

ХАРКІВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Нетеса Андрій Миколайович

УДК 62-83-52

**ЗАСТОСУВАННЯ ЛАНЦЮГОВИХ ДРОБІВ І ТОПОЛОГІЧНИХ  
МЕТОДІВ ДЛЯ ЗНИЖЕННЯ ПОРЯДКУ МОДЕЛЕЙ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ  
СИСТЕМ**

Спеціальність 05.09.03 - Електротехнічні комплекси та системи

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Харків - 2000

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Харківському державному політехнічному університеті Міністерства освіти і науки України

Науковий керівник – доктор технічних наук, професор

**Долбня Віктор Тимофійович,**

Харківський державний політехнічний університет,  
професор кафедри автоматизованих  
електромеханічних систем.

Офіційні опоненти: - доктор технічних наук, професор

**Кузнецов Борис Іванович,**

Українська інженерно-педагогічна  
академія (м. Харків),  
завідувач кафедри систем управління та  
автоматизації промислових установок;

кандидат технічних наук, доцент

**Васильєв Вадим Олексійович,**

АТ “Науково-технічне товариство  
“Цемент”” (м. Харків),  
ведучий науковий співробітник.

Провідна установа - **Донецький державний технічний університет,**

Міністерства освіти і науки України, кафедра “Електропривод та автоматизація  
промислових установок”

Захист відбудеться 20 квітня 2000 р. о 14-30 год.

на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.04 в Харківському державному політехнічному

університеті (61002, м. Харків, вул. Фрунзе 21).

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Харківського державного політехнічного університету.

Автореферат розісланий 17 березня 2000 р.

Вчений секретар

спеціалізованої вченої ради

Осічев О.В.

### ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Комплексна автоматизація галузей народного господарства, підвищення вимог до автоматизованих електроприводів, що відіграють основну роль у промисловості України, об'єднання різноманітних механізмів у єдиній системі керування ускладнюють задачі аналізу і синтезу таких систем. Тому виникає проблема спрощення і зниження порядку систем без якісної видозміни їхніх перехідних характеристик. Рішення цієї проблеми дозволить значно спростити етап проектування складних систем, скоротити кількість їх елементів. Це призведе до зниження собівартості і до підвищення надійності функціонування таких систем.

Аналіз складних електричних і автоматизованих електромеханічних систем є трудомістким процесом, що полягає у визначенні тих або інших характеристик системи. Основну інформацію про властивості системи можна одержати із значень коренів характеристичного рівняння. Застосування чисельних методів аналізу і комп'ютерної техніки дозволяє досить просто визначити як корені характеристичного рівняння, так і потрібні характеристики системи. Але при цьому немає чіткої картини впливу тих або інших параметрів системи на її поведінку. Такого недоліку позбавлені методи символного опрацювання інформації, серед яких слід відзначити топологічні методи, які при проектуванні різноманітних систем займають важливе місце. Застосування символних методів в цьому контексті дозволить отримати менш складні математичні моделі досліджуваних систем.

Спрощення математичної моделі системи можна проводити також у напрямку зниження її порядку. Найбільш простим і наочним засобом зниження порядку математичної моделі серед методів редукції передаточної функції є підхід, що використовує ланцюгові дроби. Застосування символного розкладання передаточної функції в ланцюговий дріб дає можливість виявлення параметрів системи, що сильно або слабо впливають на характер перехідної характеристики. Аналі-

тичний вираз спрощеної передаточної функції дає можливість синтезувати топологію спрощеної системи й одержати її фізичну реалізацію. Крім того, аналітична форма запису моделі зниженого порядку складного об'єкту керування дозволяє полегшити синтез регуляторів для таких систем. Метод ланцюгових дробів, крім аналогових систем, зручно використовувати для спрощення передаточних функцій цифрових регулято-

рів.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Теоретичні розробки дисертації застосовувалися при виконанні робіт із наукової теми М3406 “Дослідження впливу зворотних зв'язків на динаміку електромеханічних систем обтискних прокатних станів у режимі буксування. Розробка експериментальної системи усунення пробуксовок на основі датчиків фрикційних автоколивань”, яка проводилась за наказом Міносвіти №37 від 13.02.97.

