

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
"ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ"

Свиридова Інна Олексіївна

УДК 681.518

**ПАРАМЕТРИЧНИЙ СИНТЕЗ СИСТЕМИ РЕГУЛЮВАННЯ  
АВТОНОМНОЇ ЕНЕРГОУСТАНОВКИ НА ОСНОВІ  
МНОЖИННОЇ ЛІНІЙНОЇ АПРОКСИМАЦІЇ**

Спеціальність 05.13.07 – Автоматизація технологічних  
процесів

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Харків - 2001

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Національному технічному університеті "Харківський політехнічний інститут" Міністерства освіти і науки України, м. Харків.

Науковий керівник: доктор технічних наук, старший науковий співробітник  
Куценко Олександр Сергійович,  
Національний технічний університет  
"Харківський політехнічний інститут",  
завідувач кафедри системного  
аналізу і управління.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор  
Александров Євген Євгенович,  
Національний технічний університет  
"Харківський політехнічний інститут",  
завідувач кафедри колісних і гусеничних машин  
кандидат технічних наук,  
Калногуз Анатолій Миколайович,  
Національне космічне агентство України, м. Харків  
директор НВО "Хартрон - Аркос".

Провідна установа: науково-виробнича корпорація "Київський інститут автоматики"  
Держкомітета промислової політики України, м. Київ.

Захист відбудеться "25" грудня 2001р. о 14 год. 30 хв. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д  
64.050.07 у Національному технічному університеті "Харківський політехнічний інститут" за  
адресою:

61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21, корп. У2, ауд. 507.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного технічного університету  
"Харківський політехнічний інститут".

Автореферат розісланий "23" листопада 2001р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради

Голоскоков О.Є.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** В умовах енергетичної кризи все більше значення набувають автономні енергетичні установки малої потужності, призначені для використання їх як основними так і резервними енергоджерелами. Одночасно підвищуються вимоги до якості виробленої електроенергії. По сформованій традиції виробництво основних перетворюючих пристроїв - теплового двигуна і електрогенератора здійснюється різними підприємствами, і комплектування енергоустановки відбувається багато в чому випадковим чином. На системи управління кожного з агрегатів покладаються свої конкретні функції, а самі регулятори частоти і напруги електричного струму, як правило, побудовані на відмінних фізичних принципах. Така структура системи регулювання в багатьох випадках не дозволяє забезпечити необхідних параметрів електроенергії, особливо в режимах змінного навантаження, характерних для малопотужних енергоустановок. Застосування електронних регуляторів частоти обертання електрогенератора і напруги істотно поширює можливості забезпечення необхідної якості перехідних процесів шляхом введення додаткових перехресних зворотних зв'язків між каналами управління. Таким чином, виникає коло задач по вибору структури і синтезу конструктивних параметрів двоканального регулятора частоти і напруги. Розв'язання цих задач вимагає залучення методів математичного моделювання тепло-електромеханічних процесів, методів аналізу і синтезу систем управління нелінійними об'єктами, які знаходяться під впливами невизначених збурень, що саме по собі представляє науковий і практичний інтерес і може знайти своє місце при організації процесів управління будь-якими технологічними об'єктами.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Робота виконувалася відповідно до бюджетної фундаментальної науково-дослідної теми М 7213 "Розробка теорії і методів синтезу складних робастних систем управління з адаптивними зворотними і моделями, що прогнозують, в умовах невизначеності", виконуваної відповідно до наказу Міністерства освіти і науки № 7-І від 13.01.99.

**Мета і задачі дослідження.** Метою дисертаційної роботи є розробка методів і алгоритмів вибору параметрів системи регулювання частоти і напруги дизель-генераторної енергетичної установки (ДГЕУ) малої потужності, що забезпечують високу якість перехідних процесів у широкому діапазоні зміни навантаження. Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати такі задачі:

1) сформулювати постановку задачі параметричної оптимізації систем регулювання нелінійним багатомірним об'єктом, схильним до невизначених зовнішніх впливів;

2) розробити узагальнені критерії якості функціонування системи автоматичного регулювання нелінійного об'єкта на множині збурних впливів;

3) розробити ефективну методику визначення розміру узагальнених критеріїв якості;

4) розробити методику прийняття рішення на вибір конструктивних параметрів системи регулювання;

5) розробити математичну модель функціонування ДГЕУ;

6) застосувати розроблений підхід до параметричного синтезу регулятора ДГЕУ;

7) досліджувати вплив зміни структури регулятора на якість вироблюваної електроенергії.

