

## МОДЕЛЬ ВИДОВЖЕННЯ РУХОМОЇ СТРІЧКИ В СТРІЧКОПРОВІДНИХ СИСТЕМАХ ІЗ ВИПЕРЕДЖЕННЯМ ШВИДКОСТІ ВЕДУЧИХ ПАР РУЛОННИХ РОТАЦІЙНИХ МАШИН

© Дурняк Б.В., Луцків І.М., 2004

**Розв'язана задача побудови моделі деформації стрічкопровідної системи із жорсткими зв'язками ведучих пар циліндрів із врахуванням послідовного випередження їх швидкостей, яка обчислюється інтегруванням на інтервалі часу приросту швидкості. Наведені результати комп'ютерного симулювання.**

**Untied task of construction of model of deformation of the conductribbon system with the hard copulas of anchorwomens of pairs of cylinders with consideration of the successive passing of their speeds, which is calculated by integration on interval of speed increase time. Led results of computer simulation.**

**Постановка проблеми.** Рулонні ротаційні машини є найбільш продуктивним, простим і перспективним видом друкарських машин. Вони мають раціональну будову друкарського апарата та неперервну подачу матеріалу, що задруковується у вигляді стрічки [5, 8, 9]. Разом з тим вони є складними високоавтоматизованими електромеханічними системами, складеними із окремих секцій. Вимагають складних систем керування електроприводу машини, систем автоматичного регулювання натягу стрічки, систем автоматичного суміщення фарб, намотування стрічки тощо [2, 3, 4, 5]. Підвищились вимоги до якості готової продукції, що вимагає створення ефективніших систем автоматичного керування та контролю. Вирішення цієї проблеми можливе лише за умови розвитку адекватних моделей стрічкопровідних систем, які описують складні взаємозв'язки між механічними, технологічними та електромеханічними параметрами, на підставі яких можна здійснювати синтез нових систем та ефективно налагодження існуючих.

**Аналіз результатів досліджень.** Існуючі моделі стрічкопровідних систем побудовані за певних припущень, внаслідок цього відносно видовження та натяг описуються системою диференціальних рівнянь першого порядку [2, 3, 4, 5, 7, 8]. Перевагою цих моделей є простота. Основним їхнім недоліком є те, що вони не повною мірою враховують динаміку видовження стрічки, зумовлене зміною швидкості стрічки на ділянці, що обмежує їх функціональні можливості. Вони не повною мірою описують динаміку стрічкопровідної системи, що унеможливило оптимальний синтез нових систем автоматичного керування стрічкопровідними системами та налагодження існуючих.

**Задачі досліджень.** У роботі розвиваються існуючі моделі видовження та натягу рухомої стрічки на ділянці, на підставі яких аналізується динаміка стрічкопровідних систем із випередженням швидкості ведучих пар циліндрів.

**Побудова математичної моделі.** Спрощена схема стрічкопровідної системи рулонної ротаційної машини з жорсткими валопроводами між ведучими парами циліндрів і приводом показана на рис. 1. Ведучі пари циліндрів зв'язані з головним валом машини валопроводом. Машина приводиться в рух від головного двигуна М. Стрічка змотується з рулона (який не показаний на рисунку) і з потрібним натягом послідовно проводиться друкарськими парами циліндрів багатосекційних друкарських апаратів, на яких здійснюється технологічна операція нанесення фарби на стрічку, тобто задрукування. Для якісного друкування потрібно сталий натяг стрічки на всіх стрічкопровідних

ділянках і невелика деформація стрічки. При відхиленні натягу погіршується якість друкованої продукції та можлива поява браку [2, 4, 5, 8, 9].