Мета і задачі дослідження. Мета дисертаційної роботи - розробити методику, що дозволяє знижувати порядок моделей електромеханічних систем із збереженням основних показників якості регулювання і розкрити особливості її застосування на прикладі типових електромеханічних систем.

Для досягнення поставленої мети вирішувалися такі задачі.

Визначення в аналітичному вигляді коренів характеристичних рівнянь досліджуваних систем шляхом зміни їхньої топології.

Розробка біноміального алгоритму реалізації розкладання передаточної функції в ланцюговий дріб при рівності сталих значень.

Порівняльна оцінка ефективності застосування запропонованого і відомих алгоритмів реалізації розкладання передаточної функції в ланцюговий дріб на прикладі типових електромеханічних систем.

Розробка методики зниження порядку за допомогою ланцюгових дробів в аналітичному вигляді для типових електромеханічних систем і їхніх елементів.

Наукова новизна отриманих результатів:

- у дисертації запропонована нова методика топологічних перетворень неспрямованих графів, за допомогою якої можна розкласти визначник системи на множники;

- вперше запропонований один із засобів розкладання передаточної функції в ланцюговий дріб, що дає ті ж результати в порівнянні з відомим засобом, але є менш трудомістким;

- вперше запропонований метод топологічних перетворень за допомогою ланцюгових дробів лінійних електричних схем, що заснований на використанні кінцевого стану реактивних елементів;

- для структурної схеми електропривода системи підпорядкованого регулювання з датчиком

ЕРС уперше була запропонована формула приблизного визначника, що являє добуток двох поліномів другого порядку; була виведена умова, при дотриманні якої значення полюсів початкової системи і коренів приблизного визначника будуть рівні між собою; на цій підставі складена спрощена структурна схема другого порядку;

- отримано моделі зниженого порядку в чисельному вигляді спрощених моделей за допомогою ланцюгових дробів для передаточної функції по збурюючому впливу електроприводів системи підпорядкованого регулювання з датчиком ЕРС і регулятором швидкості, наведені їх перехідні характеристики;

- у залежності від характеру перехідної характеристики системи, пропонується застосовувати той або інший засіб розкладання передаточної функції в ланцюговий дріб;

- за допомогою методу ланцюгових дробів були отримані аналітичні вирази математичних моделей для електроприводу системи підпорядкованого регулювання з регулятором швидкості; для таких систем отримані спрощені передаточні функції по збуренню і відповідні їм структурні схеми, порядок яких на одиницю менше порядку початкової системи без погіршення якості перехідної характеристики;

- на підставі методу ланцюгових дробів отримані аналітичні вирази математичних моделей зниженого порядку для двомасової електромеханічної системи; ці моделі відповідають низькочастотним і високочастотним коливанням, що характерні для такого класу систем.

Практичне значення отриманих результатів. Представлені в дисертації теоретичні розробки рекомендуються для практичного використання в науково-дослідницьких інститутах, промислових підприємствах, які вирішують проблеми спрощення електричних і електромеханічних систем та синтезу регуляторів для автоматизованих електроприводів.

Теоретичні результати, отримані в ході виконання даної дисертаційної роботи, впроваджені в навчальний процес у Харківському державному політехнічному університеті на кафедрі “Автоматизовані електромеханічні системи” у лекційних курсах “Математичні основи теорії автоматичного керування”, “Електроніка та мікросхемотехніка”.

Отримані розробки одержали впровадження при виконанні робіт із наукової теми М3406 “Дослідження впливу зворотних зв'язків на динаміку електромеханічних систем обтискних прокатних станів у режимі буксування. Розробка експериментальної системи усунення пробуксовок на основі датчиків фрикційних автоколивань”, яка проводилась за наказом Міносвіти №37 від 13.02.97. В дисертації наведені відповідні акти використання отриманих результатів.

