

Київський політехнічний інститут

На правах рукопису

САВЕНКОВ Олександр Іванович

УДК 681.513

**ІДЕНТИФІКАЦІЯ ТА УПРАВЛІННЯ В ЗАДАЧАХ
ВІДТВОРЕННЯ ВІБРАЦІЙНИХ РЕЖИМІВ
МЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ**

05.13.01 — управління в технічних системах

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Київ
Інститут кібернетики імені В. М. Глушкова НАН України
1994

AB 30.927

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Інституті кібернетики імені В. М. Глушкова НАН України.

Офіційні опоненти: член-кореспондент НАН України,
професор САМОЙЛЕНКО Ю. І.,
доктор технічних наук, професор
СИЛЬВЕСТРОВ А. М.,
доктор технічних наук, доцент
КРАВЕЦЬ В. В.

Провідна установа: Київський міжнародний університет
цивільної авіації.

Захист відбудеться «27» жовтня 199 4 р. о 15
годині на засіданні спеціалізованої ради Д 068.14.07 при
Київському політехнічному інституті за адресою:

2520 56 Київ 56, проспект Перемоги, 37, актовий зал головно-
го корпусу.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Київ-
ського політехнічного інституту.

Автореферат розіслано «16» вересня 199 4 р.

ЛНБ ім. В. Стефаника
АН України

Зчений секретар
спеціалізованої ради

В. Д. РОМАНЕНКО

ЛНБ України ім. В. Стефаника



00777738 (\$)

Метою роботи є розробка та дослідження матричних алгоритмів ідентифікації та управління в цифрових системах відтворення векторних випадкових вібрацій та вібраційних полів у вироджених постановах, розробка алгоритмів функціональної та параметричної ідентифікації механічних систем, призначених для діагностики та прогнозування стану складних механічних об'єктів випробувань, а також вирішення цілого ряду задач, зв'язаних з відтворенням та оцінюванням вібраційних полів.

Для досягнення поставленої мети розв'язано такі задачі:

- виконано аналіз алгоритмів функціонування автоматизованих систем управління вібровипробуваннями і математичних моделей (ММ) об'єкта, що при цьому використовуються;

- розроблено матричний регуляризований ітераційний алгоритм управління;

- розроблено методи декомпозиції нелінійної задачі функціональної ідентифікації моделі об'єкта та цифровий алгоритм ідентифікації нелінійного об'єкта випробувань;

- розроблено алгоритми ідентифікації, управління та прогнозування для системи оптимізації вібраційного стану об'єкта випробувань при вирішенні задачі управління вібраційним полем об'єкта;

- отримано алгоритми ідентифікації одного класу механічних систем (МС) з розподіленими параметрами та нелінійними пружними характеристиками;

- запропоновано підхід і методику вирішення задач мінімаксного оцінювання для систем вібровипробувань.

Автор захищає:

1. Метод визначення управління з ступінчастим регулюванням нев'язки.

2. Матричний регуляризований ітераційний алгоритм управління.

3. Метод декомпозиції вирішення задач параметричної ідентифікації масо-пружних моделей МС, модальних моделей, моделей в вигляді з великим числом степенів свободи.

4. Алгоритми управління для системи оптимізації вібраційного стану об'єкта випробувань при вирішенні задачі управління вібраційним полем.

5. Алгоритми ідентифікації пружних характеристик для класу нелінійних МС з розподіленими параметрами.

6. Методику вирішення задач мінімаксного оцінювання для систем

вібровипробувань.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність роботи. Проектування сучасних рухомих об'єктів характеризується інтенсивним збільшенням потужностей силових установок та швидкостей руху, що викликає підвищення навантажень, які діють на бортову апаратуру та елементи конструкцій. При цьому однією із основних задач є забезпечення максимальної надійності, довговічності та якості функціонування конструкцій і обладнання в умовах граничних режимів експлуатації.

Підвищення надійності та якості виробів нової техніки при експлуатації в умовах інтенсивних механічних впливів неможливо без проведення стендових вібраційних випробувань.

У порівнянні з натурними, вібраційні стендові випробування мають цілий ряд суттєвих переваг, а саме: можливість візуально спостерігати виріб під час випробувань; співставлення та відтворюваність результатів; дозволяють значно скоротити час і витрати при дослідно-конструкторських роботах, що в авіабудуванні та ракетно-космічній техніці в силу особливих вимог, які висуваються до надійності виробів, а також внаслідок експлуатаційної специфіки, набуває першочергового значення. В умовах стендових вібраційних випробувань для адекватного відтворення випадкового поля вібрацій необхідно мати достатньо велику кількість джерел віброзбурень, управління якими зустрічає значні складності. Деяким кроком на шляху вирішення цієї проблеми є відтворення віброприскорень в деяких точках конструкції, що відповідає створенню багатовимірного випадкового процесу.

Для управління багатовимірними вібропроцесами О.Є.Божко, В.В.Клюєвим, В.М.Кунцевичем, А.А.Туніком, П.М.Чеголіним та багатьма іншими вченими було розроблено теорію, створені і отримали розповсюдження на практиці аналогові, цифрові і гібридні системи управління, в основу яких було покладено векторно-матричну модель об'єкта випробувань. При відтворенні векторного випадкового процесу розмірності $n > 3$ використання векторно-матричних алгоритмів управління та ідентифікації в системах управління вібровипробуваннями зменшує швидкодію всієї системи в цілому. Використання цих же алгоритмів в системах відтворення вібраційних та акустичних полів, коли кількість керованих джерел шуму дорівнює 10 і більше, є вкрай недоцільним.

Існує широкий клас об'єктів, поведінка яких при натурних випробуваннях описується диференціальними рівняннями з частинними похідни-

ми. При цьому використання математичної моделі об'єкта як розподіленої системи дозволяє поставити ряд важливих задач оцінювання, ідентифікації параметрів за даними вібровипробувань, управління вібраційним полем за допомогою обмеженої кількості збудників коливань. Тому розробка нових, ефективних алгоритмів функціонування автоматизованих систем управління вібровипробуваннями на основі порівняно нових у практиці вібровипробувань моделей об'єктів є актуальною задачею.

Методи дослідження. Сформульовані в дисертаційній роботі наукові положення та рекомендації базуються на результатах теорії автоматичного управління, оптимізації та гарантованого оцінювання в задачах управління розподіленими системами, методів математичної фізики, ідентифікації систем, регуляризації некоректно поставлених задач.

Наукова новизна. Автором вперше одержано та викладено в дисертаційній роботі такі наукові результати:

- розроблено методи визначення управління з ступінчастим регулюванням нев'язки, розроблено матричний регуляризований ітераційний алгоритм управління з неперервним регулюванням нев'язки;

- одержано матричний регуляризований алгоритм ідентифікації оберненої матриці частотних характеристик об'єкта (МЧХО), вирішено задачі нелінійної функціональної ідентифікації моделі об'єкта, підлеглі задачам управління системами вібровипробувань;

- на основі запропонованого регулярного методу декомпозиції вирішено задачі параметричної ідентифікації масо-пружних моделей МО, модальних моделей, моделей у вигляді ІФ з великим числом степенів свободи для цілей діагностики стану об'єкту випробувань та визначення його основних динамічних характеристик;

- розроблено алгоритми управління для системи оптимізації вібраційного стану об'єкта випробувань при вирішенні задачі управління вібраційним полем в нескінченному просторі;

- вирішено задачу ідентифікації характеристик для класу нелінійних пружних механічних систем з розподіленими параметрами;

- запропоновано підхід до вирішення задач мінімаксного оцінювання для систем вібровипробувань, на основі якого розроблено ряд алгоритмів для випадку шумів вимірів негаусової природи;

- розроблено метод оцінки інтенсивності вібраційного поля збудрень за дискретними вимірами.

Практична цінність та реалізація результатів роботи. Отримані в дисертаційній роботі результати є практично цінними, оскільки вони безпосередньо зв'язані з розробкою математичного та алгоритмічного забезпечення цифрових систем управління вібровипробуваннями, створен-

ня на їх основі систем діагностики МС, що випробовуються.

Матеріали дисертації частково покладені в основу спеціальних лекційних курсів "Сучасна теорія керування" та "Математичне моделювання фізичних процесів", поставлених здобувачем в Київському політехнічному інституті.

