

**АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ  
ІНСТИТУТ ЕЛЕКТРОДИНАМІКИ**

На правах рукопису

**ЛУЦКІВ Микола Михайлович**

**УПРАВЛІННЯ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИМИ СИСТЕМАМИ  
ПРИВОДІВ РУЛОННИХ ДРУКАРСЬКИХ МАШИН  
НА ОСНОВІ СПОСТЕРІГАЮЧИХ ПРИСТРОЇВ**

Спеціальності: 05. 09. 03. — електротехнічні комплекси та системи,  
включаючи їх управління та регулювання

05. 13. 07. — автоматизація технологічних процесів  
і виробництв (в поліграфії)

**АВТОРЕФЕРАТ**

дисертації на здобуття вченого ступеня  
доктора технічних наук

Київ — 1994



00757015 (P)

дисертація є рукопис

Робота виконана в Українському поліграфічному інституті імені Івана Федорова (м. Львів)

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор  
О. І. Денисов;  
доктор технічних наук, професор  
А. А. Краснопрошина;  
доктор технічних наук, професор  
О. С. Сидоров

Провідна установа — Український науково-дослідний інститут спеціальних видів друку Державного Комітету України у справах видавництва поліграфії та книгорозповсюдження, м. Київ

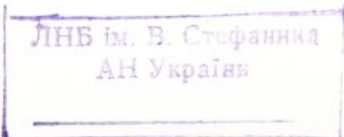
Захист відбудеться « 17 » — 5 — 1994 р. о 14<sup>00</sup> год. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 016. 30. 03. в Інституті електродинаміки АН України за адресою: 252680, м. Київ-57, пр. Перемоги, 56 (тел. 446-91-15)

З дисертаційною роботою можна ознайомитися в бібліотеці Інституту електродинаміки АНУ

Автореферат розісланий « 4 » — 4 — 1994 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради

В. С. Федій



## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність проблеми.** Багато складних електротехнічних систем приводу машин з пружними зв'язками відрізняються швидкостями протікання перехідних процесів вихідних регульованих змінних та проміжних змінних і їх затуханням. При управляючій дії проходить повільний процес зміни вихідних і швидкий коливний процес зміни частини проміжних змінних з малим затуханням. При дії обмежених циклічних навантажень вихідна змінна /швидкість/ залишається практично незмінною, а частина проміжних змінних /моменти, струми/ здійснює слабозатухаючі коливання. Різний характер зміни змінних стану являє собою характерну особливість електромеханічних систем з пружними зв'язками і зумовлює розгляд окремого класу об'єктів та систем з малим затуханням і проміжних змінних.

Для багатьох систем недостатньо стабілізувати вихід чи оптимізувати певний критерій. Необхідно ще забезпечити задані показники якості частини проміжних змінних. Електромеханічні системи приводу рулонних друкарських машин є типовими системами з малим затуханням проміжних змінних. Особливість друкарських машин полягає в тому, що окремі секції з'єднані між собою і двигуном валопроводами, довжина яких сягає декількох метрів. Тому пружність валопроводів і стрічки зумовлює розгляд рулонних друкарських машин, як електромеханічних систем з пружними зв'язками, в яких виникають пружні коливання моментів, що спричиняє шуми, вібрації, підвищене зношування механізмів, погіршення якості друку. Ці фактори обмежують робочу швидкість машин, яка фактично не перевищує 70-80% номінальної, а після 5-7 років експлуатації робоча швидкість машини може зменшуватись в два або більше рази. Головним недоліком вітчизняних серійних машин, а також машин, розроблених за ліцензіями фірм ФРН, є мала продуктивність, незадовільна якість багатobarвової друкарської продукції. Вищий технічний рівень друкарських машин закордонних фірм забезпечується головним чином за рахунок більш високого класу точності виготовлення машини і сучаснішої технології, що потребує великих затрат і неповністю вирішує проблему довготривалості роботи на високій швидкості, яка визначається пружними коливаннями в електромеханічній системі приводу машини.

Відомі методи синтезу системи автоматичного управління електромеханічними системами не враховують специфіку даного класу систем з малим затуханням проміжних змінних. Застосування спостерігачів типу Калмана з вимірюванням виходу не дає належного ефекту, бо вихід в таких системах при дії циклічних навантажень залишається практично незмінним, тому оцінки змінних стану спостерігача не є достовірними, а управління не ефективне. В зв'язку з цим виникає

задача розробки ефективних методів синтезу електромеханічних систем приводу з малим затуханням проміжних змінних. Відсутність таких методів викликає значні труднощі при створенні систем електроприводу багатьох швидкісних машин з пружними зв'язками і в першу чергу друкарських машин. Типові методи корекції систем електроприводу мають певні обмеження, не враховують специфіку друкарських машин, і не дозволяють синтезувати системи, які б демпфували в них пружні коливання.

Проблема створення і удосконалення друкарських рулонних машин з метою підвищення технічного рівня машини в даній роботі розв'язується шляхом побудови більш ефективних систем управління електроприводами. Це зумовлює необхідність розробки ефективних методів синтезу систем автоматичного управління електроприводами з малим затуханням проміжних змінних і розвитку теорії управління електромеханічними системами багатосекційних і багатодвигунних рулонних друкарських машин, пошуки та наукове обґрунтування нових підходів і методів побудови систем електроприводу з врахуванням пружних властивостей валопроводу та стрічкового матеріалу. Вирішення цієї задачі є актуальною проблемою в області автоматизованого електроприводу друкарських машин і процесів.

Актуальність даної проблеми підтверджується рішенням Уряду України про розробку і випуск на Україні рулонних багатокольорових друкарських машин типового ряду, в якій дисертант бере участь і веде розробку електрообладнання машини, використовуючи результати цієї роботи.

**Мета роботи** полягає в розвитку теоретичних основ і ефективних методів синтезу електромеханічних систем з малим затуханням проміжних змінних і науковому обґрунтуванні розробки та створення систем електроприводу багатосекційних та багатодвигунних рулонних друкарських машин на основі спостерегаючих пристроїв для покращення динаміки та підвищення продуктивності машин.

Для досягнення поставленої мети у роботі вирішуються такі основні завдання:

- розробка математичних та структурних моделей електромеханічних систем приводу багатосекційних рулонних друкарських машин з врахуванням пружних властивостей валопроводів і стрічкового матеріалу, які є динамічними системами з малим затуханням проміжних змінних;

- побудова математичних та структурних моделей багатодвигунних систем рулонних друкарських машин, в яких друкарські секції проводяться в рух індивідуальними електродвигунами;

- розробка ряду спостерегаючих пристроїв для оцінки коливань проміжних змінних для класу об'єктів з різними швидкостями протікання перехідних процесів і затухання вихідних та проміжних змінних;

— обґрунтування еквівалентного коефіцієнту затухання системи вищого порядку, як об'єктивного показника якості перехідних процесів за проміжними змінними та показника оцінки демпфуючих властивостей систем автоматичного управління;

— обґрунтування нормованих передаточних функцій, які складають базу для визначення бажаної передаточної функції для синтезу систем з заданим коефіцієнтом затухання проміжних змінних;

— синтез електромеханічних систем автоматичного управління з малим затуханням проміжних змінних;

— розробка методів синтезу типових систем електроприводу рулонних друкарських машин з ефективним демпфуванням пружних коливань в електромеханічній системі приводу;

— розробка ряду систем автоматичного управління рулонними друкарськими машинами та процесами на основі спостерегаючих пристроїв /головного електроприводу, системи приводу розмотування і намотування стрічки/ і цифрових систем, які забезпечують спільне управління швидкістю багатодвигунних машин та автоматичне переналадження на формат;

— створення двоканальних систем електроприводу, які забезпечують комплексне управління друкарськими секціями і суміщення технологічних операцій.

#### **Автор захищає:**

1. Математичні та структурні моделі багатосекційних та багатодвигунних електромеханічних систем рулонних друкарських машин, які створюють основу для побудови ефективних систем управління електроприводами машин з пружними зв'язками.

2. Нові структури спостерегаючих пристроїв для оцінки невимірюваних змінних стану електромеханічних систем з різними швидкостями протікання перехідних процесів і затуханням вихідних і проміжних змінних.

3. Результати аналізу і методи синтезу систем автоматичного управління з спостерегаючими пристроями з вимірюванням проміжних змінних.

4. Методи синтезу типових систем управління електроприводами рулонних друкарських машин з пружними зв'язками з заданими показниками якості і демпфування пружних коливань в електромеханічних системах приводу.