Особистий внесок здобувача. У роботах, написаних у співавторстві з В.Т. Долбнею, автору дисертації належить: у [1] розрахунок перехідних характеристик початкової електричної схеми і її наближень, порівняння цих характеристик і вибір оптимального наближення; у [6] розробка різ-

номанітних варіантів розкладання характеристичного рівняння системи на множники, порівняння полюсів кожного з варіантів між собою; у [7] формулювання основної ідеї, теоретичні розробки перетворень неспрямованих графів; у [8] постановка задачі, моделювання на комп'ютері перехідних характеристик отриманих наближень, формулювання висновків; у [9] порівняння різноманітних засобів розкладання передаточної функції в ланцюговий дріб, розрахунок перехідних характеристик отриманих наближень, порівняння нулів і полюсів математичних моделей, формулювання висновків;

Апробація результатів дисертації. Про основні положення і результати дисертаційної роботи були зроблені доповіді на: семінарах НАН України “Динаміка нелінійних електромеханічних систем” у 1997, 1998 і 1999 р.; науково-технічній конференції “Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика”, що проводилася в м. Алушта 21-26 вересня 1998 р.

Публікації. Основні ідеї і результати дисертаційної роботи були опубліковані в 9 статтях, 5 - із співавторами, 4 - особисто. З них 5 статей - у фахових виданнях, 4 - у працях науково-технічних конференцій.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Містить 163 сторінок друкованого тексту, ілюстрованого 57 рисунком, 12 таблиць і 9 додатків. Список використаних літературних джерел включає 95 найменувань на 9 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі подано загальну характеристику роботи, її зв'язок з науковими програмами і темами. Показана актуальність роботи, сформульовано мету та основні задачі наукових досліджень, визначено наукову новизну отриманих результатів та обґрунтовано їх практичну цінність.

В першому розділі розглянуто питання застосування символьних методів аналізу. Показано, що при проектуванні різних систем, особливо на його початкових етапах, найбільше значення мають символьні способи. Аналітична форма запису результатів розрахунку дозволяє оцінити вплив тих або інших параметрів на характеристики системи. Одержання результату в символьній формі значно спрощується при переході до топологічних способів рішення системи лінійних рівнянь.

Були виділені важливі властивості визначників спрямованого і неспрямованого графів, що використані в подальших дослідженнях даної дисертації. Для спрямованих графів такою властивістю є те, що, якщо граф має  $n$  контурів, що не торкаються один одного, то його визначник можна подати у вигляді добутку:

$$\Delta = \prod_{i=1}^n \Delta - L_i \quad (1)$$

де  $L_i$  - передача  $i$ -го контуру.

Для неспрямованих графів такою властивістю є те, що, якщо граф складається з двох підграфів, які мають лише один загальний вузол, то визначник усього графа дорівнює добутку визначників цих підграфів.

У розділі розглянуто проблеми дослідження складних систем. Показано, що такі системи зручно аналізувати вроздріб. Іншими словами, здійснюється перехід від моделювання складних систем до моделювання більш простих її підсистем, за властивостями яких можна відновити властивості початкової системи.

Було показано, що існує математичне обґрунтування умов можливості зниження порядку рівнянь моделі в системах регулювання та урахування впливу відкинутої частини. Розглянуто також різноманітні методи зниження порядку систем.

У розділі розглянуті засоби побудови моделей зниженого порядку багатомірних систем у просторі станів, що базуються на двох основних підходах. Перший із них передбачає виділення в системі домінантних станів, що будуть збережені в моделі зниженого порядку. Друга група методів побудови моделей зниженого порядку базується на мінімізації інтегральної квадратичної помилки між станами початкової системи і спрощеної моделі

Серед існуючих методів зниження порядку передаточної функції математичної моделі слід відзначити метод ланцюгових дробів. При цьому існує декілька підходів розкладання передаточної функції в ланцюговий дріб.

Наприкінці розділу подані мета роботи та основні задачі дисертації.

Другий розділ присвячено вирішенню задачі перетворення топології початкової системи таким чином, щоб визначник перетвореної системи можна було розкласти на множники, що дає змогу знайти полюси системи в аналітичному вигляді.

Другий розділ присвячено вирішенню задачі перетворення топології початкової системи таким чином, щоб визначник перетвореної системи можна було розкласти на множники, що дає змогу знайти полюси системи в аналітичному вигляді.