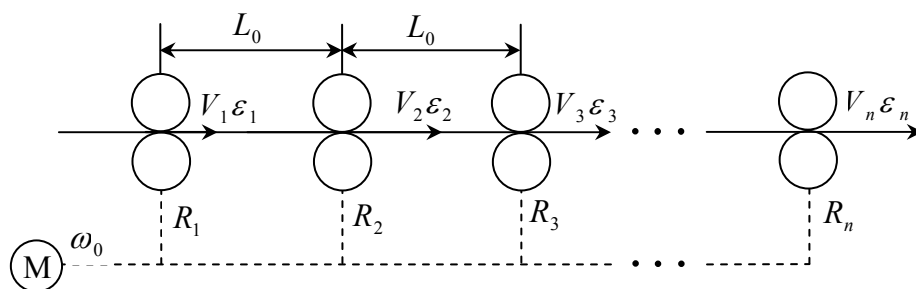


Рис. 1. Спрощена схема стрічкопровідної системи

Щоб скомпенсувати негативні впливи, кінематику машини розраховують із врахуванням видовження стрічки. Для цього лінійні швидкості на ведучих парах циліндрів повинні задовольняти такі нерівності:

$$V_1 < V_2 < V_3 < \dots < V_n. \quad (1)$$

Ця умова здійснюється за допомогою збільшення діаметрів стрічкопровідних циліндрів у кожній наступній секції.

Відносне значення збільшення швидкості залежить від типу стрічкопровідного матеріалу та його товщини, робочої швидкості, типу машини і в практиці проектування рулонних ротаційних офсетних друкарських машин знаходиться в межах 0,1–2 % [1, 5, 6].

Математичний опис стрічкопровідної системи рулонної ротаційної машини базується на моделі деформації ділянки стрічки, що приводиться в рух двома ведучими парами циліндрів, відомий під назвою диференційного рівняння деформації ділянки стрічки. При виведенні цього рівняння роблять відомі припущення, основні з яких [2, 3, 7]:

- швидкість другої ведучої пари є більшою за швидкість першої;
- поширення деформації вздовж стрічки відбувається миттєво;
- розтяг матеріалу на ділянці відбувається в межах пружної деформації, яка є лінійною і відповідає закону Гука;
- відсутнє проковзування матеріалу на ведучих парах циліндрів.

Зв'язок між абсолютним видовженням рухомої стрічки на ділянці, що приводиться в рух двома ведучими парами циліндрів (рис. 1) і швидкостями на вході та виході, описується простим диференціальним рівнянням [2, 3, 5, 7], яке запишемо так:

$$T \frac{d\Delta l_i}{dt} + \Delta l_i = \Delta l_{i-1} + \Delta l_{V_i}, \quad (2)$$

де  $\Delta l_i$  – абсолютне видовження стрічки на  $i$ -ій ділянці;  $\Delta l_{V_i}$  – видовження стрічки, зумовлене різницею лінійних швидкостей на початку і кінці ділянки, за умови, що  $V_{i-1} < V_i$ ;  $T$  – стала часу стрічкопровідної ділянки, яка визначає швидкість процесу зміни видовження стрічки на ділянці.

Зазначимо, що в існуючому рівнянні (2) при незмінному співвідношенні швидкостей ведучих пар в усталеному режимі, відносне видовження рухомої стрічки на ділянках приймають постійним [2, 3, 5, 7], що не відповідає дійсності.

$$\varepsilon_i = \frac{\Delta l_i}{L_0} = \frac{V_{i+1} - V_i}{V_i} = \text{const}, \quad (3)$$

де  $L_0$  – віддаль між провідними точками ведучих пар (довжина стрічки на міжсекційній ділянці),  $\varepsilon_i$  – відносне видовження стрічки на ділянці. Наголосимо, що в перехідних режимах відносна деформація стрічки на ділянці, зумовлена зміною швидкості, є змінною часу і тому не відповідає умові (3).