Реалізація результатів роботи. Робота виконана у відділі дискретних систем управління Інституту кібернетики ім. В.М.Глушкова НАН України. При цьому наукові дослідження проводились в межах таких госпдоговірних тем: теми за постановою ДКНТ СРСР №500 від 21.II.75р. та за розпорядженням Президіума АН УРСР №25 від 12.01.76р., г/д IO/I7 "Розробити систему управління вібровипробуваннями автомобілів для Волзьського автомобільного заводу"; теми за завданням 02.34 програми 0.П.027, що затверджена постановою ДКНТ, Держплану і АН СРСР від 12.I2.80р., №474/250/132 "Створити і запровадити в експлуатацію автоматизовану систему акустичних, вібраційних та теплових випробувань об'єктів нової техніки в ІН АН УРСР"; теми РГЕ 305.01 "Розробити нові методи математичного моделювання, ідентифікації та адаптивного управління полями різної фізичної природи (акустичними, тепловими, вібраційними)" 1987 - 1990рр. В рамках цієї теми було розроблено і запроваджено системи: 1) Автоматизована система діагностики характеристик оптико-електронних приладів (г/д 577-86, г/д 771-88, місце запровадження м.Сосновий Бор Ленінградської обл., п/с Р- 6525); 2) Дослідний зразок системи для дослідження власних частот та форм коливань складних конструкцій (г/д 622-86); тема РГЕ 305.03 "Розробити методи аналізу та синтезу робастних систем управління" (г/д 929-89 "Розробити математичне забезпечення і апаратні засоби для систем управління механічними випробуваннями в комплексі напівнатурного моделювання", місце запровадження м.Хімки Московської обл., МКБ "Бакал").

Одержані результати були використані при безпосередній участі здобувача при створенні алгоритмічного та програмного забезпечення систем вібровипробувань.

Апробація роботи. Основні результати роботи дочувались і обговорювались на Всесоюзній конференції "Проблеми механіки залізничного транспорту" (Дніпропетровськ, травень 1980); 2-й Республіканській конференції "Автоматизація научних досліджень" (Київ, жовтень 1981); VIII Всесоюзній нараді з проблем управління (Таллін, жовтень 1980); III Всесоюзному симпозіумі "Методи ідентифікації в задачах измерительной техники и метрологии" (Новосибірськ, вересень 1982); III Всесоюзній нараді-семинарі "Проблеми теорії чутливості електронних і електромеханічних устроїв та сис-

тєм" (Кишинів, жовтень 1983); Всесоюзній науково-технічний конференції "Проблеми нелинейной электротехники" (Київ, листопад 1984); IV Всесоюзному симпозиуму "Методы теории идентификации в задачах измерительной техники и метрологии" (Новосибірськ, жовтень 1985); III Республіканській конференції "Автоматизация научных исследований" (Київ, жовтень 1986); Республіканській науково-технічній конференції "Методологические проблемы автоматизированного проектирования и исследования систем" (Севастополь, вересень 1987); Республіканській конференції "Применение вычислительной техники и математических методов в автоматизации экспериментальных исследований" (Тернопіль, жовтень 1987); Республіканській конференції "Управление в распределенных системах" (Київ, вересень 1987); Всесоюзній конференції "Проблемы механики железно-дорожного транспорта" (Дніпропетровськ, травень 1988); III-й польсько-радянській науково-технічній конференції "Комплексная автоматизация промышленности" (Вроцлав, жовтень 1988); Всесоюзній науково-технічній конференції "Вибрация и вибродиагностика. Проблемы стандартизации" (Горький, жовтень 1988); V Всесоюзному симпозиуму "Методы теории идентификации в задачах измерительной техники и метрологии" (Новосибірськ, травень 1989); IFAC Workshop "Evaluation of adaptive control strategies in industrial applications" (Тбілісі, вересень 1989); Міжнародній конференції "Systems Science" (Вроцлав, вересень 1989); IV-й міжнародній науково-технічній конференції "Проблемы комплексной автоматизации" (Київ, жовтень 1990); VII Всесоюзній конференції "Управление в механических системах" (Свердловськ, червень 1990); I-й науково-технічній конференції країн СНД "Контроль и управление в технических системах" (Вінниця, вересень 1992); II-й науково-технічній конференції країн СНД "Контроль и управление в технических системах" (Вінниця, жовтень 1993); I-й Українській конференції з автоматичного керування "Автоматика - 94" (Київ, травень 1994).

Публікації. За матеріалами проведених досліджень опубліковано 44 друковані роботи.

Структура та об'єм роботи. Дисертація складається із вступу, 7 розділів і висновків, викладених на 260 сторінках друкованого тексту, списку літератури із 183 найменувань та додатків на 30 сторінках, а також ілюструється рисунками та таблицями на 29 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі показано актуальність теми дисертації. Поставлена в

загальній формі мета роботи. Окреслене коло питань, що розглядаються в дисертації, приведена структура і короткий зміст роботи за розділами.

В першому розділі представлено короткий огляд розвитку теорії і практики вібраційних випробувань. Розглянуті основні режими роботи типової цифрової системи вібровипробувань, які мають місце також і при вирішенні задачі відтворення поля вібрацій. Розглянуто питання побудови функціональних моделей нелінійних об'єктів випробувань та їх спрощень, що застосовуються при вирішенні задачі відтворення поля вібрацій, а також моделі, що виникають при вирішенні різних практичних задач діагностики стану об'єкта вібровпливу.

Другий розділ присвячено матричним алгоритмам управління. Досліджено природу виникнення некоректності при реалізації алгоритма управління. Розроблено метод декомпозиції для визначення коректного управління і оптимальний алгоритм управління при апроксимації МЧХО виродженою матрицею. Запропонований адаптивний алгоритм управління на основі синтезованого регуляризованого ітераційного алгоритма управління.

В третьому розділі, присвяченому ідентифікації функціональних моделей тракту вібратори-виріб (ТВВ), за допомогою метода регуляризації Тихонова отримано матричний алгоритм коректної ідентифікації оберненої МЧХО. Розроблено метод декомпозиції нелінійної задачі функціональної ідентифікації моделі об'єкта по матрицях спектральних густин вхідних та вихідних процесів. Розглянуто цифровий алгоритм ідентифікації нелінійного об'єкта випробувань за допомогою описуючих функцій.

Четвертий розділ присвячено розробці методів параметричної ідентифікації МС, придатних для діагностики стану об'єктів випробувань. Запропоновано ефективні в обчислювальному відношенні способи ідентифікації, основані на декомпозиції вихідних багатовимірних задач.

В п'ятому розділі розглянуто задачу управління вібраційними полями. Розроблено алгоритми ідентифікації, управління та прогнозування для системи оптимізації вібраційного стану об'єкта випробувань при вирішенні задачі управління вібраційним полем в деякому скінченному числі точок об'єкта. Далі для одного класу розподілених динамічних систем, випробування яких є достатньо важливими для практики створення та удосконалення виробів особливого призначення, вирішена геометрична задача оптимального управління і вибору точок спостереження в системі оптимізації їх вібраційного стану. Розроблено підходи і алгоритми ідентифікації характеристик пружності для класу МС з розподіле-

ними параметрами, що розглядаються, за допомогою запропонованого в роботі модального методу ідентифікації власних форм коливань об'єкту і методу лінеаризації, а також за допомогою методу інтегральних то-тожностей при початкових значеннях, які гарантовано належать деякому еліпсоїду.

В шостому розділі розроблено підхід і методикку вирішення задач мінімаксного оцінювання для систем вібровипробувань. Запропоновано мінімаксний фільтр для оцінювання вібраційних полів в випадку шумі-негаусової природи і його чисельна реалізація. Вирішена задача оцінювання інтенсивності вібровпливів у мінімаксній постановці.

Сьомий розділ присвячено моделюванню та промисловим дослідженням алгоритмів ідентифікації і управління, запропонованим в дисертаційній роботі. При імітаційному моделюванні цифрової системи управління транспортними вібровипробуваннями основна увага приділялась режимам роботи системи при погано зумовленій МЧХО. Описана система відображення та обробки інформації, яка використовується для відтворення поля вібрацій і приведена експериментальна інформація, що підтверджує правильність прийнятих функціональних повної та спрощеної моделей. Розглянута програмно реалізована підсистема ідентифікації на прикладі визначення функціональних і параметричних моделей інфрачервоного телескопа.

ЗМІСТ РОБОТИ

МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ МЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ ЯК ОБ'ЄКТІВ УПРАВЛІННЯ І ІДЕНТИФІКАЦІЇ В СИСТЕМАХ ВІБРОВИПРОБУВАНЬ. Розглянемо типову систему управління спектром стаціонарних випадкових вібрацій на прикладі цифрової багатовимірної системи. В такій системі операції генерування випадкового процесу з заданими спектральними характеристиками, спектральний аналіз процесу на виході і управління параметрами алгоритму генерування виконуються за допомогою ЕОМ алгоритмічно.

