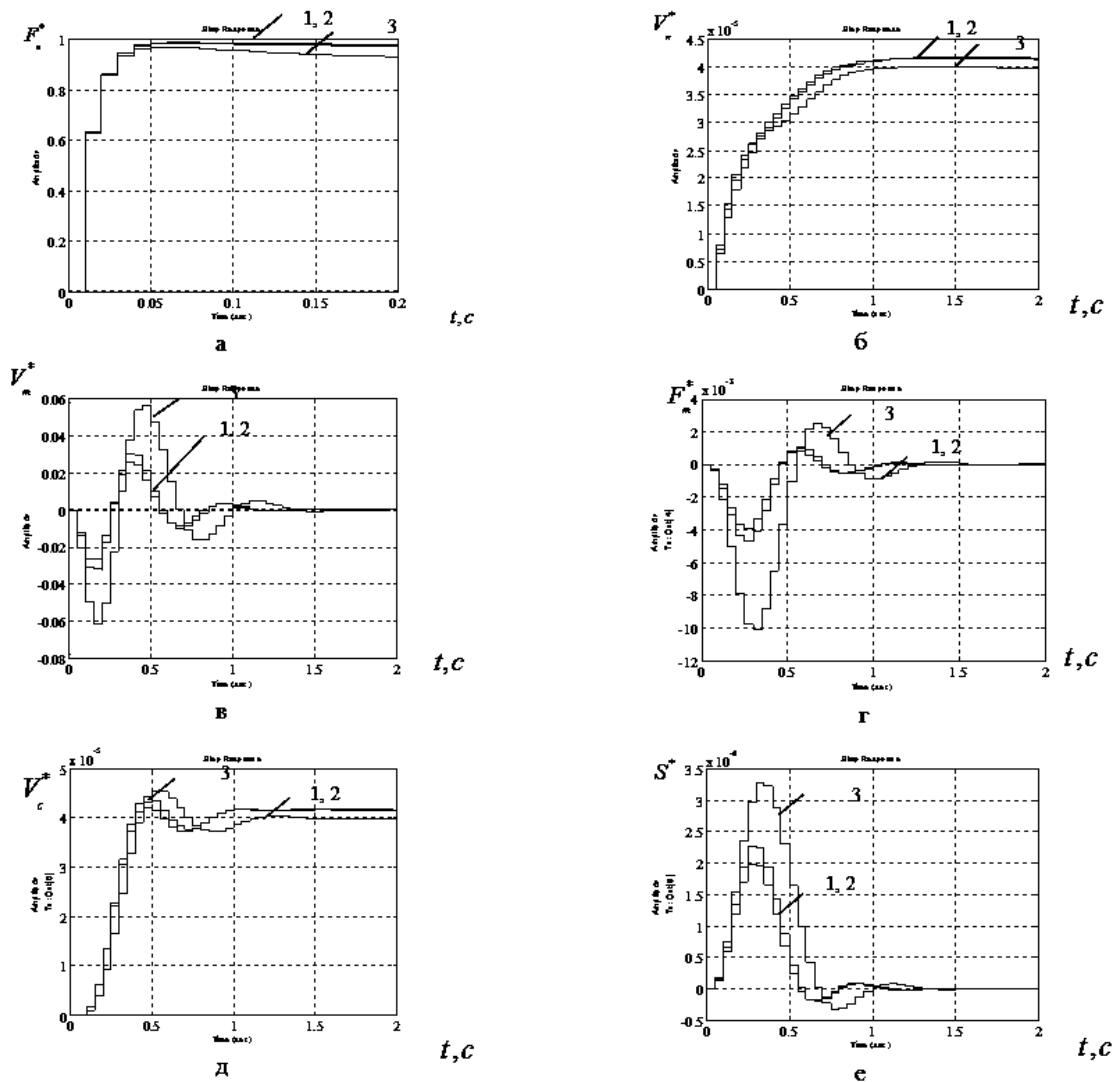


Рис. 1. Динамічні характеристики оптимальної цифрової двомасової системи управління з урахуванням виконавчих приводів на приводний механізм

За рахунок роботи оптимального регулятора динамічні характеристики для різних радіусів розмотування практично співпадають, що говорить про достатню грубість синтезованих регуляторів. Відмітимо, що в цьому випадку спостерігаються лише значні кидки швидкості зміни гальмувальної сили, хоча сталі значення їх рівні нулю.