Розглянемо видовження стрічки на кінці ділянки для малих приростів [3, 5]:

$$\frac{d\Delta l_{Vi}}{dt} = V_{i+1} - V_i. \quad (4)$$

Проінтегрувавши цей вираз на інтервалі  $[0, T]$  (час проходження стрічки між точками контакту стрічкопровідних систем), визначимо видовження стрічки на ділянці, зумовлене приростом швидкості:

$$\Delta l_{Vi} = \int_0^T [V_{i+1} - V_i] dt. \quad (5)$$

Після підстановки виразу (5) у вираз (2) одержимо диференційне рівняння видовження рухомої стрічки на ділянці

$$T \frac{dl_i}{dt} + \Delta l_i = \Delta l_{i-1} + \int_0^T [V_{i+1} - V_i] dt. \quad (6)$$

Зазначимо, що права частина цього рівняння суттєво відрізняється від правої частини відомого рівняння (2).

Для зручності запису і подальшого аналізу опустимо знак приросту  $\Delta$  і подамо вираз (6) в операторній формі запису:

$$Tl_i(s)s + l_i(s) = l_{i-1}(s) + \frac{1 - e^{-Ts}}{s} [V_{i+1}(s) - V_i(s)]. \quad (7)$$

Зазначимо, що вираз  $\frac{1 - e^{-Ts}}{s}$  відповідає операції інтегрування на інтервалі  $[0, T]$ , а змінні  $l_i(s)$ ,  $V_i(s)$  є зображеннями відповідних змінних.

Поділивши вираз (7) на  $L_0$ , одержимо рівняння видовження рухомої стрічки на ділянці у безрозмірному вигляді:

$$T \frac{d\varepsilon_i}{dt} + \varepsilon_i = \varepsilon_{i-1} + \frac{1}{L} \int [V_{i+1} - V_i] dt. \quad (8)$$

Перейшовши до операторної форми запису, матимемо

$$T\varepsilon_i(s)s + \varepsilon_i(s) = \varepsilon_{i-1}(s) + \frac{1 - e^{-Ts}}{L_0 s} [V_{i+1}(s) - V_i(s)]. \quad (9)$$

Якщо прийняти швидкість у відносному вигляді, то рівняння набуде вигляду

$$T\varepsilon_i(s)s + \varepsilon_i(s) = \varepsilon_{i-1}(s) + \frac{1 - e^{-Ts}}{Ts} \varepsilon_V(s) \quad (10)$$

де  $\varepsilon_V = \frac{V_{i+1} - V_i}{V_i}$  – відносна швидкість.

Одержані залежності встановлюють зв'язки між видовженням стрічки на  $i$ -й ділянці рухомої стрічки і різницею швидкостей стрічки на кінці і початку ділянки та видовженням стрічки на попередній ділянці.

Як уже зазначалося вище, компенсація впливу різних збурень на видовження та натяг стрічки на ділянках у рулонних ротаційних машинах здійснюється за рахунок послідовного збільшення діаметрів стрічкопровідних циліндрів. Тому виразимо лінійну швидкість стрічкопровідних пар циліндрів через кутову швидкість і діаметри циліндрів

$$V_i = \omega_0 R_i, \quad (11)$$

де  $R_i$ ,  $\omega_0$  – радіус та кутова швидкість циліндрів.

Підставивши вираз (11) у вираз (9), одержимо

$$T\varepsilon_i(s)s + \varepsilon_i(s) = \varepsilon_{i-1}(s) + \frac{1 - e^{-Ts}}{L_0s} (R_{i+1} + R_i)\omega_0(s). \quad (12)$$