5. Методи побудови та створення систем автоматичного управління багатодвигунними електроприводами багатокольорових рулонних друкарських машин, які забезпечують підвищення технічного рівня машин.

Методи дослідження базуються на використанні основ теорії електроприводу, сучасної теорії управління та методів математичного моделювання разом з відповідними розділами теорії

диференційних рівнянь та теорії матриць.

**Наукова новизна роботи** полягає в наступному:

1. Виконано теоретичне узагальнення та вперше розроблені ефективні методи синтезу електромеханічних систем приводу багатосекційних рулонних друкарських машин з пружними зв'язками на основі спостерігаючих пристроїв з вимірюванням проміжних змінних, які забезпечують потрібне демпфування пружних коливань в системі приводу.
2. Розроблено нові структури спостерігаючих пристроїв для оцінки невимірюваних змінних стану об'єктів і динамічних систем з малим затуханням проміжних змінних.
3. Запропоновано еквівалентний коефіцієнт затухання для оцінки коливних властивостей систем автоматичного управління за проміжними змінними та обґрунтовані нормовані передаточні функції для синтезу систем з заданим коефіцієнтом затухання.
4. Розроблено методи синтезу систем автоматичного управління з малим затуханням проміжних змінних.
5. Розроблено математичні та структурні моделі багатодвигунних систем електроприводу рулонних друкарських машин, які враховують фазу руху формних циліндрів і суміщення технологічних операцій на пружній рухомій стрічці.
6. Обґрунтовано і розроблено методи побудови систем управління багатодвигунним електроприводом рулонних друкарських машин, які забезпечують сумісне управління швидкістю машини і суміщення технологічних операцій.

**Практична цінність результатів роботи.**

Результати теоретичних і експериментальних досліджень стали науковою основою при розробці, створенні та впровадженні ряду систем управління електроприводами багатосекційних і багатодвигунних рулонних друкарських машин з обґрунтованим підвищенням технічного рівня, покращенням динаміки та підвищенням продуктивності машин. Розроблені структурні схеми різних варіантів побудови спостерігаючих пристроїв з виміром проміжних змінних і алгоритми визначення їх параметрів і параметрів зворотніх зв'язків, що є новим підходом до створення систем електроприводу з покращеними динамічними показниками для друкарських машин. Розроблені і впроваджені цифрові системи управління друкарськими машинами з індивідуальними електроприладами секцій та суміщенням технологічних операцій, які створили базу для побудови систем управління багатодвигунними машинами на основі ЕСМ.

**Результати роботи використані для:**

- створення систем електроприводу парафінорізальних агрегатів;
- розробки багатодвигунних систем натягу стрічки при намотці в бобіни на офсетних машинах і флексографських машинах;
- розробки дводвигунної системи електроприводу з автоматичним переналагодженням і рубкою стрічки на формат на листо-різальних машинах;
- розробки багатодвигунних систем електроприводу флексографських машин;
- розробки друкарсько-обробної лінії;
- навчального процесу на кафедрі автоматизації поліграфічного виробництва Українського поліграфічного інституту, а також в науково-дослідних організаціях ВНДІ поліграфмаш м. Москва, УНДІ спеціальних видів друку, УНДІ поліграфічного виробництва, Ходорівському СКБ ПМ і Одеському СКБ ПМ.

Результати роботи впроваджені на ВО "Зоря", РВО "Поліграфкнига" м. Київ, Феодосійській офсетній фабриці в серії систем управління електроприводами, офсетних і флексографських машин, а також на Кизилюртовському та Ходорівському заводах поліграфічних машин.

Впровадження систем електроприводу підвищило продуктивність машин на 20-30%, зменшило амплітуду коливань моментів на валу машин в 4-5 разів, збільшило в 1,5-2 рази довготривалість роботи машин на робочій швидкості, яка близька до номінальної, покращило якість друкованої продукції і умови роботи друкарів. Економічний ефект від впровадження робіт складає 360 тис. карбованців в цінах 80-х років.

**Апробація роботи.** Основні результати дисертації доповідались і обговорювались на:

Всесоюзній науково-технічній конференції "Досягнення науки і шляхи прискорення науково-технічного прогресу в галузі високого друку". 1982 р. м. Львів;

Всесоюзній конференції "Стан і перспективи розвитку наукових досліджень в поліграфічному машинобудуванні" 1985 р. м. Москва;

Всесоюзній нараді по методах розрахунку поліграфічних машин автоматів. 1987 р. м. Львів;

Всесоюзній нараді по методах розрахунку поліграфічних машин автоматів. 1991 р. м. Львів;

Міжнародній конференції "Тексаутоматика-93". м. Харків;

Першій міжнародній конференції з інформаційних технологій і систем. 1993 р. м. Львів.

Звітних науково-технічних конференціях Українського і Московського поліграфічного інститутів.

**Публікації.** За матеріалами дисертації опубліковано 64 друкованих праць, серед них 12 авторських свідоцтв на винаходи і учбовий посібник для ВУЗів.

**Структура і об'єм роботи.** Дисертаційна робота складається із вступу, шести розділів, висновків, списку літератури, додатку і включає 273 сторінок тексту, 72 рисунків, 89 сторінок додатків.

### ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обгрунтована актуальність і новизна проблеми, що вирішується, сформульована мета дисертаційної роботи, приведені основні положення, котрі виносяться на захист, її загальну характеристику.

#### 1. Аналіз і огляд електромеханічних систем з пружними зв'язками

Розглянуто стан проблеми і управління електромеханічними системами приводу машин з пружними зв'язками. Проблема створення і вдосконалення рулонних друкарських машин висуває задачі розробки ефективних методів синтезу і розробки систем управління електроприводами, які б покращили динаміку та підвищили продуктивність машин.

Дослідження динаміки і стрічопровідних систем рулонних друкарських машин присвячені праці Бушунова В.Т., Воронова С. А., Клімова Б. І., Кулікова Б.В., Тюріна А.А., Чехмана Я. І. та інших. Аналіз літературних джерел показав, що динаміка рулонних друкарських машин, як об'єкту управління вивчена недостатньо, і знаходиться на шляху становлення. Методи аналізу і розрахунку електромеханічної системи приводу розроблені недостатньо. Управління друкарськими машинами ведеться, головним чином, локальними системами електроприводу. Систематичне висвітлення питань автоматичного управління друкарськими машинами і процесами знаходимо в працях Батюшко А. М., Волощак І. А., Єфімова М. В., Ізбицького Е. І., Козакевича В. В., Рабіновича А. Д., Ройзена С. С., Сидорова О. С., Толстого Г. Д.,

Дослідження, виконані в нашій країні і за кордоном свідчать про значний вплив пружних механічних зв'язків на динаміку електроприводу машини, зношуваність механізмів і в кінцевому результаті на продуктивність і якість продукції. Дослідження динаміки і синтез електромеханічних систем приводу з пружними зв'язками в суміжних областях /металургії, папероробній, текстильній, хімічній/ проведені в працях

Башаріна В. М., Борцова Ю. А., Бистрова А. Н., Волкова І. В., Глазунова В. Ф., Дружиніна М. М., Іванова Г. М., Ісакова В. М., Ключева В. Н., Краснопрошиної А. А., Сиротина А. А., Соколовського Г. Г., Шестакова В. М. Відомі способи придушення пружних механічних коливань у вигляді додаткової послідовної і паралельної корекції систем підлеглого управління електрприводами мають обмеження принципного характеру і не дають очікуваних результатів.

З огляду наукових публікацій приходимо до висновку, що електромеханічні системи приводу друкарських машин мають свої особливості, як об'єкт управління, з повільною зміною вихідної регульованої змінної /швидкості/ і швидкозмінними коливними проміжними змінними /пружними моментами/ з малим ступенем затухання. Існуючі методи аналізу і синтезу систем електроприводу рулонних друкарських машин не завжди враховують ці особливості, що стримує розробку високопродуктивних друкарських машин.