Випадковий процес $X^T(t) = (X_1(t), \dots, X_n(t))$ (тут $(\cdot)^T$ - символ транспонування) довжиною T на вході об'єкта управління (ТВВ) з заданою матрицею спектральних густин S_{XX} отримують за допомогою алгоритму генерування випадкового процесу (АГВП). Цифроаналогові перетворювачі (ЦАП) з інтервалом дискретності Δt перетворюють реалізацію n -вимірного дискретного випадкового процесу довжиною T $X(1\Delta t), \dots, X(N\Delta t)$, де N - число вимірів, в неперервний фізичний процес, що поступає після підсилювачів потужності на входи системи із n вібраторів, навантаженої випробуванним виробом. Об'єкт управління характеризується

МЧХО W вимірності $n \times n$.

Процес на вході ТВВ збуджує механічні коливання тракту. По закінченні перехідного процесу в системі реакція об'єкта $Y^T(t) = (Y_1(t), 1=\overline{1, n})$, що є n -вимірним випадковим процесом, реєструється за допомогою системи датчиків $D = (D_1, 1=\overline{1, n})$. Далі процес $Y(t)$ поступає на входи аналогоцифрового перетворювача (АЦП), який перетворює його у цифрову форму і вводить в ЕОМ. В ЕОМ по записаній реалізації процесу $Y(i\Delta t)$, $i=\overline{1, N}$ виконується спектральний аналіз за допомогою алгоритма спектрального аналізу (АСА). В результаті обчислюється оцінка матриці спектральних густин $\hat{S}_{YY}$ на виході об'єкта управління.

Алгоритм управління служить для визначення розбіжності між матрицею спектральних густин завдання (програми) S_{YY}^p і оцінкою матриці спектральних густин $\hat{S}_{YY}$, а також для обчислювання на основі цієї розбіжності нових, зкорегованих параметрів АГВП. Ітераційний процес управління продовжується до виконання заданого в системі критерію зупинки.

При вібраційних випробуваннях необхідно управляти інтенсивністю випадкового процесу в деяких вузьких смугах частот $\Delta\omega_v$, де v - номер смуги. Для зменшення дисперсії зглажених оцінок спектрів, а також для узгодження АСА з АУ застосовують операцію усереднення оцінок в смузі частот $\Delta\omega_v$. У вібраційній практиці оцінки спектрів усереднюються в $R = M/M_v$ частотних інтервалах шириною $\Delta\omega_v = M_v \Delta\omega$ (тут R - число заданих смуг частот; $M = \omega_B / \omega_H$, ω_B - найвища частота, яка може бути виділена при проці дискретності по частоті $\Delta\omega = 2\pi/T$, $\omega_H = \Delta\omega$ - найнижча частотна складова процесу, що виділяється; M_v - число ординат оцінок, що належать до заданої v -ої смуги частот). Таким чином

$$\hat{S}_{YY}(\omega_v) = \frac{1}{M_v} \sum_{k=m_v+1}^{m_v+M_v} \tilde{S}_{YY}(k\Delta\omega), \quad (1)$$

де $m_v = \sum_{k=1}^{v-1} M_k$ - число ординат оцінок спектрів, які лежать до v -ої смуги частот; ω_v - центральна точка частотного інтервалу, що розглядається, $\tilde{S}_{YY}(k\Delta\omega)$ - спектрограма. Аналогічно (1) можна обчислити також і оцінку матриці взаємних спектральних густин $\hat{S}_{YX}(\omega_v)$.

При проведенні вібраційних випробувань система управління векторним випадковим процесом може бути використана для роботи в наступних режимах: 1) режим генерування багатовимірного періодичного стаціонарного псевдовипадкового процесу; 2) режим аналізу; 3) режим

ідентифікації; 4) режим управління; 5) режим випробувань. Перші три режими не зв'язані безпосередньо з ітераційним процесом управління і можуть застосовуватися автономно для одержання різного роду інформації як про процеси, що діють на об'єкт при його експлуатації, так і про характеристики самого об'єкта.

Використовуючи спосіб усереднення по частотах (I), здійснимо кусочно-постійну апроксимацію кожного із елементів МЧХО W . Тоді в v -ій смузі частот значення матриці $W(k\Delta\omega)$ можна представити як

$$W(k\Delta\omega) = W(\omega_v) + \Delta W(k\Delta\omega), \quad k = \overline{m_v+1, M_v+m_v}, \quad (2)$$

де $W(\omega_v)$ - деякі постійні значення МЧХО в частотному інтервалі, що розглядається; $\Delta W(k\Delta\omega)$ - похибка апроксимації.

Матриця $S_{XX}(k\Delta\omega)$ згідно розглянутих принципів побудови системи віброзипробувань постійна в v -ій смузі частот і дорівнює $S_{XX}(\omega_v)$. Тоді відомі спектральні співвідношення для лінійних систем в припущенні достатньої малості суми $\frac{1}{M_v} \sum_{k=m_v+1}^{m_v+M_v} \Delta W(k\Delta\omega)$ приймають вигляд

$$\hat{S}_{TX}(\omega_v) = W(\omega_v) S_{XX}(\omega_v), \quad (3)$$

$$\hat{S}_{TY}(\omega_v) = W(\omega_v) S_{XX}(\omega_v) W^*(\omega_v), \quad (4)$$

де (*) - символ ермітового спряження.

В залежності від мети відтворення віброрежимів в системі і складності випробувань ММ (4) може бути спрощена. Основною умовою спрощення побудови ММ об'єкта є зменшення перехресних зв'язків між вібраторами до можливо малих величин. В деяких випадках цю умову можна забезпечити відповідним вибором точок прикладання силозбудників. Якщо вібратори управляються аналоговими локальними системами управління, то за рахунок перекриття в сусідніх смугах частот формуючих і аналізуючих фільтрів структура матриці зв'язку між вхідними і вихідними процесами для різних частотних діапазонів може бути представленою блочно-стрічковими матрицями, які складаються із головної та 2-х бокових діагоналей. У випадку, якщо просочуванням енергії із сусідніх смуг частот можна знехтувати, матриця зв'язку представляється діагональними блоками.

В загальному випадку ММ включає в себе елементи з розподіленими параметрами. Але на практиці повсякчас враховують лише декілька перших форм коливань, роблячи перехід до опису руху системи в скінченно-вимірному просторі.

При вирішенні різноманітних практичних завдань вібро-випробувань та діагностики стану механічних систем по вібраційних характеристиках досліджуваний об'єкт щоразу зображується у вигляді деякої просторової системи зосереджених мас та твердих тіл, з'єднаних пружними зв'язками. Модель системи в частотній області, яку отримують при цьому, описується рівнянням

$$Q(s) = -W(s) X(s), \quad (5)$$

де

$$W(s) = (Ms^2 + Bs + C)^{-1} = [W_{11}(s)]_{\text{max}}^{-1} \quad (6)$$

неви́джена матриця дробово-раціональних ПФ

$$W(s) = \frac{b_0^{(11)} + b_1^{(11)}s + \dots + b_\mu^{(11)}s^\mu}{a_0 + a_1s + \dots + a_{\eta-1}s^{\eta-1} + s^\eta} = \frac{B_{11}(s, b^{(11)})}{A(s, a)}, \quad (7)$$

де $a = (a_0, a_1, \dots, a_{\eta-1})^T$, $b^{(11)} = (b_0^{(11)}, b_1^{(11)}, \dots, b_\mu^{(11)})^T$ - вектори коефіцієнтів ПФ, що визначаються; η , μ - цілі показники степенів поліномів чисельника та знаменника, також невідомі в загальному випадку; $Q(s)$, $X(s)$ - зображення за Лапласом n -векторів вхідних та вихідних сигналів; s - комплексна змінна.

МАТРИЧНІ АЛГОРИТМИ УПРАВЛІННЯ В СИСТЕМАХ ВІБРОВИПРОБУВАНЬ. Одним з основних питань, що виникають при синтезі систем управління вібро-випробуваннями є розробка ефективних алгоритмів управління, призначених для коригування матриць спектральних густин S_{xx} на вході об'єкта по даних спектрального аналізу матриць S_{yy} на виході.