Наведене вище рівняння записане в рекурентній формі і тому дає змогу послідовно знайти зміну стану видовження рухомої стрічки (приймаючи  $i = 1, 2, 3, \dots, n$ ) в стрічкопровідній системі з  $n$  стрічкопровідними парами циліндрів:

$$\begin{aligned} T\varepsilon_1(s)s + \varepsilon_1(s) &= \varepsilon_0(s) + \frac{1 - e^{-Ts}}{L_0s} (R_2 - R_1)\omega_0(s) \\ T\varepsilon_2(s)s + \varepsilon_2(s) &= \varepsilon_1(s) + \frac{1 - e^{-Ts}}{L_0s} (R_3 - R_2)\omega_0(s) \\ T\varepsilon_3(s)s + \varepsilon_3(s) &= \varepsilon_2(s) + \frac{1 - e^{-Ts}}{L_0s} (R_4 - R_3)\omega_0(s) \\ &\dots\dots\dots \\ T\varepsilon_i(s)s + \varepsilon_i(s) &= \varepsilon_{i-1}(s) + \frac{1 - e^{-Ts}}{L_0s} (R_{i+1} - R_i)\omega_0(s) \\ &\dots\dots\dots \\ T\varepsilon_n(s)s + \varepsilon_n(s) &= \varepsilon_{n-1}(s) + \frac{1 - e^{-Ts}}{L_0s} (R_n - R_{n-1})\omega_0(s) \end{aligned} \quad (13)$$

На підставі системи рівнянь (13) на рис. 2 побудована структурна схема моделі стрічкопровідної системи, яка наочно відображає видовження рухомої стрічки і є зручною для аналітичних досліджень та комп'ютерного симулювання.

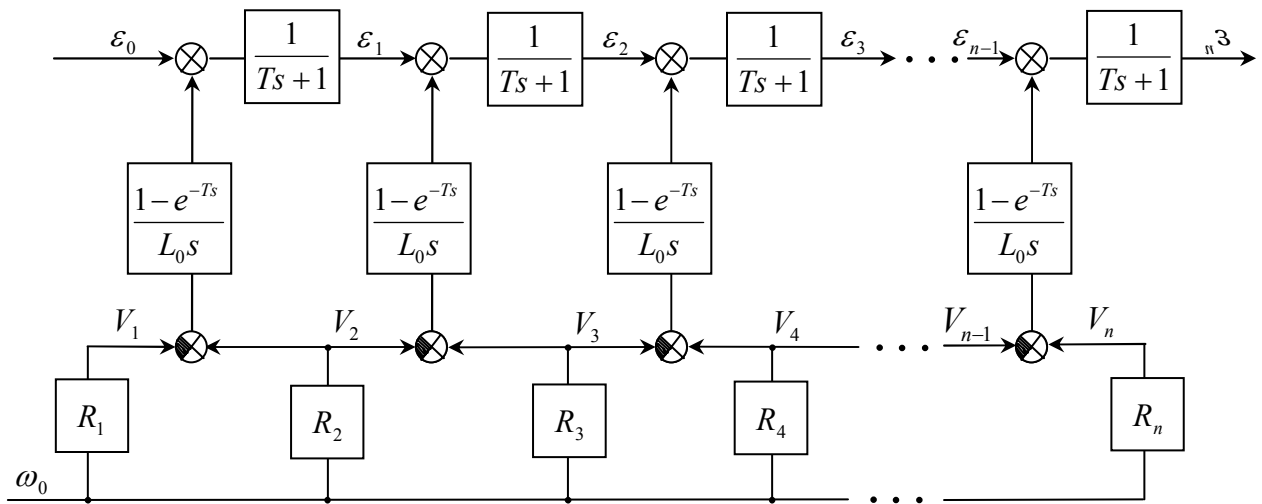


Рис. 2. Структурна схема моделі видовження рухомої стрічки

Встановимо залежність відносного видовження рухомої стрічки від послідовного збільшення діаметрів ведучих пар циліндрів (від випередження). Для цього за структурною схемою (рис. 2) на підставі формули Мейсона запишемо залежність видовження рухомої стрічки на першій ділянці від кутової швидкості

$$\varepsilon_1(s) = \frac{(R_2 - R_1)[1 - e^{-Ts}]}{(Ts + 1)L_0s} \omega_0(s). \quad (14)$$