*Об'єктом дослідження* в дисертаційній роботі є система регулювання частоти і напруги автономної енергоустановки малої потужності.

*Предметом дослідження* є математичні моделі, методи і алгоритми прийняття проектних рішень, які забезпечують високу якість регулювання вихідних координат.

*Методи дослідження*, використані при виконанні дисертаційної роботи:

1) метод простору станів у теорії автоматичного управління;

2) чисельні методи лінійної алгебри, розв'язання диференціальних рівнянь;

3) методи теорії прийняття рішень.

#### **Наукова новизна одержаних результатів.**

- Запропоновано новий підхід до проблеми параметричного синтезу систем автоматичного регулювання багатомірним нелінійним об'єктом, схильним до невизначених збурень, заснований на апроксимації нелінійної системи множиною лінійних.

- Одержали подальший розвиток методи оцінки якості перехідних процесів багатомірних керованих систем, засновані на множинній оцінці якості ансамблю перехідних процесів, обумовлених множинами припустимих початкових відхилень від положення рівноваги динамічної системи.

- Введено поняття робастної керованості лінійних керованих динамічних систем. Отримано критерій робастної керованості для деяких окремих випадків параметричної невизначеності об'єкта управління.

- Запропоновано рекурентний метод розв'язання матричного рівняння Ляпунова, що у сполученні з методом Левер'є обертання матриці, дозволяє досягти високої точності і швидкості рішення.

#### **Практичне значення одержаних результатів.**

- Розроблено і реалізовано на ЕОМ математичну модель ДГЕУ з електронним регулятором частоти і напруги вироблюваної електроенергії, що дозволяє на стадії попередньої розробки алгоритмів управління замінити експериментальні дослідження чисельним моделюванням.

- На підставі отриманих наукових результатів проведено параметричний синтез системи регулювання ДГЕУ, що дозволило дати обґрунтовані пропозиції по введенню додаткових перехресних зворотних зв'язків між каналами управління по частоті і напрузі, електричної енергії.

Результати роботи передані Державному підприємству "Завод імені Малишева", що спеціалізується в області розробки ДГЕУ.

Методика параметричного синтезу систем регулювання, а також алгоритм розв'язання рівняння Ляпунова впроваджені в навчальному процесі кафедри системного аналізу і управління Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут".

**Особистий внесок здобувача.** У роботах [1,2] здобувачем запропоновано метод інтегральної оцінки якості перехідних процесів при множині припустимих початкових відхилень, а також методика визначення параметрів системи, які забезпечують необхідне значення розміру інтегрального квадратичного критерію якості. У роботі [3] запропоновано метод розв'язання матричного рівняння Ляпунова, проведено порівняння з відомими методами його розв'язання. У роботі [4] сформульовано критерій робастної керованості для ряду окремих випадків лінійних об'єктів. Робота [5] присвячена реалізації методики лінійної множинної апроксимації стосовно до синтезу регулятора частоти і напруги ДГЕУ.

**Апробація результатів дисертаційної роботи.** Результати досліджень доповідалися і обговорювалися на Міжнародних науково-технічних конференціях "Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я" (Харків, 2000) на Міжнародній конференції по автоматичному керуванню "Автоматика - 2000" (Львів, 2000), на наукових семінарах кафедри системного аналізу і управління й автоматизованих систем управління Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут".

**Публікації.** Наукові і практичні результати опубліковані в 5 друкарських працях: 4 статті в збірниках наукових праць і 1 стаття в науковому журналі.