Раніше в системах вібро-випробувань для вирішення вказаної задачі широко застосовувались різного роду векторно-матричні алгоритми управління. Їх основу була покладена лінійна векторно-матрична модель об'єкта управління

$$\tilde{Y}(\omega_p) = H(\omega_p) \tilde{X}(\omega_p), \quad (8)$$

де $\tilde{X}(\omega_p)$, $\tilde{Y}(\omega_p)$ - $n^2 \times 1$ -вектори спектральних характеристик процесів на вході і виході об'єкта відповідно; $H(\omega_p)$ - $n^2 \times n^2$ -матриця, елементи якої функціонально залежать від елементів МЧХО W . При зростанні розмірності відтворюваного процесу, коли $n \geq 4$, розробляти алгоритми управління з використанням моделі (8) недоцільно. Тому природно поставити завдання побудови матричних алгоритмів управління багатовимірними системами вібро-випробувань, оснований на моделі (4), виду

$$S_{XX}^{k+1} = S_{XX}^k + \mu_k \Delta S_{XX}^k, \quad (9)$$

$$\Delta S_{YY}^k = W \Delta S_{XX}^k W^*, \quad \Delta S_{YY}^k = S_{YY}^{\Pi} - S_{YY}^k,$$

причому коефіцієнт μ_k задовільняє умовам Дворецького згідно до принципів побудови ітеративних стохастичних алгоритмів, k - номер ітерації.

Працездатність алгоритма (9) суттєво залежить від степені обумовленості МЧХО. Так, якщо МЧХО W особлива, рівняння (4) може мати як нескінченну множину рішень, так і не мати жодного. В останньому випадку система (4) є несумісною, а задана матриця S_{YY}^{Π} - нереалізовуваною. Якщо МЧХО W погано зумовлена, то при наявності похибок ідентифікації рішення матричного рівняння (4) є чисельно нестійким і значною мірою визначається точністю завдання елементів матриці W . У вказаних випадках задача управління спектральними характеристиками випадкового процесу на вході об'єкта є некоректно поставленою і для її вирішення необхідно розробляти відповідні методи.

Питання, пов'язані з розробкою способу коректного знаходження керуючої матриці спектральних густин S_{XX} із рівняння (4) чи матриці пристосів ΔS_{XX}^k в алгоритмі (9), вирішені в роботі за допомогою методу декомпозиції, оснований на визначенні стійкої проєкції нестійкого рішення при погано зумовленій МЧХО W з використанням методів приведення матриці W до діагонального вигляду за допомогою унітарних матриць. Сенс запропонованого методу декомпозиції є у тому, що для коректного вирішення задачі управління матрицею спектральних густин векторного випадкового процесу на виході об'єкта при погано зумовленій чи виродженій матриці W виділяється стійка проєкція рішення матричного рівняння (4) на підпростір, натягнутий на власні вектори, що відповідають "великим" власним числам МЧХО W . Природно, використання тільки стійкої проєкції керуючого впливу чи нормального псевдорішення в виродженому випадку приводить до похибок при відтворюванні матриць спектральних густин S_{YY}^{Π} .

При виродженій матриці W може і не виникнути необхідність в приведенні матричного рівняння (4) до діагонального вигляду. В цьому випадку може бути дано точне рішення задачі знаходження множини псевдорішень і нормального псевдорішення для матриці спектральних густин S_{XX} .

Нехай матриця W має ранг $m < n$. При цьому початкова система (4) в загальному випадку є несумісною. Сумісна система має вигляд

$$W^* S_{YY}^{\Pi} W = W^* W S_{XX} W W^*. \quad (10)$$

За допомогою матриці неособливого перетворення L (10) приводиться до вигляду

$$S_{YY}^{\Pi L} = W_L S_{XX} W_L^*, \quad (11)$$

де

$$S_{YY}^{\Pi L} = L W^* S_{YY}^{\Pi} W L^*, \quad (12)$$

$$W_L = \left[\begin{array}{c|c} W_m & A \\ \hline 0_{n-m,m} & 0_{n-m,n-m} \end{array} \right],$$

причому W_m - невироджена верхня трикутна матриця розміру $m \times m$, A - прямокутна матриця розміру $m \times (n-m)$, $0_{n-m,m}$, $0_{n-m,n-m}$ - нульові матриці відповідних розмірів. Нехай

$$S_{YY}^{\Pi L} = \left[\begin{array}{c|c} S_{YYm}^{\Pi L} & S_{YY1} \\ \hline S_{YY1}^* & S_{YY2} \end{array} \right], \quad S_{XX} = \left[\begin{array}{c|c} S_{XXm} & S_{XX1} \\ \hline S_{XX1}^* & S_{XX2} \end{array} \right] \quad (13)$$

з розмірами, відповідно розмірам блоків матриці W_L . Тоді найпростіше рішення, яке може бути реалізованим, має вигляд

$$S_{XX1} = 0, \quad S_{XX2} = 0, \quad S_{XXm} = W_m^{-1} S_{YYm}^{\Pi L} (W_m^*)^{-1}, \quad (14)$$

що припускає ясну фізичну інтерпретацію.

Отримано алгоритм для визначення нормального рішення S_{XX}^H рівняння (4):

$$S_{XX}^H = W_p^+ S_{YY}^{\Pi p} W_p^+, \quad W_p^+ = W_p^* (W_p W_p^*)^{-1}, \quad (15)$$

де $W_p = [W_m | A]$, $S_{YY}^{\Pi p} = [S_{YYm}^{\Pi L} | 0_{n-m,m}]$. Оцінено розбіжність, що отримується при апроксимації погано зумовленої матриці W - виродженою.

Деяким недоліком алгоритмів управління, розглянутих вище, є те, що при апроксимації погано зумовленої матриці W - виродженою матрицею розбіжності, що отримуються при реалізації цілей управління, можуть досягати недопустимих меж. В тому випадку, коли об'єкт недостатньо визначений чи потребується плавне регулювання розбіжності в алгоритмі (9), задача синтезу алгоритму управління може бути вирішена за допо-

могою теорії регуляризації Тихонова.

Нехай МЧХО W задана і вироджена чи погано зумовлена. Для знаходження коректних оцінок прирошень матриці спектральних густин ΔS_{XX}^k на вході об'єкта на k -му такті управління із алгоритма (9) в відповідності з методом Тихонова складемо регуляризуючий функціонал в евклідовій метриці

$$J_{\mu}^k = \| \Delta S_{YY}^k - W \Delta S_{XX}^k W^* \|^2 + \mu \| \Delta S_{XX}^k \|^2, \quad (15)$$

де μ - параметр регуляризації (ПР). Мінімізуючи (15) по ΔS_{XX}^k , отримаємо рівняння для знаходження коректних оцінок прирошень матриці спектральних густин на вході об'єкта

$$W^* W \Delta S_{XX}^k W^* W + \mu \Delta S_{XX}^k W = W^* \Delta S_{YY}^k W. \quad (16)$$

Аналітичне рішення (16) має вигляд

$$\tilde{\Delta S}_{XX}^k = [(W^T W) \otimes (W^* W) + \mu E]^{-1} (W^T \otimes W^*) \tilde{\Delta S}_{YY}^k. \quad (17)$$

де $\tilde{\Delta S}_{XX}^k$, $\tilde{\Delta S}_{YY}^k$ - вектори, складені із стовпчиків матриць ΔS_{XX}^k , ΔS_{YY}^k відповідно порядку їх послідовності; $\otimes$ - символ кронекерового множення матриць.

"одолюком рішення (17) є збільшення розмірності матриці, яку необхідно обернути, до $n^2 m^2$. Крім того, треба відзначити значні труднощі, які виникають за рахунок необхідності вибору параметра регуляризації μ .

Альтернативов розглянутому підходу є можливість синтезу алгоритму управління з використанням регуляризованої оберненої МЧХО $W_{O\alpha}$, алгоритм отримання якої розглянемо нижче. Тому при виродженій чи погано зумовленій МЧХО є важливою наступна

Т е о р е м а. Нормальне рішення S_{XX}^H системи (4) при $\det(W) = 0$ можна знайти як

$$S_{XX}^H = W_{OH} S_{YY}^{\Pi} W_{OH}^*, \quad (18)$$

де W_{OH} - нормальне рішення системи (20) при $\det(S_{XX}) = 0$, $\det(S_{XX}) \neq 0$.