## 2. Побудова узагальнених математичних і структурних моделей систем управління друкарськими машинами з пружними зв'язками

Викладені узагальнені математичні і структурні моделі електромеханічних систем поліграфічних машин з пружними зв'язками. В загальному випадку електромеханічні системи з пружними зв'язками можна подати у вигляді окремих взаємозв'язаних підсистем: машини з пружними зв'язками, електродвигуна і керуючого пристрою. Для складання математичної моделі систем використовуємо метод змінних стану, який дозволяє встановити математичні співвідношення між вихідними діями, управліннями, змінними стану та іншими параметрами. Опис кожної з підсистем виконаємо у вигляді системи диференціальних рівнянь першого порядку, які розв'язані відносно перших похідних, тобто рівнянь в матричній формі Коші

$$\dot{z} = \Psi(z, v, f), \quad /1/$$

$$\dot{y} = F_e(v, z, u), \quad /2/$$

$$\dot{u} = F_y(u, v, z, g), \quad /3/$$

де  $z$  і  $v$  — вектори змінних стану машини з пружними зв'язками;  $u$ ,  $g$  і  $f$  — вектори відповідно управляючих, задаючих і збурюючих дій,  $\Psi$  / . / ,  $F_e$  / . / ,  $F_y$  / . / — нелінійні функції.

Вихідні параметри однозначно зв'язані із змінними стану рівняннями виходу

$$y = \Psi_i(\bar{z}_k, f, g), \quad /4/$$

де  $y$  – вихідна змінна,  $\Psi_i / . /$  – нелінійна функція.  
Рівнянь /1-4/ можна отримати рівняння замкнутої системи вигляді

$$\dot{x} = F(x, f, g), \quad /5/$$

$$y = \Psi(x), \quad /6/$$

де  $x$  –  $n$  мірний вектор змінних стану системи,  $F / . /$ ,  $\Psi / . /$  – нелінійні функції, які отримуємо з правої частини рівнянь /1-3/ шляхом вилучення проміжних змінних. Рівняння /1-3/ описують достатньо широкий клас електромеханічних систем незалежно від типу зв'язків робочих механізмів, що створює передумови для узагальненого вивчення системи з пружними зв'язками.

Рівняння /1-6/ в більшості нелінійні диференціальні рівняння, розв'язок яких складає собою складну проблему. Тому проведено лінеаризацію шляхом розкладу функцій  $\Psi / . /$ ,  $F / . /$ ,  $\Psi_u / . /$ , які стоять у правих частинах рівнянь /1-3 /, в ряд Тейлора, в межах незбурюючої дії  $\bar{z}_k^0, v_k^0, f^0, g^0$ .

Відкидаючи складові, які мають степеневі відхилення, починаючи від другої і вище, після розкладу /1-4/ отримуємо рівняння в приростах

$$\Delta \bar{z}_k = \sum_{k=1}^{n_1} \frac{\partial \Psi_i}{\partial \bar{z}_k} \Big|_0 \Delta \bar{z}_k + \sum_{k=1}^{n_2} \frac{\partial \Psi_i}{\partial v_k} \Big|_0 \Delta v_k + \sum_{k=1}^{n_3} \frac{\partial \Psi_i}{\partial f_k} \Big|_0 \Delta f_k, \quad /7/$$

$$\Delta v_k = \sum_{k=1}^{n_1} \frac{\partial F_{ei}}{\partial \bar{z}_k} \Big|_0 \Delta \bar{z}_k + \sum_{k=1}^{n_2} \frac{\partial F_{ei}}{\partial v_k} \Big|_0 \Delta v_k + \sum_{k=1}^{n_3} \frac{\partial F_{ei}}{\partial u_k} \Big|_0 \Delta u_k, \quad /8/$$

$$\Delta u_k = \sum_{k=1}^{n_1} \frac{\partial \Psi_{i1}}{\partial \bar{z}_k} \Big|_0 \Delta \bar{z}_k + \sum_{k=1}^{n_2} \frac{\partial \Psi_{i1}}{\partial v_k} \Big|_0 \Delta v_k + \sum_{k=1}^{n_3} \frac{\partial \Psi_{i1}}{\partial u_k} \Big|_0 \Delta u_k + \sum_{k=1}^{n_4} \frac{\partial \Psi_{i1}}{\partial g_k} \Big|_0 \Delta g_k, \quad /9/$$

$$\Delta \Psi_i = \sum_{k=1}^{n_1} \frac{\partial \Psi_i}{\partial \bar{z}_k} \Big|_0 \Delta \bar{z}_k + \sum_{k=1}^{n_2} \frac{\partial \Psi_i}{\partial f_k} \Big|_0 \Delta f_k + \sum_{k=1}^{n_3} \frac{\partial \Psi_i}{\partial g_k} \Big|_0 \Delta g_k. \quad /10/$$

Позначимо сукупність частинних похідних функцій  $\Psi_i, F_{ei}, \Psi_{i1}$  за різними змінними відповідними матрицями, і відкидаючи знак приросту  $\Delta$ , отримуємо систему матричних лінійних рівнянь першого наближення електромеханічної системи рулонної друкарської машини з пружними зв'язками.

$$\begin{bmatrix} \dot{\bar{z}} \\ \dot{v} \\ \dot{u} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M & N & O \\ \Pi & F & K \\ Q & \Phi & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{z} \\ v \\ u \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} f + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ H \end{bmatrix} g \quad /11/$$

Доповнимо це рівняння рівнянням виходу системи, вважаючи, що вихід залежить тільки від змінної  $z$

$$y = \xi z, \quad /12/$$

де  $\xi$  - матриця виходу системи.

Отримане рівняння - узагальнене і повністю описує електромеханічну систему рулонної друкарської машини з пружними зв'язками і визначає усі рухи системи.

При аналізі і синтезі зручно об'єднати підсистеми електродвигуна і машину з пружними зв'язками, і розглядати їх просто як об'єкт управління. Рівняння об'єкту можна отримати з рівняння /11/ і подати у вигляді

$$\dot{x} = Ax + Bu + Gf, \quad /13/$$

$$y = Cx, \quad /14/$$

де  $x$  -  $p$  мірний вектор змінних стану,  $A$  -  $p \times p$  матриця коефіцієнтів,  $B$ ,  $G$ ,  $C$ , - матриці входу, збурення і виходу відповідних розмірностей.

Побудовані математичні і структурні моделі описують широкий клас електромеханічних систем. Отже, вони є узагальненими і придатними для вивчення множини електромеханічних систем поліграфічних та інших машин. На їх основі побудовані моделі систем управління багатодвигунними рулонними друкарськими машинами, в яких кожна секція приводиться в рух індивідуальним електродвигуном. Окремі підсистеми взаємозв'язані, з одного боку, колом навантаження через загальну пружну стрічку, що обробляється, з другого - колом задання загальних параметрів, що регулюються, наприклад, швидкості, фази, натягу. По аналогії з /11/ записані рівняння довільної електромеханічної системи і -тої секції з врахуванням пружних зв'язків суміжних секцій через стрічку, що обробляється

$$\begin{bmatrix} \ddot{z}_i \\ \dot{v}_i \\ \dot{u}_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_i & N_i & 0 \\ P_i & F_i & K_i \\ Q_i & \Phi_i & R_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_i \\ v_i \\ u_i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ N_i \end{bmatrix} g + \begin{bmatrix} G_i \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} f_i + \begin{bmatrix} 0 \\ L_{i(i-1)} \\ 0 \end{bmatrix} \ddot{z}_{i-1} + \begin{bmatrix} 0 \\ L_{i(i+1)} \\ 0 \end{bmatrix} \ddot{z}_{i+1} \quad /15/$$

де  $L_{i(i-1)}$ ,  $L_{i(i+1)}$ , - матриці зв'язку, які враховують вплив суміжних секцій.

На основі /15/ записана система матричних рівнянь багатодвигунної електромеханічної системи рулонної друкарської машини з пружними зв'язками і побудована структурна схема.