**Структура й обсяг роботи.** Дисертаційна робота складається з вступу, чотирьох розділів, висновків і двох додатків. Повний обсяг дисертації складає 155 сторінок. Робота містить 14 ілюстрацій по тексту, 7 ілюстрацій на 4 сторінках; 2 таблиці на 2 сторінках; 2 додатка на 11 сторінках; 106 найменувань використаних літературних джерел на 10 сторінках.

## **ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ**

У **вступі** обґрунтовується актуальність теми дисертаційної роботи, цілі і задачі дослідження, наукова новизна і практична цінність отриманих результатів.

У **першому розділі** проведено аналіз існуючих підходів до проблеми параметричної оптимізації систем автоматичного регулювання динамічними об'єктами. Огляд класичних робіт у

цьому напрямку, проведених І.А. Вишнеградським, А.М. Летовим, Р. Калманом, А.А. Красовським та іншими дослідниками показав, що регулярне рішення проблеми оптимального вибору параметрів контуру регулювання може бути отримано тільки для лінійних систем з інтегральним квадратичним критерієм якості.

Для нелінійних динамічних систем існує декілька підходів до проблеми параметричного синтезу, заснованих на заміні вихідної системи деяким її наближенням - моделлю порівняння. Модель порівняння вибирається таким чином, щоб різниця між розмірами критерію якості для вихідної системи і моделі порівняння мала постійний знак на всьому інтервалі часу її функціонування. Принцип порівняння у формі лінеаризації по своїй суті був використаний А.М. Ляпуновим при дослідженні стійкості нелінійних систем. Подальший розвиток цей принцип одержав у роботах А.А. Фельдбаума, Н.Н. Красовського, Д. Шилака, Ф. Бейлі.

Характерною особливістю сучасного підходу до проблеми конструювання регуляторів технологічних процесів є методологія робастного управління, в основу якої покладені дослідження В.Л. Харитонова, Я.З. Ципкіна, В.М. Кунцевича. Робастні системи управління припускають управління класом систем заданої структури, параметри яких належать деякій відомій множині. В основу робастного управління покладено принцип оптимізації гарантованого результату.

Викладені основні напрямки сучасної теорії управління дозволяють зробити висновок про те, що регулярні методи синтезу параметрів систем управління нелінійними системами, схильними до невизначених збурень, слід шукати на стику розглянутих підходів. У зв'язку з цим пропонується замість нелінійної системи розглядати її лінійну апроксимацію щодо множини положень рівноваги, обумовлених припустимими множинами збурень і конструктивних параметрів регулятора.

Припустимо, що об'єкт управління разом із регулятором описується системою нелінійних диференціальних рівнянь, де  $x$  - вектор стану,  $v$  - вектор збурних впливів,  $A$  - вектор конструктивних параметрів регулятора,  $f$  - диференційована вектор-функція,  $V$  і  $W$  - замкнуті підмножини припустимих значень  $v$  і  $w$ .

Лінеаризуя (1) відносно множини положень рівноваги  $x^* \in W$ , одержимо ансамбль  $\sum$  лінійних систем, де  $\Delta x$  - вектор відхилень від положення рівноваги  $x^* \in W$ ,  $A \in W$  - невідроджена для всіх припустимих значень  $w \in W$  матриця.

Кожній із систем ансамблю  $\sum$  можна поставити у відповідність ансамбль перехідних процесів, обумовлених парою  $w \in W$  і множиною припустимих початкових відхилень  $X_0$ . Введемо новий критерій  $J_{\sum} \in W$ , який характеризує ансамбль перехідних процесів на множині

$X_0$ . За  $J_\Sigma$  може бути узятий середній розмір критерію  $J$  на множині  $X_0$ , або його гарантована оцінка. Тоді задача параметричного синтезу може бути зведена до проблеми прийняття рішень в умовах невизначеності з платіжною функцією  $J_\Sigma(\mathbf{w}, \mathbf{v})$ , в якій оперуюча сторона вибирає вектор  $\mathbf{w}$ , а зовнішнє середовище оперує вектором  $\mathbf{v}$ .