Прийнявши кутову швидкість сталою, а радіуси циліндрів змінними і визначивши її через лінійну швидкість ( $\omega_0 = V_1 / R_1$ ) та довжину стрічки  $L_0 = V_1 T$ , після підстановки і перетворень матимемо залежність відносного видовження від випередження

$$\varepsilon_1(s) = \frac{1 - e^{-Ts}}{(Ts + 1)Ts} \beta_{21}(s). \quad (15)$$

Коефіцієнт  $\beta_{21}$  будемо називати коефіцієнтом випередження швидкості другої пари циліндрів відносно першої

$$\beta_{21} = \frac{R_2 - R_1}{R_1}. \quad (16)$$

Коли коефіцієнт  $\beta_{21} = 0$ , то швидкість обох пар циліндрів є однакою, тому на ділянці не створюється додатковий натяг. У цьому випадку не можна забезпечити гарантований натяг стрічки на ділянці за наявності збурень, які спричинять зміну швидкості на ділянці. Наприклад, при зволоженні стрічки та при накладанні фарб, або при сушінні стрічки на ділянці.

Якщо коефіцієнт випередження  $\beta_{21} < 0$ , то в такому разі не можна забезпечити гарантований натяг стрічки на ділянці і можлива поява зморшок стрічки та її провисання на ділянці.

За структурною схемою визначимо залежність відносного видовження рухомої стрічки на другій ділянці від кутової швидкості:

$$\varepsilon_2 = \frac{(R_2 - R_1)[1 - e^{-Ts}]}{(Ts + 1)^2 L_0 s} \omega_0(s) + \frac{(R_3 - R_2)[1 - e^{-Ts}]}{(Ts + 1) L_0 s} \omega_0(s). \quad (17)$$

При сталій кутовій швидкості після підстановки і перетворень одержимо залежність відносного видовження стрічки від випередження:

$$\varepsilon_2(s) = \frac{1 - e^{-Ts}}{(Ts + 1)^2 Ts} \beta_{21} + \frac{1 - e^{-Ts}}{(Ts + 1)Ts} \beta_{32}, \quad (18)$$

де  $\beta_{32} = \frac{R_3 - R_2}{R_2}$ .

Після зведення до спільного знаменника подамо цю залежність так:

$$\varepsilon_2 = \frac{(\beta_{32}Ts + \alpha_{31})[1 - e^{-Ts}]}{(Ts + 1)^2 Ts}. \quad (19)$$

Отже, сумарний коефіцієнт випередження швидкості третьої пари циліндрів відносно першої дорівнює сумі двох попередніх коефіцієнтів випередження:

$$\alpha_{31} = \beta_{21} + \beta_{32}. \quad (20)$$

Наявність в чисельнику виразу (19)  $\beta_{32}Ts$  означає, що появляється складова деформації стрічки на другій ділянці із тимчасовим випередженням.

Аналогічно визначимо залежність відносного видовження рухомої стрічки на третій ділянці від випередження.

При сталій кутовій швидкості після перетворень і зведення до спільного знаменника, одержимо:

$$\varepsilon_{32}(s) = \frac{(a_2 s^2 + a_1 s + \alpha_{41})[1 - e^{-Ts}]}{(Ts + 1)^3 Ts}, \quad (21)$$

де сумарний коефіцієнт випередження швидкості четвертої пари циліндрів відносно першої та інші коефіцієнти

$$\begin{aligned} \alpha_{41} &= \beta_{21} + \beta_{32} + \beta_{43} \\ a_2 &= \beta_{43} T^2 \\ a_1 &= (\beta_{32} + \beta_{43}) T. \end{aligned} \quad (22)$$

Наявність в чисельнику (21) виразів  $a_2s^2 + a_1s$  означає, що в стрічкопровідній системі, крім основного статичного випередження  $\alpha_{31}$ , існує перша та друга похідні від випередження. Тому стрічкопровідна система як об'єкт регулювання є чутлива до високочастотних збурень швидкості, спричинених різними діями та неточністю виготовлення діаметрів циліндрів, їх встановлення в опорах тощо.