Для полегшення досліджень складної системи багатодвигунної друкарської машини з пружними зв'язками проведена декомпозиція системи. Для цього рівняння системи /15/ зазнали перетворення з використанням блочних матриць та векторів і записані у вигляді

$$\dot{x}_i = A_i x_i + \bar{L}_{i(i-1)} z_{i-1} + \bar{L}_{i(i+1)} z_{i+1} + \bar{N}_i g + \bar{G}_i f_i, \quad /16/$$

де блочні матриці та вектор

$$A_i = \begin{bmatrix} M_i & N_i & 0 \\ P_i & F_i & K_i \\ Q_i & \Phi_i & R_i \end{bmatrix}; \quad \bar{L}_{i(i-1)} = \begin{bmatrix} 0 \\ L_{i(i-1)} \\ 0 \end{bmatrix}; \quad \bar{N}_i = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ N_i \end{bmatrix}; \quad \bar{G}_i = \begin{bmatrix} G_i \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}; \quad x_i = \begin{bmatrix} z_i \\ v_i \\ u_i \end{bmatrix}.$$

На основі /16/ записана система рівнянь багатодвигунної електромеханічної системи рулонної друкарської машини з пружними зв'язками через стрічку, що обробляється, яка в блочній формі запису матричних рівнянь має вигляд:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \vdots \\ \dot{x}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & A_2 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & A_3 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & A_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & \bar{L}_{12} & 0 & \dots & 0 \\ \bar{L}_{21} & 0 & \bar{L}_{23} & \dots & 0 \\ 0 & \bar{L}_{32} & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \\ \vdots \\ z_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \bar{G}_1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \bar{G}_2 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \bar{G}_3 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & \bar{G}_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ \vdots \\ f_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \bar{N}_1 \\ \bar{N}_2 \\ \bar{N}_3 \\ \vdots \\ \bar{N}_n \end{bmatrix} g. \quad /17/$$

Характерною особливістю матриці зв'язку є те, що діагональні блоки матриці будуть нульові, тобто  $L_{ii} = 0$ . Так як матриця коефіцієнтів діагональна, а головна діагональ є домінуючою, то можна провести декомпозицію системи і розробити рівняння /17/ на рівняння підсистем

$$\dot{x}_i = A_i x_i + \sum_{j=1}^s \bar{L}_{ij} z_j + N_i g, \quad i = 1, 2, 3, \dots, s. \quad /18/$$

Матриця  $A$  відображає власні динамічні властивості секції багатодвигунної рулонної друкарської машини з пружними зв'язками. Складові  $L_{ij}$ ,  $z_i$  відображають зв'язки між системами суміжних секцій.

Проаналізовані умови, при яких декомпозиція системи можлива, коли ізольована система є автономною і відображає основні властивості окремої секції.

Узагальнені структурні і математичні моделі є основою для аналізу і синтезу систем електроприводу багатодвигунних рулонних друкарських машин.

### 3. Розробка і аналіз нових структур спостерігаючих пристроїв

Розроблені нові структури спостерігаючих пристроїв для оцінки невимірюваних змінних стану об'єктів з різними швидкостями протікання перехідних процесів і затухання вихідних та проміжних змінних. Динамічні об'єкти відрізняються структурою і можливостями вимірювання проміжних змінних. Виходячи з цього розроблено ряд спостерігаючих пристроїв з вимірюванням проміжних змінних для різних задаючих і збурюючих дій.

На основі нових структур спостерігаючих пристроїв розроблені ефективні методи синтезу систем автоматичного управління об'єктами з малим ступенем затухання проміжних змінних. Управління шукається як функція виходу, оцінок змінних стану, задаючої дії та інших змінних. Синтез ведеться на базі бажаної передаточної функції, яка забезпечує потрібні показники якості вихідних, а також проміжних змінних.

Надалі вважаємо, що вихідна електромеханічна система є об'єктом з різними швидкостями протікання перехідних процесів і затухання вихідних та проміжних змінних, описується лінійним матричним рівнянням

$$\dot{x} = Ax + Bu + N_1 f, \quad y = Cx. \quad /19/$$

де  $X$  -  $p$  мірний вектор змінних стану об'єкту,  $y$  - вихід об'єкту,  $u$  - управління,  $f$  - збурення. В загальному випадку матриця  $A$  коефіцієнтів має розмір  $p \times p$ , матриці  $B$ ,  $N_1$  і  $C$  мають розмір  $p \times r$  і  $r \times p$  відповідно, а об'єкт /19/ повністю керований і спостерігаємий. Якщо на об'єкті діє збурення, доступне вимірюванню і яке подається на вихід спостерігаючого пристрою, то для синтезу систем запропоновано модифікований спостерігаючий пристрій, який описується рівнянням

$$\dot{\hat{x}} = \hat{A} \hat{x} + \hat{B} u + N_2 f. \quad /20/$$

Матриця коефіцієнтів має розмір  $p \times p$ , матриці  $N_2$  і  $\hat{B}$  піддаються визначенню,  $\hat{x}$  -  $p$  мірний вектор оцінок змінних стану.

об'єкту.

Управління об'єктом шукаємо як функцію виходу об'єкту, оцінок змінних стану та завдання

$$u = -Sx - P\hat{x} + g, \quad /21/$$

де  $P$  – матриця зворотнього зв'язку.

Підставляючи управління в рівняння об'єкту /19/ і спостерегаючого пристрою /20/, після перетворень отримаємо матричне рівняння замкнутої системи з модифікованим спостерегаючим пристроєм

$$\begin{bmatrix} \dot{\hat{x}} \\ \dot{\hat{x}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A-BC & -BP \\ -\hat{B}P & \hat{A}-\hat{B}P \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{x} \\ \hat{x} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B \\ \hat{B} \end{bmatrix} g + \begin{bmatrix} H_1 \\ H_2 \end{bmatrix} f \quad /22/$$

Доведено, що похибка оцінки змінних стану

$$\tilde{x} = x - \hat{x}, \quad /23/$$

сходиться до похибки регулювання за час перехідного процесу в системі.

Якщо виконати спостерегаючий пристрій таким чином, що

$$\hat{A} = A, \quad \hat{B} = B, \quad H_2 = H_1, \quad /24/$$

то після перетворень рівняння /22/ проводиться до вигляду

$$\begin{bmatrix} \dot{\hat{x}} \\ \dot{\tilde{x}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A-BC-BC & BP \\ 0 & A \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{x} \\ \tilde{x} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix} g + \begin{bmatrix} H_1 \\ 0 \end{bmatrix} f \quad /25/$$

Матриця коефіцієнтів системи – трикутна матриця, тому характеристичне рівняння системи /25/ дорівнює

$$\det [sE - A + BC] \det [sE - A] = 0 \quad /26/$$

Отже, характеристичне рівняння є добуток характеристичного рівняння системи, аналогічне синтезованій системі при використанні повної інформації про змінні стану і характеристичного рівняння спостерегаючого пристрою. На основі структурної схеми залишемо передаточну функцію системи

$$W(s) = \frac{y(s)}{g(s)} = C [E + [sE - A]^{-1} BC + [sE - \hat{A}]^{-1} BP]^{-1} [sE - A]^{-1} B \quad /27/$$

Після перетворення при умові /24/

$$W(s) = C [sE - A + BC]^{-1} B \quad /28/$$

Звідси запишемо характеристичне рівняння передаточної функції системи з модифікованим спостерегаючим пристроєм

$$\det [SE - A + BP + BC] = 0. \quad /29/$$

З аналізу /25/ випливає, що порядок системи з модифікованим спостерегаючим пристроєм дорівнює  $2n$ , а порядок передаточної функції /28/ дорівнює  $n$ . Зниження порядку передаточної функції відбулося за рахунок перетворення і скорочення. Якщо матриця  $A$  коефіцієнтів об'єкту /19/ не особлива, тоді таке перетворення допускається, і передаточна функція /28/ буде достатньо повно описувати систему. Синтез електромеханічної системи з модифікованим спостерегаючим пристроєм проведемо, вважаючи, що для управління використовуються оцінки змінних станів, тотожні самим змінним стану і для управління використовують вихід об'єкту і завдання

$$U = -Px + Cx + Q. \quad /30/$$

Підставивши управління в рівняння об'єкту /19/, отримаємо рівняння синтезованої системи

$$\dot{x} = [A - BP - BC]x + Bg + K_f f. \quad /31/$$

Виходячи із технічних вимог до якості процесу управління вихідних та проміжних змінних, вибираємо деяку бажану матрицю  $A^*$  з потрібними власними числами або елементами. Прирівнюючи матрицю коефіцієнтів системи /31/ і бажану матрицю  $A^*$ , отримуємо рівність

$$A - B[C + P] = A^*. \quad /32/$$

З цього рівняння визначимо шукану матрицю зворотнього зв'язку  $P$ . Таким чином, в загальному вигляді вирішена задача синтезу систем при дії на об'єкт збурень, доступних вимірюванню.

Якщо на електромеханічну систему діють циклічні збурення обмеженої амплітуди, а вимірювання збурень зустрічає труднощі, то для покращення оцінки змінних стану при наявності збурень розроблено редукований спостерегаючий пристрій з вимірюванням проміжних змінних.

Перша частина об'єкту, яка розташована після проміжної змінної описується рівнянням

$$\dot{x} = Ax + B'z, \quad y = Cx. \quad /33/$$

Матриця коефіцієнтів  $A$  має розмір  $n \times n$ , а матриця зв'язку  $B'$  та виходу  $C$  - відповідно  $n \times r_1$  і  $1 \times n$ .