У **другому розділі** розглянуті різноманітні підходи до множинної оцінки якісних показників ансамблю лінійних систем і перехідних процесів

Можливість забезпечення стійкості замкнутої системи регулювання тісно пов'язана з поняттям керованості об'єкта управління. Звичайно виникає проблема оцінки керованості ансамблю лінійних об'єктів  $\dot{x} = Ax + Bu$ , де матриці  $A$  і  $B$  належать деяким припустимим множинам  $A \in \mathbf{A}$  і  $B \in \mathbf{B}$ .

Множину динамічних систем будемо називати робастно керованою, якщо для будь-якої припустимої пари  $\mathbf{A}, \mathbf{B}$  виконується умова керованості

Безпосереднє застосування критерію не дає конструктивного розв'язання задачі про керованість множини пар матриць  $\mathbf{A}, \mathbf{B}$ .

Для випадку скалярного управління, інтервальної множини  $\mathbf{B}$  і  $A = \text{const}$  перевірка умови робастної керованості зводиться до установлення факту перетинання многогранника  $\mathbf{B}$  з яким-небудь інваріантним підпростором оператора  $A$ . У силу опуклості  $\mathbf{B}$  ця перевірка зводиться до перевірки на сталість знакової функції на множині вершин  $\mathbf{B}$  на усіх власних  $\lambda - 1$  - мірних гіперплощинах, ортогональних власним векторам оператора  $A$ . Отримано поширення запропонованого підходу на випадок векторного входу і комплексно-сполучених власних чисел.

При заміні нелінійної системи (1) множиною лінійних виду (2) при векторних входах і виходах виникає проблема у виборі критерію якості перехідних процесів еквівалентного прямим показникам для однозв'язних САР. Складність проблеми полягає в тому, що при векторному впливі еквівалентні початкові умови належать деякій підмножині простору станів, а перехідні процеси з різноманітних станів по кожному з виходів можуть якісно різнитися. За узагальнену змінну, що описує поведінку багатовимірної системи в перехідному процесі, запропоновано використовувати норму вектора стану, а в якості еквівалентних початкових умов - одиничну сферу в просторі  $R^n$  станів. Тоді узагальнений перехідний процес багатовимірної системи можна уявити у вигляді еволюції одиничної сфери на рішеннях системи (2).

Означимо  $\rho(\mathbf{x})$  - квадрат норми вектора стану  $\mathbf{x}$ , який уявляє собою додатно означену квадратичну форму  $\mathbf{x}^T Q \mathbf{x}$ . Тоді зміна норми вектора стану динамічної системи в

перехідному процесі може бути подана у вигляді, де  $R \in \mathbb{R}^{n \times n}$  - матриця квадратичної форми, що є розв'язанням матричного диференціального рівняння

Матриця  $R \in \mathbb{R}^{n \times n}$  описує еволюцію еліпсоїда на рішеннях однорідного диференціального рівняння (2). За оцінки якості ансамблю узагальнених перехідних процесів можуть бути прийняті числові характеристики матриці  $R \in \mathbb{R}^{n \times n}$ . Максимальне  $\lambda_{\max} \in \mathbb{R}$  і мінімальне  $\lambda_{\min} \in \mathbb{R}$  - власні значення  $R \in \mathbb{R}^{n \times n}$  описують межі протікання можливих перехідних процесів: мажоранту і міноранту відповідно.

Отримання оцінок виду (6) потребує на кожному кроку інтегрування рівняння (5) рішення часткової проблеми власних значень, яка для симетричних матриць має множину ефективних чисельних реалізацій.

Як ще одна узагальнена характеристика ансамблю перехідних процесів може бути прийнята ступінь зміни обсягу  $V_R \in \mathbb{R}$  еліпсоїда, утвореного кінцями фазових траєкторій розв'язань системи диференціальних рівнянь, що починаються на одиничній сфері. Неважко показати, використовуючи формулу Ліувілля і явне вираження  $R \in \mathbb{R}^{n \times n}$  через матричну експоненту.

Величина критерію визначається тільки внутрішніми властивостями системи і не залежить від обраної системи координат і матриці  $Q$  квадратичної форми  $\rho \in \mathbb{R}^{n \times n}$ . Для обчислення критерію не потрібно інтегрування матричного рівняння, що дозволяє розраховувати на перспективу його використання у задачах оптимізації якості перехідних процесів стійких динамічних систем.