Враховуючи (18) і (23), можна знаходити коректне управління на кожному кроці алгоритму (9), вираховуючи прирошення ΔS_{XX}^k за формулою

$$S_{XX}^{k+1} = S_{XX}^k + \mu_{\alpha} W_{O\alpha} (S_{YY}^{\Pi} - S_{YY}^k) W_{O\alpha}^*. \quad (19)$$

В роботі досліджено збіжність матричного регуляризованого алгоритму управління (19), а також отримано правил зупинки цього ітера-

і його процесу.

Розглянуто алгоритми розміщення полюсів і стабілізації стаціонарних лінійних дискретних систем управління, описаних в матричному вигляді, тобто коли стан системи описується не вектором, а матрицею фазових змінних. Використання модального підходу при вирішенні цих задач припускає достатньо певне знання характеристик системи. Оскільки при проведенні вібровипробувань характеристики об'єкта відомі дуже приблизно, на практиці для отримання стабілізуючого управління потрібно використовувати підхід, зв'язаний з проведенням одноразової - на початку чи багаторазової - на протязі всього часу виходу на заданий режим процедури ідентифікації, реалізуючи адаптивний спосіб управління.

ІДЕНТИФІКАЦІЯ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ МОДЕЛЕЙ ДИНАМІЧНИХ СИСТЕМ. На сьогодні для ідентифікації об'єктів вібровипробувань в основному використовуються активні методи. Це викликано тим, що від процедури ідентифікації вимагається висока точність і невеликий час проведення. Крім того, задача ідентифікації функціональної моделі ТВВ є підлеглою щодо задачі управління. При цьому важливою є задача визначення оберненої МЧО, що використовується в алгоритмі (19). Як витікає із виразу (3), рівняння для знаходження оберненої МЧО W_0 має вигляд

$$W_0 S_{YX} = S_{XX}. \quad (20)$$

Із рівнянь (20) і (3) при $\det \{S_{XX}\} \neq 0$, $\det \{S_{YX}\} \neq 0$ можна отримати:

$$W_0 = S_{XX} S_{YX}^{-1} = W^{-1}, \quad (21)$$

$$W = S_{YX} S_{XX}^{-1}. \quad (22)$$

Основними труднощами, що виникають при знаходженні W^{-1} і W за виразами (21), (22), може бути погана зумовленість чи виродженість в деяких смугах частот як матриці S_{YX} , так і матриці S_{XX} . При цьому треба відмітити, що рівняння (21) має зміст тільки для системи з невивірженою МЧО W . Якщо ж матриця S_{XX} невивіржена, а матриця S_{YX} не має оберненої, то система рівнянь (21) є несумісною і класично не має рішення. В цьому випадку треба поставити задачу про знаходження нормального рішення рівняння (21).

В роботі вирішується задача побудови матричного регуляризованого алгоритму ідентифікації оберненої МЧО, що використовується далі в

алгоритмі управління (19). Регуляризоване рішення (20) має вигляд

$$W_{\alpha} = S_{XX} S_{YX}^* (S_{YX} S_{YX}^* + \alpha E)^{-1}, \quad (23)$$

де α - ПР.

Вибором в деякому розумінні оптимального ПР можна добитися того, що невеликі похибки, що виникають при генеруванні та аналізі матриць власних і взаємних спектральних густин, слабо впливатимуть на похибки визначення оберненої регуляризованої МЧХО W_{α} .

Для отримання стійкого рішення задачі ідентифікації МЧХО W можлива некоректність усувається порівняно просто. З цією метою достатньо сформулювати на вході об'єкта процес з добре зумовленою матрицею S_{XX} . В цьому випадку матриця W знаходиться безпосередньо за формулою (22). Задача ідентифікації МЧХО значною мірою спрощується, якщо процес, що формується на вході об'єкта - білий шум з некорельованими складовими на різних входах. В цьому випадку $W = S_{YX}$. При погано зумовленій матриці S_{XX} регуляризоване рішення (3) має відомий вигляд

$$W_{\alpha} = S_{YX} S_{XX} (S_{XX} S_{XX} + \alpha E)^{-1}. \quad (24)$$

Має місце наступне, важливе при моделюванні та при стендових випробуваннях МС в умовах, подібних до умов нормальної експлуатації

Т в е р д ж е н н я. При виродженій матриці S_{XX} наряду з (4) має місце рівність

$$S_{YY} = W_H S_{XX} W_H^*, \quad (25)$$

де W_H - нормальне рішення рівняння (3).

Припускаючи, що наближено виконується співвідношення $W_H \sim W_{\alpha}$, вираз (25) набуває вигляду

$$S_{YY} \sim W_{\alpha} S_{XX} W_{\alpha}^*.$$

Пристосованість метода регуляризації при ідентифікації оберненої МЧХО в системах вібровипробувань значною мірою залежить від вибору в деякому розумінні оптимального значення ПР α . Отримана оцінка ПР α_0 зверху для алгоритма (23) узагальнюванням відомого результату на матричний випадок:

$$\alpha_0 \leq n \| \hat{S}_{YX} \|^2 \varepsilon / (\| \hat{S}_{XX} \| - \varepsilon), \quad (26)$$

де

$$\varepsilon = \| W_{\alpha} \hat{S}_{YX} - \hat{S}_{XX} \| - \quad (27)$$

розбіжність, яка апіорі задається, що визначається через відносну

похибку експериментальних даних. Подальше уточнення $PR \alpha$ зв'язано з наближенням в. рішенням нелінійного рівняння (27) при обмеженні $0 < \alpha \leq \alpha_0$. Наведено оцінки точності вирішення задачі ідентифікації з використанням і без використання метода регуляризації.

Відзначимо одну особливість алгоритму управління (9) чи рівняння (4). Матриці W в (4) і (9) можуть бути заданими з точністю до скалярного множника $\exp(j\phi)$, тобто $W_\phi = W \exp(j\phi)$, де ϕ - довільне дійсне число. Останнє дозволило запропонувати метод декомпозиції вихідної нелінійної задачі ідентифікації матриці W_ϕ безпосередньо з рівняння (4), придатне для рішення задачі ітераційного управління.

При проведенні вібровипробувань важливо забезпечити вібросійкість виробу - відсутність характерних для самозбудження зростаючих за амплітудою коливань. Реально більшість випробовуваних об'єктів нелінійні, тому для дослідження їх стійкості треба використовувати метод гармонічного балансу, досліджуючи вплив високих гармонік на вібросійкість. Використання описувачих функцій дозволяє оцінити розподіл енергії спектра вібрацій по каналах реєстрації даних на частотах, кратних основній частоті збудження МС. Для побудови нелінійної моделі ТВВ по вхідному і вихідному сигналах запропоновано цифровий спосіб побудови описувачих функцій, оснований на використанні алгоритма швидкого перетворення Фур'є.

МЕТОДИ ДЕКОМПОЗИЦІЇ ПРИ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ПАРАМЕТРИЧНИХ МОДЕЛЕЙ МЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ ПО ЧАСТОТНИХ ХАРАКТЕРИСТИКАХ. Достатньо часто вібраційні випробування виконують з метою ідентифікації параметрів досліджуваних МС для діагностики їх стану і перевірки працездатності. Експериментальні частотні характеристики (ЧХ) - один із найрозповсюдженіших виглядів первісної інформації для вирішення задач ідентифікації МС. Задачу ідентифікації МС в даному випадку є визначення всіх чи тільки деякої частини елементів матриць M , B , C (6) чи коефіцієнтів поліномів $A(s, a)$, $B_{11}(s, b^{(11)})$ моделі (7) по експериментальним даних. Як експериментальні дані при цьому може використовуватися матриця чи вектор CH по одному із входів системи:

$$\hat{W}^1(j\omega_r) = [\hat{W}_1^1(j\omega_r), \dots, 0, \dots, 0, \dots, \hat{W}_N^1(j\omega_r)]^T, \quad r = \overline{1, N} \quad (28)$$

вектор експериментальних ЧХ по 1-му входу системи, отриманий в точках $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_N$, нулі в якому означають невимірювані компоненти. Тут

$$W^1(j\omega_r) = \hat{W}^1(j\omega_r) + \Delta W^1(j\omega_r), \quad r = \overline{1, N}, \quad (29)$$

де $\hat{W}^1(j\omega_x)$ - точний вектор; $\Delta W^1(j\omega_x) = \xi^1(\omega_x) + j\eta^1(\omega_x)$ - комплексний вектор похибок вимірів; $\xi^1(\omega_x)$, $\eta^1(\omega_x)$ - вектори, елементи яких є центровані випадкові послідовності з відомими дисперсіями σ_ξ^2 , σ_η^2 , некорельовані між собою та корисними сигналами. Треба визначити вектор невідомих параметрів $\alpha = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m)^T$ сист. ми (6) чи (7) за експериментальними даними (28).