Друга частина об'єкту, яка розташована до проміжної

змінної, описується рівнянням

$$\dot{z} = Fz + Ru + Hf. \quad /34/$$

Матриця коефіцієнтів  $F$  має розмір  $n_1 \times n_2$ ,  $R$  і  $H$  – матриця входу і матриця збурення відповідних розмірностей,  $f$  – збурення.

Редукований спостерегаючий пристрій описується рівнянням

$$\dot{\hat{x}} = \hat{A}\hat{x} + \hat{B}z. \quad /35/$$

Тут  $\hat{A}$  і  $\hat{B}$  матриці коефіцієнтів і матриця зв'язку спостерегаючого пристрою розміром  $n_1 \times n_1$ ,  $\hat{x}$  – вектор оцінки змінних стану.

Далі вважаємо, що число виходів дорівнює числу входів  $n_1 = n_2$ .

Управління об'єктом шукаємо як функцію оцінок змінних стану  $X$ , виходу  $y=Cx$  і завдання

$$u = -cx - P\hat{x} + g, \quad /36/$$

де  $P$  – матриця зворотнього зв'язку розміром  $n_1 \times n_1$ .

Підставимо управління в рівняння об'єкту /33,34/ і спостерегаючого пристрою /35/. Після перетворень отримаємо рівняння замкненої системи з редукованим спостерегаючим пристроєм

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{\hat{x}} \\ \dot{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & 0 & B \\ 0 & \hat{A} & \hat{B} \\ -RC & -RP & F \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ \hat{x} \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ R \end{bmatrix} g + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ H \end{bmatrix} f. \quad /37/$$

На основі структурної схеми і системи /37/ записана передаточна функція замкненої системи з редукованим спостерегаючим пристроєм, яка після перетворення і виконання операції звернення добутку матриць при умові, що  $\hat{A}=A$  і  $B=\hat{B}$  має вигляд

$$W(s) = c \left[ (sE - A) + B' (sE - F)^{-1} R (C + P) \right]^{-1} B' (sE - F)^{-1} R. \quad /38/$$

Доведено, що похибка вимірюваних оцінок змінних стану сходиться до похибки системи за час перехідного процесу в системі.

Проведено синтез системи з редукованим спостерегаючим пристроєм при умові, що для управління використовуються оцінки змінних стану, тотожних відповідним змінним стану першої частини об'єкту, і використовується вихідна змінна об'єкту  $y=Cx$

$$u = -Px - cx + g. \quad /39/$$

Підставимо управління в рівняннях об'єкту /33/ і /34/. Після перетворень отримаємо рівняння синтезованої системи

$$\begin{bmatrix} \dot{\hat{x}} \\ \dot{\hat{z}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B' \\ -R[P+C] & F \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{x} \\ \hat{z} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ H \end{bmatrix} f + \begin{bmatrix} 0 \\ R \end{bmatrix} g \quad /40/$$

Оскільки матриця коефіцієнтів /40/ не має нормальної типової форми, тому необхідно спочатку визначити характеристичне рівняння /38/. Задано  $n$  бажаних коефіцієнтів, які прирівнюємо до відповідних коефіцієнтів характеристичного рівняння, отримаємо систему рівнянь, з якої визначимо  $n$  шуканих елементів матриці зворотнього зв'язку.

При дії циклічних збурень, які прикладені до різних точок системи для формування оцінок змінних стану, розроблено тандемний спостерігаючий пристрій, який забезпечує синтез електромеханічних систем з всіма бажаними коефіцієнтами характеристичного рівняння системи. Надалі вважаємо, що об'єкт складається з двох частин, які описуються рівняннями /33/ і /34/. Перша частина тандемного спостерігаючого пристрою описується рівнянням

$$\dot{\hat{x}} = \hat{A}\hat{x} + Bz \quad /41/$$

Другий спостерігаючий пристрій, що формує змінні стану, побудуємо за принципом спостерігаючого пристрою з слійною ланкою, який описується рівнянням

$$\dot{\hat{z}} = \hat{F}\hat{z} + Ru \quad /42/$$

Сформуємо управління на основі оцінок  $\hat{x}$  і  $\hat{z}$  змінних стану, які формуються тандемним спостерігаючим пристроєм, виходу об'єкту і задання

$$u = -Dex - DP\hat{x} - DL\hat{z} + g \quad /43/$$

де  $P$  і  $L$  - матриці зворотнього зв'язку,  $D$  - матриця спільної ланки.

Підставимо управління /43/ в рівняння об'єкту /34/, а також в рівняння /41/ і /42/. Після перетворень отримаємо рівняння замкненої системи з тандемним спостерігаючим пристроєм

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{z} \\ \dot{\hat{x}} \\ \dot{\hat{z}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B & 0 & 0 \\ -RDC & F & -RDP & -RDL \\ 0 & \hat{B} & A & 0 \\ \hat{R}DC & \hat{F} & \hat{R}DL & \hat{R}DL \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ z \\ \hat{x} \\ \hat{z} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ R \\ 0 \\ \hat{R} \end{bmatrix} Q + \begin{bmatrix} 0 \\ H \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} f \quad /44/$$

На основі /44/ побудована структурна схема системи з тан-демним спостерегаючим пристроєм. За структурною схемою визначена передаточна функція, яка при умові, що  $\hat{F}=F$  і  $\hat{R}=R$  має вигляд

$$W(s) = C \left[ [R^{-1}(SE-F) + DL]^{-1} B[SE-A] + DL + DC \right]^{-1} D \quad /45/$$

Матрична передаточна функція системи має порядок  $p$ , який дорівнює порядку вихідної системи.

Синтез системи приведемо, вважаючи, що для управління використовуються оцінки змінних стану об'єкту, тотожні відповідним змінним об'єкту, проміжна змінна і завдання

$$u = -DCx - DPx - DLz + Q \quad /46/$$

Підставивши управління в рівняння об'єкту /33/ і /34/, після перетворень отримаємо матричне рівняння синтезованої системи

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ -RDC & F - RDL \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ R \end{bmatrix} Q + \begin{bmatrix} 0 \\ H \end{bmatrix} f \quad /47/$$

Аналогічно до попереднього, з матриці коефіцієнтів /47/ визначаються матриці коефіцієнтів  $P$  і  $L$ .

Для синтезу системи з необхідними значеннями полюсів і нулів передаточної функції розроблений комплексний динамічний регулятор. Нехай задано об'єкт, що описується рівнянням

$$\dot{x} = Ax + B'u, \quad y = Cx \quad /48/$$

Комплексний динамічний регулятор складається з двох підсистем. Перша підсистема, яку назвемо першим динамічним регулятором, описується рівнянням

$$\dot{z} = Mz + Ku \quad /49/$$

Тут  $M$  -  $p \times p$  - матриця коефіцієнтів,  $K$  - матриця зв'язку розміром  $p \times p$ .

Другий динамічний регулятор описується рівнянням

$$\dot{v} = Fv + Hv \quad /50/$$

де  $F$  і  $H$  - матриці коефіцієнтів і зв'язку розміром  $n \times n$ ,  $v$  і  $v$  - вектори змінних стану другого динамічного регулятора і проміжної змінної.

Проміжна змінна визначається виразом:

$$V = -LcX - LRv + Lq. \quad /51/$$

Тут  $L$  -  $r \times r$  матриця спільної ланки,  $R$  - матриця зворотнього зв'язку, розміром  $r \times n$ .

Шукаємо управління

$$u = -DLcX - DLRv + DLq. \quad /52/$$

Підставимо управління з рівняння об'єкту /48/ і динамічного регулятора /49/. Після виключення проміжної змінної отримуємо матричну систему рівнянь системи з комплексним динамічним регулятором

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{z} \\ \dot{v} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A - B'DcX - B'DP & B'DLR \\ -KDLc & M - KDR & KDLR \\ -HLc & 0 & F - HLR \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ z \\ v \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B'DL \\ KDL \\ HL \end{bmatrix} q. \quad /53/$$

У відповідності з /53/ побудована структурна схема системи, на основі якої отримана передаточна функція замкнутої системи з комплексним динамічним регулятором

$$W(s) = c [SE - A - B'DP + L(c+P)]^{-1} B'DL. \quad /54/$$

Введемо приєднану матрицю для /54/ і отримаємо

$$W(s) = \frac{cAd; [SE - A + B'DP + Lc - LP] B'DL}{\det [SE - A + B'DP + Lc + LP]} \quad /55/$$

Яку можна представити у вигляді

$$W(s) = \frac{[B_i(s)]}{A(s)}. \quad /56/$$

Тут  $A(s) = \det [SE - A + B'DP + Lc + LP]$ ,  $B_i(s)$  - елементи матриці чисельника /55/. Якщо задана бажана матрична передаточна функція, з необхідними значеннями полюсів і нулів, тоді прирівняємо останню і /56/. Отримаємо систему рівнянь, з якої визначимо шукані матриці  $D$ ,  $P$ ,  $L$ ,  $R$ .