У **третьому розділі** розглянуто підхід до оцінки якості ансамблю перехідних процесів на основі інтегрального квадратичного критерію. Останній можна інтерпретувати як інтеграл квадрату норми вектора стану. Величина квадратичного критерію якості  $J$  знаходиться у вигляді квадратичної форми де  $S$  - розв'язання матричного рівняння Ляпунова.

Оскільки розмір критерію залежить від початкового відхилення  $x \in \mathbb{R}^n$ , то як міру множинної оцінки якості ансамблю перехідних процесів роздивимося різноманітні скалярні характеристики матриці  $S$ .

Неважко бачити, що  $\rho_1 = \text{tr}S$  зображує середнє значення  $J$  при  $x \in \mathbb{R}^n$ , що знаходяться на поверхні одиничної сфери. Максимальне власне значення  $\rho_2 = \lambda_{\max}$  матриці  $S$  відповідає максимальному значенню критерію  $J$  при  $x \in \mathbb{R}^n$  на одиничній сфері. Визначник  $\rho_3 = |S|$  - обсяг поверхні одиничного рівня критерію  $J$ .



Таким чином, числові характеристики  $\rho_1$ ,  $\rho_2$ ,  $\rho_3$  являють собою інтегральні характеристики ансамблю узагальнених перехідних процесів і залежать тільки від конструктивних параметрів системи.

Для проведення процедури оптимізації критерію  $J$  за конструктивними параметрами необхідно на кожному кроку пошуку вирішувати рівняння Ляпунова, що є достатньо трудомісткою обчислювальною процедурою. Запропоновано ефективний рекурентний метод розв'язання рівняння (10), суть якого роздивимося стосовно до матричного рівняння загального виду, де  $A$  і  $B$  - квадратні матриці довільних розмірностей, а  $X$  і  $C$  - прямокутні матриці однакової конфігурації, узгодженої з  $A$  і  $B$ .

Скориставшись методом Лєвер'є, визначення коефіцієнтів  $\sigma_k$  полінома  $\Delta \mathcal{A}$  можна одержати матриці  $\Delta \mathcal{A}$  і  $D$ , необхідні для розв'язання рівняння (17) у вигляді рекурентної процедури.

Проведена порівняльна атестація запропонованого й інших відомих методів розв'язання матричного рівняння (15) показала його переваги по точності і швидкодії.

Розглянуто нетрадиційний підхід до задачі параметричного синтезу, який складається у виборі вектора конструктивних параметрів  $w$  лінійної динамічної системи  $\dot{x} = A \mathcal{A} \bar{x}$ , яка задовольняє заданій системі обмежень і забезпечує розмір квадратичного інтегрального критерію якості, який не перевищує наперед заданого значення. Така постановка задачі призводить до необхідності розв'язання рівняння Ляпунова (14) щодо матриці  $A$ . Показано, що множина розв'язань має вид, де  $K$  - довільна кососиметрична матриця,  $T$  - матриця перетворення  $S$  до одиничної. Розв'язання (14) разом з обмеженнями на вибір  $w$  дозволяють сформулювати задачу математичного програмування, розв'язанням якої є множина припустимих векторів конструктивних параметрів.

У **четвертому розділі** проведено параметричний синтез системи регулювання частоти і напруги автономної дизель-генераторної енергоустановки з використанням методології множинної лінійної апроксимації.

ДГЕУ як об'єкт управління являє собою динамічну систему з двома входами  $\mathcal{A}, u_v$ , двома виходами  $\mathcal{A}, u$  і двомірним збуренням  $z = \mathcal{R}, L$ , яке уявляє собою неконтрольований вектор навантаження у вигляді активного опору та індуктивності споживача.

За математичну модель ДГЕУ була обрана система рівнянь Парка - Горєва, яка описує синхронний генератор, рівняння закону Ома для навантаження і рівняння закону Ньютона для механічної підсистеми ДГЕУ.