**Результати комп'ютерного симулювання.** Аналітичне дослідження динаміки видовження рухомої стрічки за допомогою розв'язання системи одержаних диференційних рівнянь є трудомістке, тому для дослідження застосоване комп'ютерне симулювання в пакеті MATLAB–Simulink [10]. На підставі системи рівнянь (13) та структурної схеми моделі деформації рухомої стрічки (рис. 2) за допомогою графічного редактора MATLAB–Simulink у вікні моделі побудовано графічну модель стрічкопровідної системи, яка складається із чотирьох пар стрічкопровідних циліндрів.

Здійснено комп'ютерне симулювання впливу випередження швидкості стрічкопровідних циліндрів на динаміку видовження стрічки на ділянках.

При моделюванні задавали такі параметри: лінійна швидкість стрічки  $V = 10$  м/с; довжина стрічки на ділянці  $L_0 = 5$  м; номінальний радіус стрічкопровідних циліндрів  $R = 88,925$  мм; послідовні прирости радіусів  $\Delta R = 0,001$  мм [5, 9]; стала часу ділянки стрічки  $T = 0,5$  с.

На рис. 3 зображено графіки перехідних процесів відносного видовження рухомої стрічки на ділянках, спричиненої випередженням швидкості при ступеневому збільшенні їх радіусів послідовно на 0,01; 0,02; 0,03; 0,04мм. Перехідні процеси мають s-подібний вигляд із деяким випередженням на початку відрізка часу. Усталені значення видовження стрічки на послідовних ділянках:  $\varepsilon_1 = 1,1124 \cdot 10^{-3}$ ;  $\varepsilon_2 = 2,248 \cdot 10^{-4}$ ;  $\varepsilon_3 = 3,368 \cdot 10^{-4}$ ;  $\varepsilon_4 = 4,475 \cdot 10^{-11}$ .

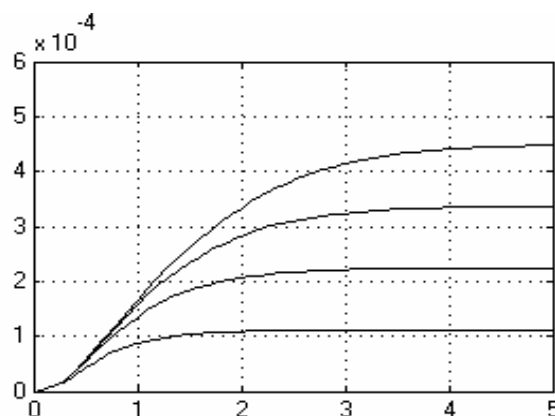


Рис. 3. Графіки перехідних процесів видовження стрічки на ділянках

Якщо порівняти одержані перехідні процеси з перехідними характеристиками в існуючих моделях, в яких відносний приріст швидкості ототожнюють з відносною статичною деформацією, то вони є різними. У них перехідний процес на першій ділянці змінюється за експоненціальним законом.

Проводили комп'ютерне симулювання впливу випередження швидкості стрічкопровідних пар циліндрів на видовження стрічки на виході четвертої ділянки, спричинене приростом радіусів циліндрів при різних швидкостях стрічки.

При моделюванні задавали такі параметри: довжина ділянки стрічки  $L_0 = 5$  м; номінальні радіуси циліндрів  $R_1 = 88,925$  мм; зміна лінійної швидкості  $V = 1,2,5,10$  м/с.

На рис. 4 показані графіки перехідних процесів відносної деформації рухомої стрічки на виході стрічкопровідної системи, зумовлене ступеневою зміною їх радіусів циліндрів послідовно на 0,01; 0,02; 0,03; 0,04мм при різних швидкостях стрічки  $V = 1,2,5,10$  м/с.