При цьому перехідні характеристики початкової і перетвореної систем повинні мати мінімальні розходження. Показниками, за якими будуть оцінюватися перехідні характеристики, прийняті: час першого узгодження, перерегулювання, число перерегулювань, час максимального перерегулювання, сталі значення і час регулювання до сталого значення. При цьому критерієм мінімальності є відмінність вищевказаних параметрів перетвореної системи у межах 10% відносно відповідних показників початкової системи.

У даному розділі розглянуті типові системи електроприводів, одна з них із регулятором ЕРС, структурна схема якої приведена на рис. 1.

Рис. 1

## Структурна схема електропривода з датчиком ЕРС

З погляду теорії спрямованих графів був запропонований варіант розкладання визначника системи на множники, що дозволило знайти корені характеристичного рівняння в аналітичному вигляді:

$$p_{1,2} = \frac{1}{2} \left( -\frac{1}{T_\mu} \pm \sqrt{\frac{1}{T_\mu^2} - 4 \frac{k_{PT} k_{TP} k_{DT}}{R_\Omega T_\Omega T_\mu}} \right); \quad (2)$$

$$p_{3,4} = \frac{1}{2} \left( -\frac{J + T_\Omega \beta_c}{T_\Omega J} \pm \sqrt{\left( \frac{J + T_\Omega \beta_c}{T_\Omega J} \right)^2 - 4 \frac{\beta_c + k_{P\Omega} k_H k_{D\Omega} (c\Phi)^2 \frac{1}{k_{DT}}}{T_\Omega J}} \right). \quad (3)$$

де  $T_\Omega$ ,  $T_\mu$ ,  $J$ ,  $R_\Omega$ ,  $c\Phi$ ,  $k_{P\Omega}$ ,  $k_{PT}$ ,  $k_{TP}$ ,  $k_H$ ,  $k_{DT}$ ,  $k_{D\Omega}$ ,  $\beta_c$  - параметри електропривода.

Була виведена умова, при дотриманні якої таке розкладання визначника не внесе ніякої похибки:

$$m = \frac{k_{P\Omega} k_H k_{D\Omega} R_\Omega}{k_{DT}} = 1. \quad (4)$$

Проте ця умова не є жорсткою, тому що відхилення від неї не викликає істотних відмінностей полюсів вихідної і спрощеної систем, що відзначено у роботі. Знаючи чисельні значення полюсів системи, можна знизити порядок математичної моделі системи до другого. Це можливо лише в тому випадку, коли чисельні значення однієї пари комплексно-спряжених коренів характеристичного рівняння дуже відрізняються від значень другої пари. У аналізованому прикладі такий підхід дозволив знизити на два порядки визначник системи. На рис. 2, приведені графіки перехідних характеристик точної та спрощеної системи.

Було розглянуто електропривод системи підпорядкованого регулювання з регулятором швидкості, структурна схема якої наведена на рис. 3.



## Рис. 2

### Графіки перехідних характеристик

Для такої системи при пропорційному або пропорційно-інтегральному регуляторі швидкості умова (4) не дотримувалася. Був розглянутий варіант, при якому ігнорувалася той факт, що (4) не виконувалось. При цьому порядок, як чисельника, так і знаменника спрощеної передаточної функції зменшувався на одиницю.

## Рис. 3

### Структурна схема електропривода з регулятором швидкості

Структурна схема спрощеної системи, яка показана на рис 4, складається з двох контурів, що не торкаються один одного.

Перехідні характеристики по збуренню мають однакові сталі значення та час максимального перерегулювання. При цьому спрощена система носить менш коливальний характер, ніж точна система. Зокрема, при пропорційному регуляторі перехідна характеристика спрощеної системи не має перерегулювання, а при пропорційно-інтегральному різниця в перерегулюванні становить 29%.

## Рис. 4

### Спрощена структурна схема

У даному розділі були також розглянуті перетворення структури неспрямованих графів. За однією з властивостей визначника для неспрямованих графів виконувалась зміна топологічної структури, в наслідок чого утворювався новий граф, який складається з двох підграфів. Використання розроблених перетворень для аналізу електричних схем дозволить отримати аналітичні вирази коренів приблизних характеристичних рівнянь та вивчення можливості спрощення таких схем.