Традиційна структура САР ДГЕУ уявляє собою два одномірних регулятори, один із яких регулює частоту шляхом зміни паливостачання, а другий підтримує задану напругу зміною збудження синхронного генератора.

Як виконавчий пристрій ВП<sub>2</sub> системи регулювання напруги збудження будемо розглядати збудник - генератор постійного струму, керований ПП - регулятором по відхиленню  $\Delta U$ .

Аналогічну структуру має математична модель приводу рейки паливного насоса, керованого електроприводом або гідравлічним сервомотором із жорстким зворотним зв'язком ВП<sub>1</sub>

Математична модель регулятора відповідає існуючій структурі управління вихідними координатами двигуна та генератора і не містить перехресних зворотних зв'язків між каналами. З огляду на перспективу застосування електронних регуляторів частоти обертання дизельного двигуна, можна роздивитися можливість підвищення якості процесу регулювання шляхом впровадження перехресних зворотних зв'язків по положенню.

Виходячи з математичної моделі ДГЕУ і вимог, запропонованих до якості електроенергії, можна сформулювати мету управління як підтримку заданих значень частоти  $\omega_0$  і напруги  $U_0$  при зміні навантаження  $R$  в заданому діапазоні  $V \in [R_{\min}, R_{\max}]$  шляхом впливу на керуючі входи  $u_v$ .

У свою чергу структура закону управління визначається співвідношеннями, а конкретна реалізація - вибором вектора постійних коефіцієнтів, який забезпечує найкращу точність підтримування параметрів електроенергії.

Точність підтримки  $\omega_0$  і  $U_0$  у перехідному процесі будемо оцінювати інтегральним квадратичним критерієм якості, де  $\Delta U$  і  $\Delta \omega$  - відхилення вихідних координат від їх номінальних значень  $[U_0, \omega_0]$ ,  $q \in [0, 1]$  - ваговий коефіцієнт, що характеризує ступінь значимості точності підтримки параметрів електроенергії для конкретного споживача.

Лінеаризуя системи щодо положення рівноваги, визначеного параметрами  $U_0$ ,  $\omega_0$ , а навантаженням  $R$ , і приєднуючи до неї лінійні диференціальні рівняння регулятора, одержимо ансамбль лінійних систем.

Інтегральну міру ансамблю перехідних процесів визначимо у вигляді  $\bar{J} = trS$ , де  $S$  - розв'язання матричного рівняння Ляпунова для матриці системи  $A \in \mathbb{R}^n, K \in \mathbb{R}^n$  і квадратичного критерію якості (22). Вибір вектора коефіцієнтів регулятора здійснювався по двох стратегіях перша з яких має сенс усереднення на множині припустимих навантажень, а друга є гарантуючою стратегією. Чисельна реалізація стратегій здійснювалася за допомогою пакета MATLAB 5. Показано перехідний процес зміни частоти електричного струму при роздільному регулюванні частоти і напруги та при впровадженні перехресних зв'язків між каналами, що свідчить про істотне

поліпшення якості підтримки частоти. Аналогічні результати мають місце для каналу регулювання напруги.

## ВИСНОВКИ

У дисертації отримано нове рішення задачі параметричного синтезу системи автоматичного регулювання багатозв'язним нелінійним технологічним об'єктом управління на прикладі автономної енергоустановки малої потужності. Рішення засноване на представленні вихідної нелінійної системи ансамблем лінійних систем, отриманих у результаті множинної лінеаризації щодо положень рівноваги, визначених припустимими множинами збурних впливів і конструктивних параметрів регулятора. Якість перехідних процесів кожної з систем ансамблю у свою чергу оцінюється множинним критерієм ансамблю перехідних процесів у просторі станів, обумовленого множиною припустимих початкових відхилень вектора стана від положення рівноваги. Запропонована методологія дозволила звести задачу параметричного синтезу до сфери теорії прийняття рішень в умовах невизначеності.