Перехідні процеси видовження стрічки мають s-подібний вигляд. При збільшенні швидкості стрічки час перехідного процесу деформації зменшується і становить 2,5; 4; 13; 27 с. Усталені

значення відносного видовження на виході стрічкопровідної системи для всіх швидкостей є однакові і становлять:  $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_3 = \varepsilon_4 = 4,48 \cdot 10^{-4}$ . Отже, в усталеному режимі відносне видовження на виході стрічкопровідної системи не залежить від швидкості стрічки і визначається тільки випередженням  $\Delta R_i$ .

Проводили комп'ютерне симулювання впливу випередження швидкості стрічкопровідних циліндрів на видовження стрічки на виході стрічкопровідної системи, зумовлене ступеневою зміною приросту радіусів циліндрів при різних швидкостях стрічки за наявності сталого видовження на виході. При моделюванні задавали відносне видовження стрічки на вході  $\varepsilon_0 = 0,001$ , інші параметри приймали аналогічними до попереднього прикладу.

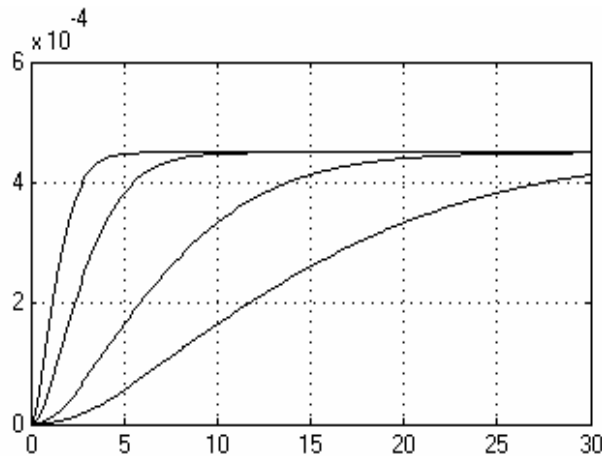


Рис. 4. Графіки перехідних процесів видовження стрічки на ділянках

Встановлено, що сумарне видовження стрічки на виході стрічкопровідної системи в усталеному режимі дорівнює сумі деформацій, що діє на вході та деформації, зумовленої випередженням швидкості стрічкопровідних циліндрів.

**Висновки.** 1. Існуючі моделі стрічкопровідних систем рулонних ротаційних машин побудовані за певних припущень, що вплив відносної зміни швидкості стрічки тотожний відносній зміні видовження на вході ділянки, тому не повною мірою описують динаміку стрічкопровідної системи як об'єкта регулювання.

2. Запропонована модель видовження рухомої стрічки із жорсткими зв'язками стрічкопровідних пар циліндрів рулонних ротаційних машин, в яких видовження стрічки на ділянці визначається інтегруванням приросту швидкості на інтервалі часу  $[0, T]$ .

3. Встановлено аналітичні залежності відносного видовження стрічки на ділянках від випередження швидкості стрічкопровідних циліндрів, спричинене зміною приростів їх радіусів.

4. Побудовані моделі повніше і адекватніше описують динаміку стрічкопровідних систем, мають ширші функціональні можливості і є основою для аналізу складніших стрічкопровідних систем.

5. Результати комп'ютерного симулювання довели, що перехідні процеси в запропонованих моделях значно відрізняються від існуючих.

1. Воронов Е.А. *Научные основы анализа и синтеза параметров механических приводов РПМ при регламентированной точности печатания. Автореф. ...д-р техн. наук.* – М., 1990. 2. Дурняк Б.В. *Стрічкопровідні системи рулонних ротаційних машин. Моделювання управління.* – К.: Атіка, 2002. – 292 с. 3. Избицкий Э.И. *Импульсное регулирование движения ленточного материала.* – М.: Энергия, 1980. – 112 с. 4. Казакевич В.В., Избицкий Э.И. *Системы автоматического управления процессами.* – М.: Книга, 1978. – 340 с. 5. Митрофанов В.П., Тюрин А.А., Бирбраер Е.Г., Штолянов В.Н. *Печатное оборудование.* – М.: Издательство МГУП, 1999. – 443 с. 6. Митрофанов В.П. *Точностные требования к многокрасочным машинам и печатным материалам // Полиграфия.* – М.: Книга, 1979. –