У третьому розділі розглянуто заснований на ланцюгових дробах метод зниження порядку передаточної функції системи. Був приведений огляд трьох відомих алгоритмів реалізації розкладання передаточної функції в ланцюговий дріб.

У роботі запропоновано новий, четвертий засіб уявлення передаточної функції у вигляді ланцюгового дроби, що заснований на біноміальнім розкладанні.

Нехай є деяка передаточна функція:

$$W(p) = \frac{p^{n-1} + a_{n-2}p^{n-2} + \dots + a_2p^2 + a_1p + a_0}{p^n + b_{n-1}p^{n-1} + \dots + b_2p^2 + b_1p + b_0}. \quad (5)$$

Суть запропонованого засобу полягає в тому, що виконується заміна оператора  $p$  на деякий оператор  $q$  за таким співвідношенням:

$$q = \frac{1}{p}. \quad (6)$$

Тоді вираз (5) прийме вигляд:

$$W(q) = q \frac{a_0q^{n-1} + a_1q^{n-2} + \dots + a_{n-2}q + 1}{b_0q^n + b_1q^{n-1} + \dots + b_{n-1}q + 1}. \quad (7)$$

Далі вираз (7) розкладаємо в ланцюговий дріб, використовуючи біноміальне розкладання. В результаті одержимо:

$$W(q) = q \frac{1}{A_1'q + A_0' + \frac{1}{B_1'q + B_0' + \frac{1}{C_1'q + C_0' + \dots}}}, \quad (8)$$

де  $A_1', A_0', B_1', B_0', C_1', C_0'$  - коефіцієнти, що одержуються при діленні знаменника і чисельника виразу (7) між собою.

Відкинувши останні  $k$  дробів, ми одержимо наближення  $n - k$  порядку. Після згортання ланцюгового дробу робимо зворотну заміну, здійснюючи

перехід до оператора  $p$ .

Було показано, що для передаточних функцій по збуренню розглянутих типових електромеханічних систем, які не мають астатизму, перший і четвертий засоби дали абсолютно однакові результати. Для таких же систем другий і третій засоби також дали однакові результати. Це говорить про те, що перший і четвертий засоби, які забезпечують рівність сталих значень початкової та спрощеної систем, є рівнозначними. Але перевагу варто віддати біноміальному розкладанню (четвертий засіб), оскільки такий підхід дозволяє одержати більш простий вираз ланцюгового дробу. Крім того, біноміальне розкладання дозволяє використовувати стандартні операції ділення поліному на поліном у поширених комп'ютерних пакетах, таких як MATLAB і MATHEMATICA, що дозволяє не писати спеціальну програмну реалізацію для першого засобу. Аналогічні висновки

можна зробити також для другого і третього засобів, із яких варто виділити біноміальний третій підхід до розкладання передаточної функції в ланцюговий дріб.

Для астатичних систем першого порядку застосування третього і четвертого засобів із виносом оператора  $p$  за дужки дозволило одержати спрощені моделі зі збереженими астатизмом і різницею між порядком чисельника і знаменника.

Було показано, що для електромеханічних систем, перехідні характеристики яких мають малу коливальність, найбільш вдалим є четвертий засіб. Для систем з дуже коливальною перехідною характеристикою необхідно використовувати третій засіб розкладання передаточної функції в ланцюговий дріб.

В роботі продемонстровано ефективність дії методу ланцюгових дробів на прикладі регулятора високого порядку, алгоритм синтезу якого пропонується розробниками пакету MATLAB. При використанні ланцюгових дробів вдалося одержати спрощену модель регулятора, при цьому параметри перехідної характеристики отриманої системи є кращими, ніж при використанні стандартних методів зниження порядку, які програмно реалізовані в пакеті MATLAB. Було показано, що метод ланцюгових дробів у задачах символьного аналізу і проблемах синтезу є кращим у порівнянні з іншими розглянутими методами зниження порядку. Це пояснюється тим, що метод ланцюгових дробів можна використовувати не тільки в тих випадках, коли передаточна

функція системи задана в чисельному вигляді, але й для одержання коефіцієнтів передаточної функції спрощеної моделі через параметри початкової системи в аналітичному вигляді.

Четвертий розділ присвячений питанням зниження порядку за допомогою ланцюгових дробів в аналітичному вигляді для типових електромеханічних систем і їхніх елементів.