При цьому отримані такі основні наукові і практичні результати:

1. Запропоновано нові методи оцінки якості перехідних процесів, які дозволяють виключити вплив початкових умов на розмір критерію. Методи засновані на множинній оцінці ансамблю перехідних процесів, який представляє собою множину рішень однорідної системи лінійних диференціальних рівнянь, початкові умови яких знаходяться на одиничній гіперсфері.

2. Введено поняття конструктивної стійкості і робастної керованості, як поширення понять стійкості і керованості, сформульованих для певних систем, на системи з невизначеними параметрами. Отримано критерій робастної керованості для ряду окремих випадків параметричної невизначеності об'єкта управління.

3. Запропоновано ефективний рекурентний метод розв'язання матричного лінійного рівняння Ляпунова. Проведено порівняльну оцінку ефективності відомих методів його розв'язання для різноманітних особливостей спектра матриці динамічної системи.

4. Синтез параметрів ПІ- регулятора частоти і напруги автономної енергоустановки, проведений на основі множинної лінеаризації, показав працездатність запропонованого підходу до конкретних задач, висунутих практикою. Порівняльний чисельний аналіз підтвердив, що введенням перехресних зв'язків між регуляторами частоти і напруги електричного струму, можна домогтися суттєвого поліпшення якості перехідних процесів. У результаті проведеного дослідження можна зробити висновок про те, що ресурси підвищення якості електроенергії, вироблюваної автономними енергоустановками, необхідно шукати, удосконалюючи алгоритми системи регулювання.

**СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ПО ТЕМІ ДИСЕРТАЦІЇ**

1. Костенко Ю.Т. Куценко А.С. Свиридова И.А. Об одном подходе к параметрической оптимизации регулируемых систем. // Вестник Харьковского государственного политехнического университета. – Харьков: ХГПУ. - 1999. – Вып. 51. – С.14-18.
2. Куценко А.С. Свиридова И.А. Выбор параметров линейной динамической системы по квадратичному критерию качества. // Вестник Харьковского государственного политехнического университета. - Харьков: ХГПУ. - 1999. – Вып. 57.- С.3-6.
3. Куценко А.С. Игнатченко К.Е. Свиридова И.А. Параметрическая оптимизация линейных динамических систем в условиях неопределенных возмущающих воздействий. // Вестник Харьковского государственного политехнического университета. – Харьков: ХГПУ. - 2000. – Вып. 99. – С.97-101.
4. Куценко А.С. Суслов А.В. Свиридова И.А. Параметрический синтез системы регулирования автономной электроэнергетической установки. // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2001. - №2. – С. 63-69.
5. Куценко А.С. Свиридова И.А. Робастная управляемость линейных стационарных динамических систем. // Автоматика 2000: Т.1 – Львів: Державний НДІ інформаційної інфраструктури, 2000. – С. 158-161.

**АНОТАЦІЇ**

Свиридова І.О. Параметричний синтез системи регулювання автономної енергоустановки на основі множинної лінійної апроксимації. - Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.07 - автоматизація технологічних процесів. - Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Харків, 2001.

У дисертації розглянуто задачу параметричного синтезу системи регулювання частоти і напруги електроенергії, вироблюваної автономною енергоустановкою малої потужності.

Для розв'язання цієї задачі розроблено новий підхід до вибору параметрів ПІ-регулятора нелінійного об'єкту управління, заснованого на апроксимації вихідної системи ансамблем лінійних систем, отриманих в результаті лінеаризації відносно множини можливих положень рівноваг. Запропоновані критерії оцінки якості ансамблю перехідних процесів, обумовленого множиною припустимих відхилень від положення рівноваги. У результаті задача параметричного синтезу зведена до проблеми прийняття рішень в умовах невизначеності.

Ключові слова: автономна енергоустановка, регулювання частоти і напруги, перехідні процеси, множинна лінеаризація, стійкість, параметричний синтез.

Свиридова И.А. Параметрический синтез системы регулирования автономной энергоустановки на основе множественной линейной аппроксимации. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.07 – автоматизация технологических процессов. – Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт", Харьков, 2001.

В диссертации рассмотрена проблема синтеза конструктивных параметров системы регулирования частоты и напряжения электроэнергии, вырабатываемой автономными энергоустановками малой мощности.