Розглянуто стійкість систем з спостерігаючими пристроями. Для отримання стійких систем на матричні передаточні функції об'єкту і спостерігаючого пристрою необхідно накладати певні обмеження, щоб в передаточну функцію системи не входили нестійкі нулі і полюси, що скорочуються. Ці обмеження пов'язані з нестійкістю і немінімально-фазовістю

об'єкту. При таких обмеженнях синтезована система з спостерігаючим пристроєм буде стійка в цілому.

#### 4. Побудова і аналіз типових структурних моделей електромеханічних систем рулонних друкарських машин

Розроблений комплекс типових математичних і структурних моделей електромеханічних систем приводу рулонних друкарських машин з пружними зв'язками.

Незважаючи на зовнішню простоту руху стрічки в друкарських машинах, процес руху і обробки стрічки – складний багатомірний об'єкт управління. Записано рівняння руху стрічковедучих циліндрів, де враховано динамічні і статичні сили опору, пружні та інерційні властивості ділянки стрічки і побудована структурна модель ділянки. Побудовані моделі розвивають відомі, є більш повними і вихідними для побудови структурних моделей електромеханічних систем багатосекційних рулонних друкарських машин. Розвинені нестационарні структурні моделі розмотувальних і намотувальних секцій, які враховують зміну радіусу розмотуваного /намотуваного /рулону.

Розробку структурних моделей багатосекційної рулонної друкарської машини почато з простої моделі, яка враховує тільки пружні та інерційні властивості стрічки, сили навантаження, тертя та інерційні властивості стрічковедучих циліндрів /стрічковедучі, формні, друкарські, ножеві і т. д./. Виконаний аналіз дво-, трьо- і чотирисекційної моделі рулонних друкарських машин. Отримані залежності між основними параметрами /натягом, швидкістю, моментами та інше/.

При повній рівності параметрів секцій, залежність натягу стрічки від різниці швидкостей описується виродженою передаточною функцією, яка не повністю описує стрічковедучу систему машини.

На динаміку електромеханічної системи істотно впливає жорсткість механічної характеристики електродвигуна. Побудована структурна схема і виконаний аналіз дво- і трисекційних моделей з врахуванням жорсткості механічної характеристики електродвигуна.

Розроблено і побудовано ряд типових структурних моделей електромеханічних систем з врахуванням пружності горизонтальних і вертикальних валопроводів та пружних властивостей стрічки. Проведена структурна схема типової моделі з паралельними і послідовними пружними валопроводами.

В роботі виконаний аналіз дво- і трисекційної моделі рулонної друкарської машини з паралельними пружними валопроводами.

Як приклад, запишемо залежність натягу стрічки від різниці швидкостей для трисекційної моделі, вважаючи, що параметри секцій однакові:

$$F_2(s) = \frac{K_A}{T_A s + 1} \left[ 1 + \frac{2K^2 K_A}{(T_A s + 1)(J s + \alpha)} + \frac{3C_M^2}{(J s + \alpha)^2 s} + \frac{3C_M}{(J s + \alpha) s} + \frac{4C_M K^2 K_A}{(T_A s + 1)(J s + \alpha)^2 s} + \frac{C_M^3}{(J s + \alpha)^3 s^3} + \frac{C_M^2 K^2 K_A}{(T_A s + 1)(J s + \alpha)^2 s^2} \right]^{-1} \Delta(s) [V_2(s) - V_1(s)] \quad /57/$$

Де  $T_A$ ,  $K_A$  – стала часу і коефіцієнт передачі ділянки стрічки,  $V_1$ ,  $V_2$  – лінійні швидкості стрічки на початку і в кінці ділянки,  $K$  – коефіцієнт, що враховує передаточне число і радіус робочих циліндрів,  $\alpha$  – коефіцієнт, що враховує сили тертя і технологічних навантажень,  $J$  – момент інерції частин секцій, що обертаються, приведений до валу секції,  $C_M$  – приведена жорсткість.

Визначник трисекційної моделі

$$\Delta(s) = 1 + \frac{3C_M}{(J s + \alpha) s} + \frac{K^2 K_A}{(T_A s + 1)(J s + \alpha)} + \frac{3C_M^2}{(J s + \alpha)^2 s} + \frac{3K^4 K_A^2}{(T_A s + 1)^2 (J s + \alpha)^2} + \frac{8C_M K^2 K_A}{(T_A s + 1)(J s + \alpha)^2} + \frac{C_M^2}{(J s + \alpha)^2 s^3} + \frac{3C_M K^2 K_A}{(T_A s + 1)^2 (J s + \alpha) s} + \frac{3C_M^2 K^2 K_A}{(T_A s + 1)(J s + \alpha)^2 s^2} \quad /58/$$

Після перетворень

$$F_2(s) = \frac{d_0 s^7 + d_7 s^6 + \dots + d_2 s + d_1}{a_0 s^8 + a_8 s^7 + \dots + a_2 s + a_1} [V_2(s) - V_1(s)] \quad /59/$$

Проведений аналіз показав, що для рулонних друкарських машин характеристичне рівняння /59/ має комплексні корені, через це перехідні процеси мають значне коливання.

В роботі виконаний аналіз одно-, дво- і трисекційних динамічних моделей рулонних друкарських машин з послідовними пружними валопроводами. Розроблені типові структурні моделі є основою для розробки методів синтезу систем електроприводу машин з пружними зв'язками. Аналіз ряду моделей електромеханічних систем рулонних друкарських машин на ЕОМ дозволив встановити деякі важливі закономірності.

1. Натяг стрічки в перехідних режимах на ділянці розмотування /намотування/ стрічки визначається не тільки величиною гальмівного /рушійного/ моменту і силами тертя секцій, але і жорсткістю механічної характеристики електроприводу машини і гальма.

2. Жорсткість механічної характеристики електродвигуна суттєво впливає на динаміку електромеханічної системи приводу.

3. Секція рулонної ротаційної друкарської машини з пружним валопроводом – це колизна система з малим ступенем затухання, демпфування якої можна здійснити системою управління електроприводу з спостерегаючим пристроєм.

4. Низькочастотні коливання в електромеханічній системі приводу друкарської машини суттєво впливають на коливання натягу стрічки, що несприятливо відбивається на протіканні технологічного друкарського процесу.

#### 5. Синтез типових систем автоматичного управління рулонними друкарськими машинами на основі спостерегаючих пристроїв

Розроблені методи синтезу типових систем управління електроприводами рулонних друкарських машин з пружними зв'язками на основі спостерегаючих пристроїв. Для об'єктивної оцінки перехідних процесів за проміжними змінними і для оцінки демпфуючих властивостей системи обгрунтовано і запропоновано еквівалентний коефіцієнт затухання і побудовано нормовані передаточні функції, які є базою для визначення бажаної передаточної функції з заданим коефіцієнтом затухання проміжних змінних. При синтезі вважаємо, що вже розрахований і вибраний двигун і функціонально необхідні елементи системи, і механічна система приводу, що утворює єдину вихідну електромеханічну систему, параметри якої приймаємо постійними.

В процесі синтезу побудовано вихідну модель системи управління. Виходячи з можливості виміру проміжних змінних, вибрано структуру спостерегаючого пристрою і визначено його параметри з умови, що вони задовільняють поставлені технічні вимоги. На підставі розроблених в другому та третьому розділах теорії і методів синтезу, в роботі побудовані розгорнуті структурні схеми системи з спостерегаючими пристроями і розроблені методи синтезу ряду типових систем управління електроприводами рулонних машин з пружними зв'язками: системи головного приводу багатосекційної рулонної друкарської машини з жорсткими валопроводами, системи приводу стрічковедучих циліндрів, системи натягу стрічки на ділянці, системи розмотування та системи намотування стрічки, системи головного приводу багатосекційної рулонної друкарської машини з пружними зв'язками.

Як приклад, розглянуто синтез системи головного електроприводу друкарської машини, виконаного по системі тиристорний перетворювач-двигун постійного струму на основі спостерегаючого

пристрою з спільною ланкою двохсекційної рулонної друкарської машини з паралельними пружними валопроводами.