На підставі розкладання у ланцюговий дріб передаточної функції структурної схеми електроприводу системи підпорядкованого регулювання з датчиком ЕРС, що подана на рис. 1, були отримані спрощені математичні моделі. Аналітичні вирази математичних моделей першого і другого порядку дозволили синтезувати структурні схеми цих наближень.

Наближення першого порядку буде являти собою передачу прямого каналу від збурюючого впливу до шуканої координати. Передаточна функція наближення другого порядку відповідає структурній схемі, що являє собою математичну модель електродвигуна.

Був розглянутий електропривод системи підпорядкованого регулювання з регулятором швидкості, структурна схема якого подана на рис. 3. При цьому розглядалося два випадки: пропорційний і пропорційно-інтегральний регулятори швидкості. Були отримані аналітичні вирази для перших наближень, що точно описують поведінку системи при  $T_{\Sigma} = T_{\mu}$ . Була запропонована

модель у вигляді структурної схеми, що відповідає випадку, коли  $T_{\Theta} > T_{\mu}$ . При цьому порядок запропонованої моделі на одиницю менше, ніж порядок початкової системи, що дозволяє спростити аналіз таких систем. Структурна схема спрощеної моделі приведена на рис. 5.

Рис.5

#### Структурна схема спрощеної моделі

При цьому різниця між параметрами перехідних характеристик початкової і спрощеної систем лежить в межах 1-2%.

Для двомасової електромеханічної системи були отримані аналітичні вирази математичних моделей зниженого порядку, що описують високочастотні коливання. При подальшому використанні цих моделей отримано аналітичний вираз визначника системи, що описує низькочастотні коливання. На підставі методу ланцюгових дробів показано, що при дотриманні встановлених умов низькочастотні коливання визначаються електродвигуном.

На підставі розкладання початкової передаточної функції в ланцюговий дріб був запропонований новий тип топологічних перетворень електричних схем, що дозволяє відразу з початкової схеми одержати спрощену схему зниженого порядку, що значно полегшує аналіз початкової схеми і дозволяє вирішити питання її мінімізації.

На рис. 6 показані графіки перехідних характеристик початкової системи  $F(p)$  четвертого порядку і отриманих наближень:  $F_1'(p)$ ,  $F_2''(p)$  і  $F_3'''(p)$  третього, другого і першого порядку відповідно.

Рис. 6

#### Графіки перехідних характеристик

Суть запропонованого типу топологічних перетворень полягає в такому: при обраному наближенні в схемі зберігаються лише ті реактивні елементи, що входять в отриману передаточну функцію, а всі інші повинні бути перетворені в кінцевий стан. При цьому забезпечується рівність сталих значень перехідних характеристик початкової і наближеної систем.

## ВИСНОВКИ

Виконана робота представляє собою рішення комплексу задач, які мають наукове та практичне значення.

1. У результаті проведених досліджень була запропонована методика перетворення топології електричних схем, за допомогою якої можна визначити корені характеристичного рівняння перетвореної структури в символічному вигляді. При цьому чисельні значення полюсів початкової і перетвореної структур будуть дещо відрізнятися. Дана методика пройшла апробацію на конкретній електричній схемі з використанням комп'ютерного моделювання.

2. Виведено умову розкладання на множники визначника структурної схеми електроприводу системи підпорядкованого регулювання з датчиком ЕРС, в результаті чого були отримані аналітичні вирази коренів характеристичного рівняння цієї системи, що дозволило синтезувати спрощену модель у вигляді структурної схеми. Результати теоретичних розробок були підтверджені в процесі моделювання на персональному комп'ютері.

3. Запропоновано новий біноміальний алгоритм реалізації розкладання передаточної функції в ланцюговий дріб.

4. На підставі проведеного порівняння чотирьох засобів у чисельному вигляді були виділені біноміальні засоби розкладання передаточної функції в ланцюговий дріб.

5. Було показано, що якщо перехідна характеристика початкової системи є мало коливальною, то для зниження порядку рекомендується застосовувати розроблений четвертий засіб розкладання передаточної функції в ланцюговий дріб. У протилежному випадку - третій.