На рис. 2 (а ÷ е) показані динамічні характеристики оптимальної цифрової двомасової системи управління з урахуванням виконавчих приводів на гальмувальний механізм.

Час регулювання перехідних функцій складає біля 1,5с. Зокрема, при синтезі оптимального регулятора з урахуванням виконавчих електроприводів вдалося зменшити час регулювання від 8 до 1,5 с. Як і при регулюванні швидкості обертання приводного механізму канал регулювання натягу є астатичним і

при замиканні оптимальним регулятором динамічні характеристики для різних радіусів розмотування практично співпадають, що ще раз говорить про грубість цієї системи.

## Висновки

Проведений розрахунок перехідних процесів оптимальної цифрової двоканальної двомасової системи управління з урахуванням виконавчих приводів на приводний та гальмувальний механізми. Застосування оптимальних астатичних цифрових регуляторів дозволило отримати задовільні перехідні процеси в системі з часом регулювання близько 1,5 с.

В перспективі доцільно досліджувати динамічні характеристики цифрової двохмасової системи управління папірообмотувальної машини з урахуванням пружних елементів.

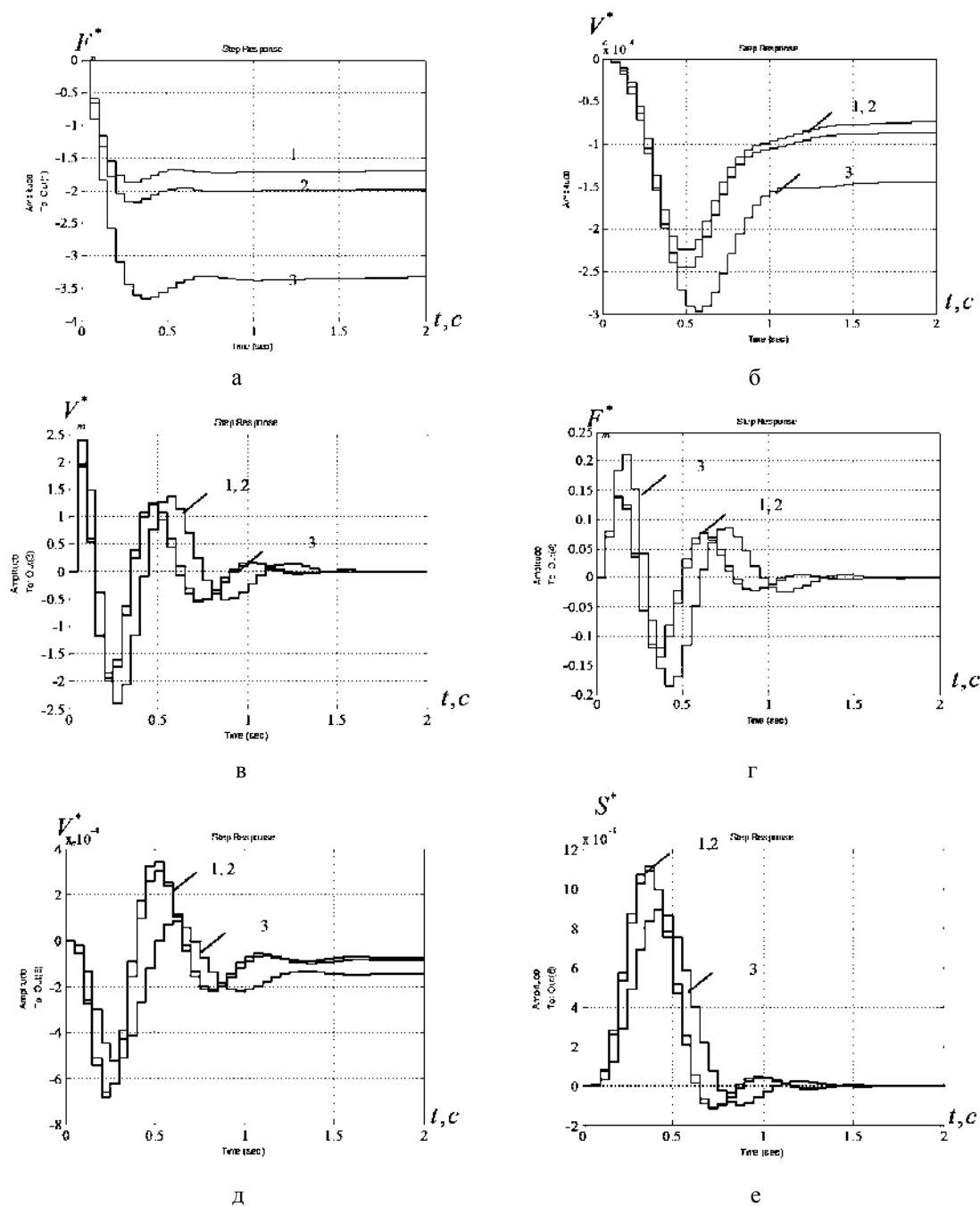


Рис. 2. Динамічні характеристики оптимальної цифрової двомасової системи управління з урахуванням виконавчих приводів на гальмувальний механізм

## Список літератури

1. Кузнецов Б.И., Новоселов Б.В. Проектирование взаимосвязанных систем управления / Б.И. Кузнецов, Б.В. Новоселов, А.А. Чаусов. – К.: Техника, 1994. – 232 с.
2. Кузнецов Б.И., Проектирование систем со сложными кинематическими цепями / Б.И. Кузнецов, Б.В. Новоселов, И.Н. Богаенко. – К.: Техника. 1996. – 282 с.
3. Кузнецов Б.И., Курцева Л.Б., Калюжна О.В. Цифровая система регулирования багатодвигуном електроприводом. Україна, Патент на корисну модель № 78140, МПК H02P 5/46. (2006.01), заявл. 03.09.2012; опубл. 11.03.2013, Бюл. № 5.
4. Трьохмасова система управління швидкістю обертання і натягом багатодвигуном електроприводом

папірообмотувальної машини / Б.И. Кузнецов, Л.Б. Курцева, О.М. Пономаренко, М.В. Лучанінова // Системи обробки інформації. – Х.: ХУПС, 2013. – Вип. 9 (116). – С. 41-45.