Вихідний сигнал давача швидкості вибираємо як змінну стану, і позначимо його  $X$ , а похідна  $\dot{X}_i$ ,  $i=2,3,\dots,6$ . Тоді отримаємо рівняння вихідної розімкненої системи /об'єкту/ в змінних стану

$$\begin{bmatrix} \dot{X}_1 \\ \dot{X}_2 \\ \dot{X}_3 \\ \dot{X}_4 \\ \dot{X}_5 \\ \dot{X}_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ -\alpha_1 & -\alpha_2 & -\alpha_3 & -\alpha_4 & -\alpha_5 & -\alpha_6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ X_4 \\ X_5 \\ X_6 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ b_4 \end{bmatrix} u \quad /60/$$

Управління об'єктом /60/ формуємо, використовуючи оцінки змінних стану  $\hat{X}$ , виходу об'єкту  $Y$  і завдання  $q$ . Нехай, виходячи із заданого коефіцієнту затухання та інших показників якості процесу регулювання, визначено бажане характеристичне рівняння. Тоді, прирівнюючи відповідні коефіцієнти характеристичного рівняння синтезованої системи і коефіцієнти  $\alpha_i^*$  бажаного характеристичного рівняння, визначимо елементи матриці зворотнього зв'язку

$$P_i = \frac{\alpha_i^* - (\alpha_i - \beta_i)}{\alpha \beta}, \quad i=1,2,3,\dots,6. \quad /61/$$

Коефіцієнт  $\hat{\beta}$  приймаємо рівним коефіцієнту  $\beta$ . Коефіцієнт спільної ланки спостерегаючого пристрою можна вибрати довільно, наприклад, виходячи із статичної точності системи.

Згідно розглянутого методу проведено синтез системи управління швидкості головного електроприводу з заданим коефіцієнтом затухання проміжних змінних більш складних систем, які поєднують у собі паралельні і послідовні пружні зв'язки.

Для успішного застосування спостерегаючих пристроїв, вони виконані у вигляді додаткових контурів без порушення основної структури уніфікованих блоків системи тиристорного приводу. Схема спостерегаючого пристрою побудована на аналоговій базі з використанням операційних підсилювачів, яка відповідає елементній базі, що використовується, і яка є прийнятною в типових промислових уніфікованих системах управління тиристорними перетворювачами.

### б. Динаміка і управління багатодвигунними рулонними друкарськими машинами

Побудовані математичні і структурні моделі, розроблено ряд систем автоматичного управління багатодвигунними друкарськими

машинами. Розвинута теорія електроприводу багатодвигунних рулонних друкарських машин, які є науковою основою для обґрунтування і для створення систем управління.

Багатодвигунну рулонну друкарську машину можна представити у вигляді послідовно розміщених секцій, через які проходить, надруковується і обробляється стрічка. Надалі вважаємо, що всі секції ведучі і приводяться в рух індивідуальними електродвигунами. Взаємозв'язок окремих секцій здійснюється з однієї сторони по колу завдання загальної швидкості електроприводу, а з другої – через стрічку, яка рухається.

Розроблені прості моделі багатодвигунних систем рулонних друкарських машин. Проведено аналіз моделей багатодвигунних систем рулонної друкарської машини з врахуванням жорсткості механічної характеристики електродвигуна. Побудована структурна схема системи автоматичного управління швидкістю багатодвигунної рулонної друкарської машини. Проведено аналіз дво- і трисекційних моделей системи управління. Залежність різниці фаз від швидкості – інтегральна. Тому найменша нерівність параметрів секцій або жорсткостей механічних характеристик електродвигунів приводить до постійного нарощування похибки по фазі.

Розроблена система автоматичного управління багатодвигунною багатофарбовою рулонною друкарською машиною. Перша секція ведуча, вона задає фази формних циліндрів. В локальні тиристорні системи приводу входять, крім контурів регулювання струму і швидкості, контур регулювання фази формного циліндра. Давачем фази може бути, наприклад, селесин-приймач, який зв'язаний з валом друкарського апарату або імпульсний давач.

Розроблена структурна схема управління багатодвигунною і багатофарбовою рулонною друкарською машиною. Виконано аналіз локальної системи стабілізації фази формного циліндру. Доведено, що система забезпечує необхідну динамічну точність тільки на низьких швидкостях. Тому їх можна застосовувати при суміщенні технологічних операцій на тихохідних машинах, наприклад, при припресовці плівки і рубці заготовок на формат.

Розроблена двоканальна система приводу безпосереднього цифрового управління багатодвигунною друкарською машиною, в яку, крім секційного двигуна, входить серводвигун. Він зв'язаний через черв'яковий редуктор і диференційний механізм з формним циліндром. Додатковий другий точний канал приводу забезпечує одночасно і приводку фарби.

Розроблено ряд систем цифрового управління суміщення технологічних операцій /приводки фарби, фальцовки та рубки листів/.

система автоматичної переналадки машини на формат, які склали основу при розробці системи автоматичного управління багатодвигунною друкарською машиною і лінією на базі ЕОМ. Розроблені та впроваджені системи автоматичного управління підвищують технічний рівень машин, які за продуктивністю не поступаються закордонним аналогам, а по окремих показниках перевищують.

У додатку приведено ряд цифрово-аналогових моделей, а також результати досліджень системи на ЕОМ. Приведені результати експериментальних досліджень динаміки електромеханічних систем приводу друкарських машин підтвердили, що вони є коливними системами із слабким затуханням пружних коливань. Нові типи спостерігаючих пристроїв є ефективним засобом демпфування коливань в електромеханічній системі приводу машини. Амплітуда моментів зменшується в 2-3 рази.

Системи з новими спостерігаючими пристроями менш чутливі до варіації параметрів об'єкта, ніж системи з спостерігачами Калмана. Результати моделювання і експериментальних досліджень підтвердили основні теоретичні положення.

## ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ І ВИСНОВКИ

В роботі узагальнені результати виконаних автором досліджень, отримані теоретичні положення, викладені науково-обгрунтовані технічні рішення проблеми розробки ефективних електромеханічних систем приводу машин з пружними зв'язками на основі нових типів спостерігаючих пристроїв, впровадження яких вносить значний вклад в прискорення науково-технічного прогресу.

Найбільш важливі наукові і практичні результати виконаних досліджень.

1. Розроблені узагальнені математичні і структурні моделі багатосекційних електромеханічних систем приводу рулонних друкарських машин з пружними зв'язками, які динамічними системами з малим ступенем затухання проміжних змінних.

2. Побудовані нові структури спостерігаючих пристроїв з вимірюванням проміжних змінних /модифікований, редукований, тандемний/ та показано, що вони формують достовірні оцінки змінних стану об'єктів з різними швидкостями протікання перехідних процесів і затухання вихідних та проміжних змінних. Розвинута прикладна теорія систем з спостерігаючими пристроями на базі якої науково обгрунтовані і створені ефективні системи автоматичного управління електроприводами рулонних друкарських машин, які покращують динаміку, підвищують продуктивність машин

3. Розроблено методику синтезу систем автоматичного управління з малим затуханням з заданими показниками якості проміжних змінних.

4. Узагальнено і побудовано комплекс структурних типових моделей електромеханічних систем рулонних друкарських машин з пружними зв'язками, які є вихідними для наукового обґрунтування та розробки систем автоматичного управління. Результати дослідження підтверджують, що системи автоматичного управління рулонними друкарськими машинами є системами з малим затуханням проміжних змінних, а параметри системи суттєво впливають на амплітуду і затухання пружних коливань на головному валі машини.

5. Для об'єктивної оцінки перехідних процесів за проміжними змінними і для оцінки демпфуючих властивостей систем автоматичного управління з пружними зв'язками запропоновано і обґрунтовано еквівалентний коефіцієнт затухання та побудовані нормовані передаточні функції, які є базою для визначення бажаної передаточної функції при синтезі систем автоматичного управління з заданим коефіцієнтом затухання.

6. На основі нових структур спостерегаючих пристроїв розроблені методи синтезу типових систем автоматичного управління електроприводу рулонних друкарських машин з ефективним демпфуванням пружних коливань в електромеханічній системі приводу.

7. Науково обґрунтовані, розроблені й захищені авторськими свідоцтвами ряд систем автоматичного управління рулонними друкарськими машинами /головного електроприводу, приводу натягу стрічки, систем розмотування і намотування стрічки/ впровадження яких підтвердили, що системи автоматичного управління з новими структурами спостерегаючих пристроїв являються ефективними засобами демпфування високочастотних коливань в електромеханічній системі приводу машин.