№ 9. – С. 23–24. 7. Толстой Г.Д. Автоматизация полиграфических производственных процессов. – М.: Книга, 1970. – 360 с. 8. Тюрин А.А. Печатные машины – автоматы. – М.: Книга, 1980. – 416 с. 9. Чехман Я.И. Печатные аппараты (Основы теории). – К.: УМК ВО, 1989. – 88 с. 10. Гультаев А. Визуальное моделирование в среде MATLAB: Учебный курс – СПб: Питер, 2000. – 432 с.

УДК 621.313.2:536.755

А.Р. Когут, І.З. Щур

Національний університет “Львівська політехніка”,  
кафедра ЕАП

## ОПИС ДИНАМИЧНЫХ ПРОЦЕССОВ У ДВИГУНИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ З ПОГЛЯДУ ТЕРМОДИНАМІКИ НЕРІВНОВАЖНИХ ПРОЦЕССІВ

© Когут А.Р., Щур І.З., 2004

**Описано і досліджено електропривід з двигуном постійного струму в динамічних режимах, як термодинамічний перетворювач енергії, проаналізовано його основні характеристики і показники в перехідних процесах з погляду термодинаміки нерівноважних процесів, що дало можливість отримати деякі універсальні аналітичні і графічні залежності між основними параметрами і показниками електропривода у відносних одиницях.**

**The direct current electric drive in dynamical processes as a thermodynamical energy converter was described and researched mathematically here from the thermodynamical point of view. As a result of this there was appeared an opportunity to obtain a series of universal analytical and graphic dependencies between major parameters and indicators of the electric drive in relative units.**

**Постановка проблеми.** Економія електроенергії завжди була важливим аспектом в експлуатації електроприводів, у тому числі й електроприводів з двигунами постійного струму (ДПС). Оптимізація функціонування електропривода з погляду енергетики дозволяє суттєво зменшити як втрати енергії [1], так і, що не менш важливо, загальну встановлену потужність парку двигунів. Досвід останніх досліджень показує, що опис двигуна постійного струму з використанням підходів термодинаміки нерівноважних процесів (ТД НП) дає змогу суттєво спростити викладення матеріалу, сформувані єдині підходи до аналізу різних процесів, створити нові критерії оптимізації тощо. Крім того, перехід до відносних одиниць дозволяє уніфікувати основні закономірності, отримані внаслідок проведення досліджень.

**Аналіз останніх досліджень.** За допомогою ТД НП були описані статичні режими роботи ДПС, а також низькоефективних електроприводів постійного струму з резистивним керуванням, які знаходять практичне застосування і нині [1, 2]. При цьому, крім підходів ТД НП, були використані основні енергетичні закономірності, відомі з курсу основ електропривода [3]. ТД подання цих електроприводів дозволило, крім уніфікації опису і спрощення аналізу, отримати низку універсальних залежностей, які забезпечують оптимальні з різних поглядів режими роботи. Подальшим завданням є оптимізація роботи ДПС у динамічних режимах з погляду мінімізації енергетичних втрат.

**Мета роботи.** Описати ДПС в перехідних режимах як термодинамічний перетворювач енергії (ПЕ). Створити систему відносних одиниць, яка б дала змогу отримати універсальні характеристики, що в перспективі дозволяти б формулювати критерії оптимальної роботи електроприводів постійного струму за мінімальними втратами енергії в динамічних режимах.

**Виклад основного матеріалу.** У межах ТД НП будь-який перетворювач вільної енергії зображається “чорною скринькою”, яка перетворює вільну вхідну енергію у вільну вихідну енергію. Завдяки