6. На підставі теорії ланцюгових дробів була запропонована нова методика топологічних перетворень електричних схем, що дозволяє одержати спрощену схему зниженого порядку шляхом приведення реактивних елементів до кінцевого стану, що забезпечує рівність сталих значень перехідних характеристик початкової і спрощеної систем.

7. Були отримані математичні моделі зниженого порядку для електроприводів системи підпорядкованого регулювання з регулятором швидкості в символічному вигляді. Подано структурні схеми цих моделей і приведені умови, при яких спрощені моделі будуть точно описувати поведінку початкової системи.

8. За допомогою ланцюгових дробів отримані аналітичні вирази математичних моделей другого порядку для двомасової електромеханічної системи, що відповідають низькочастотним і високочастотним коливанням, що протікають у початковій системі.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ АВТОРОМ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Долбня В.Т., Нетеса А.Н. Об упрощении схем электрических цепей с сохранением характера их переходных характеристик // Вестник ХГПУ. - 1998.- Вып.21. – С. 8-11.
2. Нетеса А.Н. Применение конечных состояний реактивных элементов электрической схемы для понижения порядка передаточной функции // Вестник ХГПУ. - 1999.- Вып.37. – С. 94-97.
3. Нетеса А.Н. Упрощение структурной схемы электропривода системы подчиненного регулирования с датчиком ЭДС // Вестник ХГПУ. - 1999.- Вып.55. – С. 96-99.
4. Нетеса А.Н. Математическая модель пониженного порядка электропривода системы подчиненного регулирования с регулятором скорости // Вестник ХГПУ. - 1999.- Вып.58. – С. 67-69.
5. Нетеса А.Н. Упрощение структурных схем электроприводов системы подчиненного регулирования // Вестник ХГПУ. - 1999.- Вып.61. – С. 120-122.
6. Долбня В.Т., Нетеса А.Н. Проблемы аналитического решения характеристического уравнения электромеханических систем // Труды конф. “Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика”. –

Харьков: Основа. - 1996. - С.152-154.

7. Долбня В.Т., Нетеса А.Н. Некоторые аспекты аналитического исследования сложных систем // Труды конф. “Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика”. – Харьков: Основа. - 1997. - С. 53-58.
8. Долбня В.Т., Нетеса А.Н. Комбинированный подход к понижению порядка математической модели системы методом цепных дробей // Труды конф. “Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика”. Вестник ХГПУ. Специальный выпуск. – Харьков: ХГПУ. – 1998. -С.49-51.
9. Долбня В.Т., Нетеса А.Н. Понижение порядка математической модели системы методом цепных дробей // Труды конф. “Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика”. Вестник ХГПУ. Специальный выпуск. – Харьков: ХГПУ. – 1998. - С.55-58.

#### АНОТАЦІЇ

Нетеса А. М. Застосування ланцюгових дробів і топологічних методів для зниження порядку моделей електромеханічних систем. - Рукопис.

Дисертація на здобуття вченого ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.03 - електротехнічні комплекси та системи. - Харківський державний політехнічний університет, Харків, 1999.

Дисертація присвячена питанням символічного аналізу електромеханічних систем. Розглянуто проблеми застосування теорії графів і ланцюгових дробів до задач зниження порядку математичних

моделей електромеханічних систем та їх елементів. Для типових електроприводів системи підпорядкованого регулювання були отримані аналітичні вирази моделей зниженого порядку та наведені їх перехідні характеристики. На основі методу ланцюгових дробів запропоновано методику топологічних перетворень електричних схем, що дозволяє одержати схемні рішення спрощених моделей. В роботі викладено новий алгоритм реалізації розкладання передаточної функції в ланцюговий дріб. В дисертації запропоновано рекомендації щодо використання різноманітних алгоритмів реалізації розкладання передаточної функції в ланцюговий дріб.

Ключові слова: ланцюговий дріб, граф, перехідна характеристика, зниження порядку, електромеханічні системи.

Netesa A. N. Application of continued fraction and topological methods for model reduction of electromechanical systems. – Manuscript.

Thesis for a candidate's degree by speciality 05.09.03 – electrotechnical complexes and systems. – Kharkiv state polytechnic university, Kharkiv, 1999.