Подібні задачі відомі давно. В їх рішення суттєвий внесок зробили В.А.Лазарян, В.Ф.Ушкалов, С.Ф.Редько, В.П.Яковлев і багато інших вчених. На відміну від відомих робіт, в реферованій роботі з одної методологічної позиції, основуючись на методі декомпозиції, запропоновано ефективні алгоритми для вирішення задач ідентифікації великої розмірності, що виникають в практиці вісровипробувань.

Розглянемо метод параметричної ідентифікації з використанням комплексних матриць чутливості. Алгоритм оцінки коефіцієнтів α по критерію мінімуму середньозваженої квадратичної похибки оцінювання (СКО) має вигляд ітераційної процедури типу Ньютона. Розрахунки виконуються за наступною схемою:

$$\alpha^{k+1} = \alpha^k + \mu_k \Delta \alpha^k, \quad (30)$$

де k - номер ітерації; $\Delta \alpha^k$ - вектор приростів компонент оцінюваних коефіцієнтів; μ_k - скалярний множник, що визначає величину кроку на кожній ітерації. При цьому початкове наближення вектора коефіцієнтів α^0 , що визначаються, припускається заданим. Вектор приростів $\Delta \alpha^k$ визначається із вирішення системи лінійних алгебраїчних рівнянь

$$r^k \Delta \alpha^k = G^k, \quad (31)$$

де

$$\left\{ \begin{aligned} G^k &= \frac{1}{N} \sum_{r=1}^N \operatorname{Re}\{[H^k(j\omega_r)]^* \Omega (\hat{W}^1(j\omega_r, \alpha) - W_M^{1,k}(j\omega_r, \alpha^k))\}, \\ r^k &= \frac{1}{N} \sum_{r=1}^N \operatorname{Re}\{[H^k(j\omega_r)]^* \Omega H^k(j\omega_r)\}, \end{aligned} \right.$$

$W_M^{1,k}(j\omega_r, \alpha^k)$ - вихід ММ на k -й ітерації, що має структуру (6); Ω - вагова матриця; $H^k(j\omega_r)$ - комплексна матриця функцій чутливості виходу моделі по оцінюваних коефіцієнтах; $\operatorname{Re}(\dots)$ - операція виділення дійсної частини комплексного числа. Показана обчислювальна ефективність цього алгоритму порівняно з відомим. Приведені критерії

зупинки ітераційної процедури.

Однією із основних проблем, що виникають при ідентифікації багатомірних МС, є проблема зниження розмірності вектора невідомих параметрів. Для вирішення цієї задачі дуже корисним є метод дослідження складних систем за частинами.

Розглянемо ММ об'єкта (6). Для зниження розмірності вектора α , а також для наступного зменшення кількості обчислювань, зробимо декомпозицію системи (6) шляхом виділення в ній деякої підсистеми M^{11} , B^{11} , C^{11} з розміром матриць $l \times l$:

$$\left\{ -\omega^2 \left[\begin{array}{c|c|c} M^{kn} & & \\ \hline M^{lk} & M^{11} & M^{lm} \\ \hline & M^{mn} & \end{array} \right] + j\omega \left[\begin{array}{c|c|c} B^{kn} & & \\ \hline B^{lk} & B^{11} & B^{lm} \\ \hline & B^{mn} & \end{array} \right] + \left[\begin{array}{c|c|c} C^{kn} & & \\ \hline C^{lk} & C^{11} & C^{lm} \\ \hline & C^{mn} & \end{array} \right] \right\} W^r(j\omega) = E^r, \quad (32)$$

де індекси kn, lk, lm, mn у визначеннях матриць M, B, C вказують відповідно на число рядків і стовпчиків у виділених блоках матриць;

$$W^r(j\omega) = [(W^{kr}(j\omega))^T \mid (W^{lr}(j\omega))^T \mid (W^{mr}(j\omega))^T \mid 1]^T - \quad (33)$$

вектор, а індекси k, l, m в позначеннях його складових вказують на їх розмір, причому $k + l + m = n$; E^r - r -й стовпчик одиничної матриці. В цьому разі підсистема може бути описана як

$$(-\omega^2 M^{11} + j\omega B^{11} + C^{11}) W^{lr}(j\omega) = E^{lr} - D(j\omega, \alpha) W^{kmr}(j\omega), \quad (34)$$

де

$$D(j\omega, \alpha) = -\omega^2 (M^{lk} \mid M^{lm}) + j\omega (B^{lk} \mid B^{lm}) + (C^{lk} \mid C^{lm});$$

$$W^{kmr}(j\omega) = [(W^{kr}(j\omega))^T \mid (W^{mr}(j\omega))^T \mid 1]^T -$$

вектор ЧХ, складений із частин вектора (33).

Розглядаючи рівняння (34) як ММ вихідної системи та використовуючи критерій СКО і метод з використанням комплексних функцій чутливості, отримаємо алгоритм ідентифікації типу (30), (31). Відзначимо,

що коли деякі елементи ЧХ (28) недосяжні для вимірів, виділенням (33) можна інколи виключити їх із ММ (31).

При побудові ММ МС дією із найважливіших задач з визначення її структури. На початковій стадії визначення системи звичайно шукають модель у вигляді ПФ 1 з її допомогою оцінюють основні динамічні параметри. Вазуючись на відомих методах оцінки коефіцієнтів ПФ, зроблено достатньо ефективний, стійкий до збурень кореневий спосіб визначення порядків поліномів в чисельнику і знаменнику ПФ (7).

Реальні МС мають основні резонансні частоти, розподілені в обмеженій смузі частот. Вратування цієї властивості дозволяє частотну смугу, що розглядається, розбити на m підсмуг

$$\begin{array}{ccc} \omega_1, \dots, \omega_{N_1}, & \omega_{N_1+1}, \dots, \omega_{N_2}, & \omega_{N_2+1}, \dots, \omega_{N_m}, \\ \text{I-а підсмуга} & \text{2-а підсмуга} & \text{m-а підсмуга} \end{array}$$

а ПФ (1.62) МС представити у вигляді

$$W(j\omega, \alpha) = \sum_{v=1}^m W^{(v)}(j\omega, \alpha^{(v)}), \quad (35)$$

де (v) - індекс належності підсмузі. Тоді функціонал, що мінімізується, має вигляд

$$I(\alpha) = \frac{1}{N} \sum_{v=1}^N \left| \hat{W}(1\omega_v) - \sum_{v=1}^m W^{(v)}(1\omega_v, \alpha^{(v)}) \right|^2. \quad (36)$$

Загальна ідея скорочення розмірності задачі оцінювання коефіцієнтів при мінімізації функціоналу (36) полягає в наступному. Припустимо, що відома деяка початкова оцінка вектора параметрів α^0 . Зафіксуємо всі складові вектора α в заданому початковому наближенні, крім складової, що характеризує ММ k -ї частотної підсмути і виконаємо безумовну оптимізацію (36) по розглянутих компонентах вектора α . Після цього виконаємо наступну корекцію початкових даних:

$$\hat{W}^{(k)}(1\omega_v) = \hat{W}(1\omega_v) - \sum_{\substack{v=1 \\ v \neq k}}^m W^{(v)}(1\omega_v, \alpha^{(v)}). \quad (37)$$

Відзначимо, що для скорочення кількості обчислень уточнення вектора $\alpha^{(k)}$ може виконуватись по даних тільки k -ї частотної підсмути, враховуючи вплив ЧХ ММ від інших підсмуг в відповідності з формулою (37), а функціонал, що мінімізується у цьому випадку, має вигляд

$$I(\alpha^{(k)}) = \frac{1}{N} \sum_{v=N+1}^N \left| \hat{W}^{(k)}(1\omega_v) - W^{(k)}(1\omega_v, \alpha^{(k)}) \right|^2. \quad (38)$$

Для мінімізації функціоналу (36) чи (38) ефективної і просто застосовується процедура (30), (31) з використанням комплексних функцій чутливості, оскільки розмірність вектора $\alpha^{(k)}$ може бути вибрана досить невеликою. Проблема вибору порядків для $W^{(v)}$ також проста.

Інтраційне уточнення порядків та коефіцієнтів ПФ по окремих підсмугах і в цілому по всій смузі частот продовжується до тих пір, поки не отримаємо задовільну точність апроксимації експериментальних даних за всіма складовими вектора CH (28).