Предложена математическая модель дизель-генераторной энергоустановки (ДГЭУ), состоящей из дизеля и синхронного генератора. Как объект управления ДГЭУ описывается системой нелинейных дифференциальных уравнений 4-го порядка, имеет две выходные координаты: частоту и напряжение электрического тока, два управления: положение органа топливоподачи и напряжение возбуждения синхронного генератора, и два возмущающих воздействия: активное сопротивление и индуктивность нагрузки.

Предложено аппроксимировать исходную нелинейную систему дифференциальных уравнений ансамблем линейных, полученных в результате ее линеаризации относительно множества допустимых положений равновесия. Множество допустимых положений равновесия в свою очередь определяется множествами допустимых возмущений и конструктивных параметров регулятора.

Качество переходных процессов каждой из систем ансамбля оценивается множественным критерием ансамбля переходных процессов, обусловленного неопределенностью начального состояния при переходе от одной линейной системы ансамбля к другой.

Предложенная методология позволила свести задачу параметрического синтеза к проблеме принятия решения в условиях неопределенности.

Предложены некоторые подходы к множественной оценке качества переходных процессов. Одним из подходов является рассмотрение обобщенного переходного процесса представляющего собой изменение квадрата нормы вектора состояния от времени. Показано, что в качестве множественной оценки обобщенных переходных процессов, начинающихся на единичной сфере, могут быть приняты скалярные характеристики симметрической матрицы решения нестационарного матричного уравнения Ляпунова.

Показано, что изменение объема эллипсоида, представляющего собой эволюцию единичной сферы на решениях системы линейных дифференциальных уравнений определяется только внутренними свойствами системы и не зависит от выбранной метрики. На основании этого, по аналогии с прямыми показателями качества для скалярного переходного процесса, предложено оценивать время регулирования по времени заданной степени уменьшения объема эллипсоида на

решениях системы дифференциальных уравнений. Показано, что время регулирования в этом случае обратно пропорционально следу матрицы системы.

Аналогичные подходы к множественной оценке ансамбля переходных процессов предложены для интегральных квадратичных критериев. Показано, что в качестве множественных оценок могут быть взяты скалярные характеристики матрицы - решения матричного уравнения Ляпунова.

Предложен рекуррентный метод решения уравнения Ляпунова, сопряженный с методом Леверье – определения коэффициентов характеристического уравнения. Предложенный метод отличается высоким быстродействием и точностью.

Предложенные подходы апробированы применительно к задаче синтеза параметров ПИ – регулятора частоты и напряжения электроэнергии, вырабатываемой ДГЭУ. В результате определены компромиссные коэффициенты усиления в каналах управления частотой и напряжением, гарантирующие высокое качество переходных процессов во всем диапазоне изменения активной нагрузки.

Показано, что введение дополнительных перекрестных связей между каналами можно существенно улучшить качественные показатели вырабатываемой электроэнергии.

Ключевые слова: автономная энергоустановка, регулирование частоты и напряжения, переходные процессы, множественная линеаризация, устойчивость, параметрический синтез.

Sviridova I.A. Autonomous energy installation adjustment system parametrical synthesis based on the multiple linear approximation.- Manuscript.

Dissertation for candidate's degree for speciality 05:13:07 – Automation of technological process. National Technical University, “Kharkov Polytechnic Institute”, Kharkov, 2001.

Dissertation examines the problem of parametrical synthesis of the frequency and voltage adjustment system that adjusts electrical current produced by the small power autonomous energy installation. A new approach of the non-linear controlled object PI-regulator parameters selection was developed to solve the problem. Approach is based on the real system approximation with a set of linear systems, obtained as a result of linearization relative to the set of possible balanced states. Criterias were suggested that estimate quality of the transient processes set conditioned by the set of admissible deviations from the balanced state. As a result, parametrical synthesis problem was reduced to the decision taking problem in condition of uncertainty.

Keywords: autonomous energy installation, frequency and voltage adjustment, transient processes, multiple linearization, stability, parametrical synthesis.