5. Кузнецов Б.И. Синтез электромеханических систем со сложными кинематическими цепями : монография / Б.И. Кузнецов, Т.Б. Никитина, В.В. Коломиец. – Х. УИ-ПА, 2005. – 512 с.

6. Александров Е.Е. Оптимизация электромеханических систем с упругими элементами / Е.Е. Александров, Б.И. Кузнецов, А.Е. Радиевский. – Х.: Основа, 1995. – 304 с.

Надійшла до редколегії 13.05.2014

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. В.І. Барсов, Українська інженерно-педагогічна академія, Харків.

**ЦИФРОВАЯ ДВУХМАССОВАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ СКОРОСТЬЮ ВРАЩЕНИЯ И НАТЯЖЕНИЕМ  
МНОГОДВИГАТЕЛЬНЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ БУМАГООБМОТОЧНОЙ МАШИНЫ С УЧЕТОМ  
ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ ПРИВОДОВ**

Б.И. Кузнецов, Л.Б. Курцева, Н.С. Еремина, Ю.А. Алферов

*Проведенный расчет переходных процессов оптимальной цифровой двухканальной двухмассовой системы управления с учетом исполнительных приводов на приводной и тормозной механизмы. Применение оптимальных астатических цифровых регуляторов позволило получить удовлетворительные переходные процессы в системе со временем регулирования около 1,5 с.*

**Ключевые слова:** бумагообмоточная машина, двухмассовая система управления, тормозной механизм, уравнение состояния, переходной процесс, момент инерции, динамические характеристики, цифровой оптимальный регулятор.

**DIGITAL TWOMASS CONTROL THE SYSTEM BY SPEED OF ROTATION AND PULL MULTIMOTIVE  
THE ELECTROMECHANIC OF PAPER-LAPPING TAKING INTO ACCOUNT EXECUTIVE DRIVES**

B.I. Kuznecov, L.B. Kurceva, N.S. Eremina, Yu.A. Alferov

*Conducted calculation of transients optimum by a digital twochannel two mass control the system taking into account executive drives on drive and brake mechanisms. Application of optimum astatic digital regulators allowed to get satisfactory transients in the system in course of time adjustments about 1,5 sec.*

**Keywords:** paper-lapping, two mass control the system, brake mechanism, equalization of the state, transitional process, moment of inertia, dynamic descriptions, digital optimum regulator.