При автоматизації процесів вібровипробувань різних виробів, а також для вирішення задач ідентифікації, діагностики і оптимізації їх динамічного стану широке використання знаходить модальний підхід при побудові ММ МС за експериментальними даними, оснований на використанні власних форм коливань і переході від системи n зв'язаних рівнянь до системи з n розділеними рівняннями. Задача модальної ідентифікації може бути ефективно вирішена, як показано в роботі, з використанням розглянутого вище методу ідентифікації ММ МС у вигляді (35). При визначенні матриці власних форм декомпозиція задачі зводиться до пострічкового визначення її елементів.

МЕТОДИ УПРАВЛІННЯ, ІДЕНТИФІКАЦІЇ ТА ОЦІНЮВАННЯ ПРИ ВІДТВОРЮВАННІ ВІБРАЦІЙНИХ ПОЛІВ. Розглянемо клас багатовимірних систем вібровипробувань, характерною особливістю якого є наявність декількох вібраторів l і багатьох датчиків віброприскорень N , які вимірюють стан об'єкта, причому $N \gg l$ (рис. 1). На рис. 1 $\Phi U_1, \Phi U_2, \dots, \Phi U_l$ - формуючі пристрої; $B_1, B_2, \dots, B_l$ - вібратори; $D_1, D_2, \dots, D_N$ - датчики віброприскорень; $AC_1, AC_2, \dots, AC_N$ - аналізатори спектрів; ЛСУ - локальна система управління. Припускається, що спектральні характеристики, які задані програмою випробувань, стабілізуються автономно ЛСУ на столі кожного вібратора. Під об'єктом розуміють сукупність пристроїв, враховуючи вібратори з випробуванням виробом, що перетворюють сигнал X в процеси $Y^{(i)}$, $i = \overline{1, N}$. Тут $X = (X_1, X_2, \dots, X_{1_{\text{зм}}})^T$ - вектор керуючих впливів, які поступають від ЕОМ через ЦАП на завданні фільтри формуючих пристроїв; $Y^{(i)} = (Y_1^{(i)}, Y_2^{(i)}, \dots, Y_n^{(i)})^T$ - вектор дисперсій, отриманий на виході аналізатора спектра AC , на який діє сигнал з i -го датчика віброприскорень, $i = \overline{1, N}$; n - розмірність вектора керуючих впливів для одного вібратора. ЕОМ в подібних системах призначена для мінімізації наступного критерія:

$$I = \sum_{i=1}^N w_i \|Y^{(i)} - Y^{(i)}(X)\|^2. \quad (39)$$

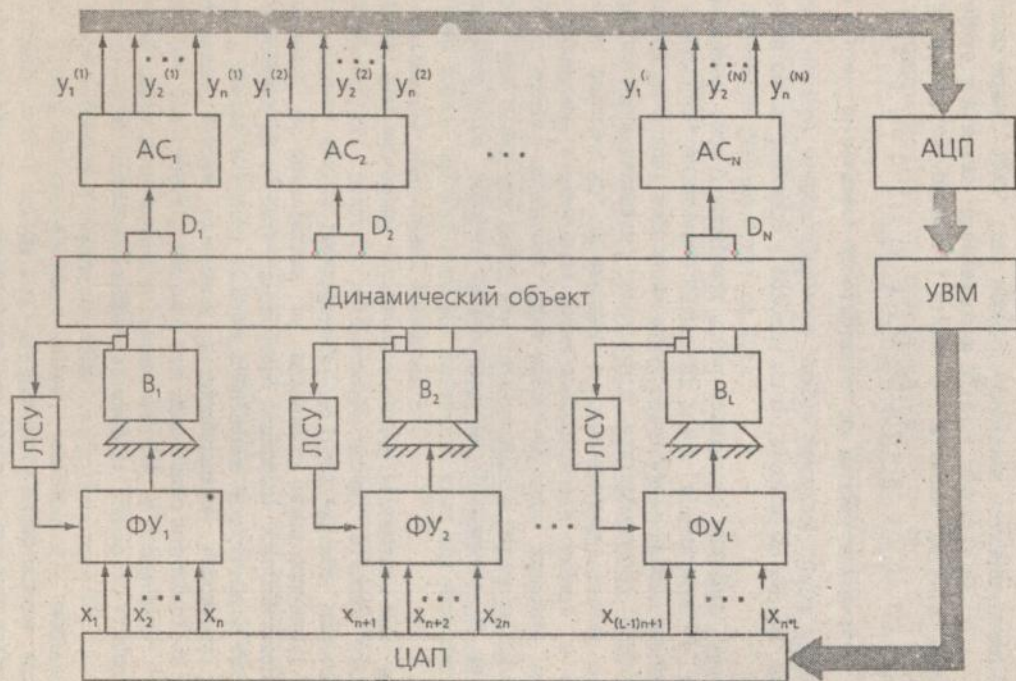


Рис. 1.

де $y^{(1)}$ - програмні завдання; w_i - вагові коефіцієнти. Для мінімізації (39) необхідно мати залежність $y^{(1)}(X)$ або, принаймні, ММ нелінійного об'єкта у вигляді послідовності матриць чутливості, які можуть бути отримані лише експериментально, що потребує значних витрат. Тому для вирішення задачі управління використана модифікована процедура Ньютона, в якій використовуються матриці чутливості, знайдені один раз в околиці робочого режиму системи.

В загальному випадку матриці чутливості повинні ґрунтуватися на мінімальне число експериментів, необхідне для їх визначення, складає $l \cdot n$, що може бути занадто великим для обмеженого віборесурсу виробу. Тому практично цікаве отримання і використання спрощених моделей об'єкта. В роботі вирішені питання планування експеримента для отримання спрощених ММ об'єкта. Розроблено генератор ортогонального плану експериментів, що ґрунтується на процедурі ортогоналізації Грाम-Шмідта. Вирішена задача ідентифікації ММ ТВВ у вигляді послідовності матриць чутливості. Показано використання деяких відомих алгоритмів оптимізації для вирішення поставленої задачі управління при обмеженнях на потужність виконавчих елементів.

Існує досить широкий клас МС, поведінка яких при натурних випробуваннях може бути описана диференціальними рівняннями в частинних похідних. При цьому сам виріб замінюється деякою балкою в загальному випадку з змінною пружністю. Така модель об'єкта дозволяє вирішити задачу управління вібраційним полем випробуваного виробу в цілому. Врахування динаміки МС, як системи з нескінченним числом степенів свободи, дозволяє виконати оптимізацію відтвореного вібраційного поля виробу на основі вирішення задач оптимізації числа використовуваних вібраторів, визначення найкращих точок прикладання і законів силозбудження, вибору найкращих точок розміщення датчиків для виконання процедури ідентифікації об'єкта.

Нехай балка довжиною l розбита на n ділянок за числом використовуваних в системі вібров.пробувань джерел коливань. Точки прикладання джерел $x_i, i=1, \dots, n$ належать до відрізків, що не перетинаються:

$$x_i \in [x_i, \bar{x}_i] \subset [0, l]; [x_i, \bar{x}_i] \cap [x_j, \bar{x}_j] = \emptyset, i \neq j, i, j = 1, \dots, n,$$

де $x_i, \bar{x}_i$ відповідно початок і кінець i -ї ділянки, на якій прикладено i -е джерело з відомою інтенсивністю $Q_i(t) \in L_2(0, T)$, де T - деякий фіксований момент часу. Тоді процес поперечних коливань балки з вільними кінцями описується рівнянням

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = - \frac{\partial^2}{\partial x^2} [JE(x) \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}] + \sum_{i=1}^n Q_i(t) \delta(x-x_i) \quad (40)$$

з граничними умовами

$$u_{xx}(0,t) = u_{xx}(l,t) = 0, \quad (41)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} [JE(x) u_{xx}(0,t)] = \frac{\partial}{\partial x} [JE(x) u_{xx}(l,t)] = 0,$$

де $\delta(\cdot)$ - функція Дірака, $JE(x)$ - характеристика пружності балки. Задані нульові початкові умови

$$u(x,0) = u_t(x,0) = 0. \quad (42)$$

Якщо $JE(x)$ - кусочно-неперервна функція, то задача (40) - (42) має єдине рішення $u(x,t)$. На її рішеннях визначимо спостереження

$$y'(x,t) = Ay(\cdot,t), \quad (43)$$

де A - оператор, діючий на рішеннях задачі $u(x,t)$ у простір спостережень H .