The dissertation is devoted to the problems of electromechanical systems symbol analysis. Problems of graph theory and continued fraction application to the model reduction of electromechanical systems and them elements are considered. Symbol form of low order models for typical electric drives of subordinate control systems are proposed. The transient responses of electromechanical systems reduced models are obtained. The technique of electrical circuits topological transformations which allows to get simplified models scheme solutions on the basis of continued fraction is proposed. In the dissertation the new algorithm of continued fraction is suggested. Some known and proposed algorithms of continued fraction are compared. The recommendations of these algorithms application for model reduction of electromechanical systems are proposed.

Key words: continued fraction, graph, transient response, lower order, electromechanical systems.

Нетеса А.Н. Применение цепных дробей и топологических методов для понижения порядка моделей электромеханических систем. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.03 – электротехнические комплексы и системы. – Харьковский государственный политехнический университет, Харьков, 1999.

Диссертация посвящена вопросам символьного анализа электромеханических систем и их элементов. Символьный анализ дает возможность выделения параметров системы, слабо влияющих на качество ее переходной характеристики и решить задачу минимизации. Это, в свою очередь, поможет снизить себестоимость выпускаемой в электротехнической промышленности продукции,

повысить ее надежность.

Цель диссертационной работы – разработать методику, позволяющую понижать порядок моделей электромеханических систем с сохранением основных показателей качества и раскрыть особенности ее применения на примере типовых электромеханических систем.

Выведено условие разложения на множители определителя структурной схемы электропривода системы подчиненного регулирования с датчиком ЭДС, в результате чего были получены аналитические выражения корней характеристического уравнения этой системы, что позволило синтезировать редуцированную модель в виде структурной схемы. Результаты теоретических работ были подтверждены в процессе компьютерного моделирования.

В результате проведенных исследований была предложена методика преобразования топологии системы, с помощью которой можно определить корни характеристического уравнения преобразованной структуры в символьном виде. При этом численные значения полюсов исходной и преобразованной структур будут несколько отличаться.

Предложен новый способ разложения передаточной функции в цепную дробь, который обеспечивает равенство установившихся значений упрощенной модели и исходной системы. На основании проведенного сравнения четырех способов в численном виде были выделены биномиальные способы разложения передаточной функции в цепную дробь и выработаны рекомендации по их применению.

На основании разложения передаточной функции электропривода системы подчиненного регулирования с датчиком ЭДС в цепную дробь с помощью различных способов разложения передаточной функции в цепную дробь были получены упрощенные математические модели.

Был рассмотрен электропривод системы подчиненного регулирования с регулятором скорости. При этом рассматривалось два случая: пропорциональный и пропорционально-интегральный регуляторы скорости. Была предложена модель в виде структурной схемы, которая соответствует случаю, когда  $T_э > T_и$ . При этом порядок предложенной модели на единицу меньше, чем порядок исходной системы.

Для двухмассовой электромеханической системы были получены аналитические выражения математических моделей пониженного порядка, которые описывают высокочастотные колебания. При дальнейшем использовании этих моделей, получено аналитическое выражение определителя системы, описывающей низкочастотные колебания.

На основании теории цепных дробей была предложена новая методика топологических преобразований электрических схем, позволяющая получить упрощенную схему пониженного порядка. Суть предложенного вида топологических преобразований заключается в следующем. При



выбранном приближении в схеме сохраняются лишь те реактивные элементы, которые входят в выбранную передаточную функцию, а остальные должны быть переведены в конечное состояние. Этим обеспечивается равенство установившихся значений переходных характеристик исходной и приближенной систем.

Ключевые слова: цепная дробь, граф, переходная характеристика, понижение порядка, электромеханическая система.

Відповідальний за підготовку к.т.н., доц. Кутовой Ю.М.

Підписано до друку 10.03.2000.

Формат 60×90/16. Папір офсетний.

Друк на різнографі. Умовн. друк. арк. 0,8. Умовн. фарбо-відб. 1,0.

Тираж 100 прим. Замовлення № 147

Адреса типографії

вул. Сумська, 76-а, м. Харків, 61078

Реєстраційне свідоцтво: ВК №1002 від 13.10.94