8. Розвинута теорія електроприводу багатодвигунних рулонних друкарських машин, яка є науковою основою для обґрунтування і створення систем автоматичного управління.

9. Розроблені відлагоджені і впроваджено ряд систем автоматичного управління електроприводів рулонних друкарських машин, двоканальні системи безпосереднього цифрового управління швидкістю друкарської секції і суміщення технологічних операцій /приводки, фальцовки, рубки/, мікропроцесорна система автоматичного переналагодження друкарсько-обробної

лінії на формат і дводвигунна система автоматичного управління листорізальною машиною з автоматичним переналадженням рубки стрічки на заданий формат, які по продуктивності та технічному рівню не поступаються закордонним аналогам, а по окремих перевищують. Амплітуда коливань моментів на головному валі машини зменшується в 3-5 разів, продуктивність підвищилась на 20-30%. Результати роботи підвищили глибину наукових досліджень і рівень розробки електромеханічних систем автоматичного управління в проектно-дослідних організаціях галузі, науково обґрунтували і сприяли підвищенню технічного рівня створюваних друкарських машин.

### СПИСОК ОСНОВНИХ ПУБЛІКАЦІЙ ПО ДИСЕРТАЦІЙНІЙ РОБОТІ

1. Луцків М. М. Компенсаційна мостова схема для бокової приводки // Поліграфія і видавнича справа. – Львів: Вища школа. 1973. №9, С.73–77.
2. Луцків М. М. Лінійна система бокової приводки на тиристорах // Поліграфія і видавнича справа. – Львів: Вища школа, 1975. №11. С. 114–118.
3. Луцків Н. М., Стрепко И. Т. Анализ систем с многоконтурной обратной связью // Автоматика. 1979. №2. С. 69–73.
4. Луцків Н. М., Стрепко И. Т. Синтез систем с модифицированным наблюдателем // Адаптивные системы автоматического управления. – К.: Техника, 1981, №9. С. 97–101.
5. Луцків Н. М., Самборский С. И. Системы с последовательным динамическим регулятором // Адаптивные системы автоматического управления. – К.: Техника, 1983. №11. С. 46–50.
6. Луцків Н. М., Стрепко И. Т. Системы с упрощенным наблюдающим устройством // Автоматика. 1983. №2 С. 71–75.
7. Луцків М. М., Волощак І. А., Дурняк Б. В. Аналіз спрощених моделей системи натягу паперової стрічки // Поліграфія і видавнича справа. – Львів: Вища школа. №19. С. 66–72.
8. Луцків Н. М., Самборский С. И. Синтез систем с последовательным динамическим регулятором // Адаптивные системы автоматического управления. – К.: Техника, 1984. №12. С. 52–56.
9. Луцків М. М., Дурняк Б. В., Самборський С. І. Електропривід руливної друкарської машини з динамічним регулятором // Поліграфія і видавнича справа. – Львів: Вища школа. 1984. №20. С. 74–78.

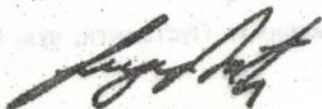
10. Гайдук А. Р., Луцкив Н. М. О нулях системы управления с наблюдающим устройством //Электромеханика. 1984. №4. С. 53-55.
11. Луцкив Н. М. Системы электропривода с наблюдающим устройством и упругим звеном //Техническая электродинамика. - К.: Наук. думка. 1984. №4. С 95-99.
12. Луцкив Н. М. Системы с комплексным динамическим регулятором //Адаптивные системы автоматического управления. - К.: Техника. 1985. №13. С. 58-64.
13. Луцкив Н. М., Маруняк Я. С. Следящий электропривод с наблюдающим устройством //Техническая электродинамика. - К.: Наук. думка. 1985. №16. С. 60-65.
14. Луцкив Н. М. Системы с редуцированным наблюдающим устройством //Адаптивные системы автоматического управления. - К.: Техника. 1986. №14. С. 63-69.
15. Волощак И. А., Луцкив Н. М. Системы регулирования фазы ленточного материала при совмещении технологических операций //Техническая электродинамика. - К.: Наук. думка. 1986. №3. С. 85-89.
16. Луцкив Н. М. Системы с тандемным наблюдающим устройством // Адаптивные системы автоматического управления. - К.: Техника. 1987. №15. С. 53-60.
17. Луцкив М.М. Моделі динаміки ролонних ротаційних машин з пружними зв'язками // Поліграфія і видавнича справа. - Львів: Вища школа. 1988. №24. С. 81-89.
18. Луцкив Н. М. Системы электропривода с наблюдающим устройством механизмов с упругими связями //Электромеханика. 1988. №11. С. 99-104.
19. Луцкив Н. М. Обобщение структурные и математические модели систем с упругими связями //Адаптивные системы автоматического управления. - К.: Техника. 1988. №16. С. 94-98.
20. Луцкив М. М. Прості моделі багатодвигунних ролонних друкарських машин // Поліграфія і видавнича справа. - Львів: Вища школа. 1989. №25. С. 67-74.
21. Луцкив Н. М. Обобщенные динамические модели печатных машин с упругими связями //Полиграфические машины-автоматы. -Омск: Омский политехнический институт. 1990. С. 62-67.
22. Луцкив М. М. Системы автоматического керування ротаційними машинами з пружними зв'язками. - К.: Вища школа. 1991. С. 71.
23. А. С. 946171 /СССР/ Устройство для измерения натяжения движущегося ленточного материала /Луцкив Н. М., Волощак И. А., Дурняк Б. В., Стрепко И. Т. - Опубл. в БИ 1982. №42.
24. А. С. 996313 /СССР/ Устройство для регулирования натяжения ленточного материала /Луцкив Н. М., Волощак И. А., Стрепко И. Т., Дурняк Б. В. - Опубл. в БИ 1983. №6.

25. А. С. 1101399 /СССР/ Система управления многодвигательной печатной машины /Луцкив Н. М., Волощак И. А. - Оpubл. в БИ 1984. №25.
26. А. С. 1315346 /СССР/ Устройство для автоматического совмещения запечатанной ленты с картонной сторонкой и линией поперечной рубки ленты в крышкоделательной машине /Луцкив Н. М. Волощак И. А., Музычин О. Е., Бигун Н. И. - Оpubл. в БИ 1987. №4.
27. А. С. 1416335 /СССР/ Устройство для управления перемещением материала на крышкоделательной машине /Луцкив Н. М., Волощак И. А., Музычин О. Е. - Оpubл. в БИ 1988. №30.
28. А. С. 1489867 /СССР/ Устройство для управления барабаном для листорезальной ротационной машины /Верхола М. И., Вязивский Б. А., Луцкив Н. М., Стрепко И. Т. - Оpubл. в БИ 1989. №24.
29. А. С. 1541559 /СССР/ Устройство для управления механизмом резания листорезальной машины /Верхола М. И., Луцкив Н. М. - Оpubл. в БИ 1990. №5.
30. А. С. 15558837 /СССР/ Система управления электроприводом печатной машины /Волощак И. А., Верхола М. И., Луцкив Н. М. - Оpubл. в БИ 1990. №15.
31. А. С. 1627421 /СССР/ Система автоматической переналадки машины скрепления книжных блоков /Луцкив Н. М., Маруняк Я. С., Петрив И. Н., Плотник М. М., Хведчин Ю. И. - Оpubл. в БИ 1991. №6.
32. А. С. 1706721 /СССР/ Устройство для управления барабаном реза листорезальной ротационной машины /Верхола М. И., Луцкив Н. М. - Оpubл. в БИ 1991. №3.
33. А. С. 1830870 /СССР/ Система автоматизированного привода многодвигательной рулонной печатной машины /Луцкив Н. М., Волощак И. А., Стрепко И. Т. 1993.

#### Особистий вклад автора в основних роботах

В роботах /3, 4, 5, 6, 7, 8, 13, 15,/ автору належать постановка наукової задачі, шляхи і методи їх вирішення, теоретичний аналіз результатів. Результати робіт /7, 9, 10/ належать авторам в рівній мірі. В роботах /22-33/ вклад автора визначений довідками про творчу участь в створенні винаходу.

Зробувач



Здано до складання 03.01. 1994 р. Підписано до друку 18.01. 1994 р.  
1.52 ум. друк. арк. Формат 60х90/16. Друк офсетний. Папір друк. № 1.  
Зам. 30 т. 110. 1994 р.  
Пустомитівська районна друкарня м. Пустомити, вул. Грушевського 33.

461.516

AB 29.582

**AB 29.582**