Нехай $y^*(\cdot)$ - задані величини, які спостерігаються, а величина $JE(x)$ - визначена. Необхідно знайти $\{x_i, i=\overline{1,n}\}$, що мінімізує середню квадратичну розбіжність між $y(\cdot)$ і $y^*(\cdot)$:

$$I = ||y - y^*||_H^2 \Rightarrow \inf \quad (44)$$

при відомій інтенсивності джерел силоскоуджень $Q_i(t)$.

В найприродніших окремих випадках оператор A зображує характер точкового чи інтегрального спостережень:

$$a) \quad A = \text{diag} \left\{ \int_0^1 \delta(x - x_j) (\cdot) dx \right\} - \text{точкове спостереження};$$

$$б) \quad A = \text{diag} \left\{ \int_0^1 a_j(x,t) (\cdot) dt \right\} - \text{інтегральне спостереження},$$

де $a_j(x,t)$ - деяка функція, що характеризує датчик; $j=\overline{1,m}$, m - число датчиків, які використовуються для спостережень.

Нехай в системі реалізовано точковий оператор спостережень. Тоді простір спостережень H і функціонал (44) приймають відповідно вигляд:

$$H = \underbrace{L_2(0,T) \times L_2(0,T) \times \dots \times L_2(0,T)}_{m \text{ разів}},$$

$$I = \sum_{j=1}^m \int_0^T (y_j(t) - y_j^*(t))^2 dt. \quad (45)$$

Необхідно знайти точ.і прикладання джерел $x_1 \in [\underline{x}_1, \bar{x}_1]$, $i = 1, n$ такі, щоб критерій (45) приймав мінімальне значення.

Задача мінімізації (45) є задачею оптимального управління. Для вирішення цієї задачі складаємо функціонал Лагранжа

$$L = I + \int_0^T \int_0^1 F(x, t) (u_{tt} - (EJ(x) u_{xx} - \sum_{i=1}^n Q_i(t) \delta(x - x_i))) dx dt, \quad (46)$$

де F - рішення спряженої крайової задачі виду

$$\frac{\partial^2 F}{\partial t^2} = \frac{\partial^2}{\partial x^2} [JE(x) \frac{\partial^2 F}{\partial x^2}] - 2 \sum_{j=1}^m (u(x_j, t) - y_j^*(t)) \delta(x - x_j); \quad (47)$$

$$F_{xx}(0, t) = F_{xx}(1, t) = 0; \quad F(x, T) = F_t(x, T) = 0; \quad (48)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} [JE(x) F_{xx}(0, t)] = \frac{\partial}{\partial x} [JE(x) F_{xx}(1, t)] = 0. \quad (49)$$

Вирішуючи крайову задачу (47) - (49), визначено варіацію функціонала (46), за допомогою якої отримано алгоритм оптимального розміщення точок прикладання джерел коливань.

Розглянута задача вибору найкращих точок спостережень. Для цього в задачі оптимального управління (40)-(42), (45) як параметри управління приймалися координати розміщення x_j датчиків по довжині балки. Відзначимо, що тут перша варіація функціонала (45) знаходиться без залучення спряженої крайової задачі. Запропоновано алгоритм оптимального розміщення датчиків.

Розглянемо задачу відновлення залежності $JE(x)$ в (40) за експериментальними даними. Відзначимо, що на сьогодні не існує аналітичних методів вирішення рівняння (40) при довільній величині $JE(x)$. Розділимо балку з M ділянок, які не перетинаються. Покладемо, що на цих ділянках характеристика пружності постійна 1, крім того, відомі оцінки

$$JE(x_1)_{\min} \leq JE(x_1) \leq JE(x_1)_{\max}, \quad i = \overline{1, M-1}. \quad (50)$$

Розглянемо алгоритм ідентифікації, оснований на інформації про власні числа і відповідні їм власні функції. Ці дані можуть бути отримані по експериментальних характеристиках за допомогою модального методу ідентифікації, що міститься в роботі. Запишемо рівняння ана-

логи похідних, що входять в ідентифіковану ММ. Введемо нев'язку по рівняннях для власних функцій, які породжуються відповідною спектральною задачею і отримаємо задачу квадратичного програмування з простими обмеженнями. Для її вирішення ефективно може бути використано метод лінеаризації, для якого є характерним автоматизм вибору кроку в напрямі спуску. Для розглянутої задачі ідентифікації розроблено алгоритм її вирішення.

Задача ідентифікації пружних характеристик об'єкта (40), (41; значно ускладнюється, якщо початкові умови ненульові і гарантовано належать деякій обмеженій множині S , що розглядається в роботі в двох варіантах:

$$S = \{ (\varphi_0, \varphi_1) : \|\varphi_0\|_{H_2^1(0,1)}^2 + \|\varphi_1\|_{L_2(0,T)}^2 \}^{1/2} \leq \nu, \quad (51)$$

$$S = \{ (\varphi_0, \varphi_1) : \alpha_1 \leq \varphi_0(x) \leq \beta_1, \alpha_2 \leq \varphi_1(x) \leq \beta_2 \}, \quad (52)$$

де $\nu, \alpha_1, \beta_1, \alpha_2, \beta_2$ - фіксовані числа; $u(x(0)) = \varphi_0(x)$, $u_t(x(0)) = \varphi_1(x)$, $\varphi_0(x) \in H_2^1(0,1)$, $\varphi_1(x) \in L_2(0,T)$.

В точках x_j , $j = \overline{1, n}$ задані функції $v_j(t)$, які характеризують вимірювані величини. Вимагається знайти $EJ(x)$ при умові, що

$$\alpha(x) \leq EJ(x) \leq \beta(x),$$

де $\alpha(x)$, $\beta(x)$ - задані функції. При цьому критерій ідентифікації має вигляд

$$J = \inf_{EJ} \sup_S \sum_{j=1}^n \|u(x_j, t) - v_j(t)\|^2. \quad (53)$$

В силу фізичних міркувань множина функцій $EJ(x)$ не є довільною. В роботі розглянуто два класи функцій: кусочно-сталі функції і кусочно-неперервні функції. Поставлену задачу ідентифікації вирішено за допомогою методу інтегральних тотожностей. Наведено чисельний алгоритм рішення.

При отриманні натурних даних про вібрації об'єкту чи при стендових випробуваннях в системі вимірювань спостерігаються шуми, природа яких далеко не завжди є гаусовою, що тягне за собою труднощі при використанні фільтрів типу Калмана-Бьюсі для оцінювання стану системи. Вказана складність може бути подолана, якщо для синтезу фільтру використовується мінімаксий підхід.

Розглянута задача про мінімакське оцінювання вібраційних полів при випробуваннях класу об'єктів, поведінка яких при цьому досить

добре апроксимує моделі поперечних коливань деякої балки в загальному випадку зі змінною характеристикою пружності (40), (41), (51). Покладаючи, що в системі вібровипробувань є m вимірних каналів, на рішеннях (40), (41), (51) визначимо спостереження

$$y_k(t) = u(x_k, t) + \varepsilon_k(t), \quad k = \overline{1, m}. \quad (54)$$

Припустимо, що про функції $\varphi_0, \varphi_1, Q_1, 1 = \overline{1, n}; \varepsilon_k, k = \overline{1, m}$ відомо лише, що

$$\int_0^1 (C_0 \varphi_0^2(x) + C_1 \varphi_1^2(x)) dx + \int_0^T \left(\sum_{i=1}^n \alpha_i Q_i^2(t) + \sum_{k=1}^m \beta_k \varepsilon_k^2(t) \right) dt \leq v^2, \quad (55)$$

де $C_0, C_1, \alpha_i, \beta_k, k = \overline{1, m}, v$ - невід'ємні константи.

По спостереженнях за вектором $Y = (y_1, \dots, y_m)^T$ будемо шукати оцінку лінійного неперервного функціонала

$$L(u) = \int_0^T (l_1(x)u(x, T) + l_2(x)u_t(x, T)) dx,$$

де $l_2 \in W_2^1(0, 1), l_1 \in L_2(0, 1)$, в класі лінійних оцінок вигляду

$$\hat{L}(u) = \int_0^T \sum_{k=1}^m p_k(t) \varepsilon_k(t) dt,$$

де функції $p_k(t)$ є елементами вектора $P(t) = (p_1(t), \dots, p_m(t))^T \in L_2^m(0, T)$ із вирішення наступної задачі:

$$|L(u) - \hat{L}| = \inf_P \sup_Z |L(u) - \hat{L}|,$$

де Z - множина функцій, що задовольняють нерівності (55).

Отримано мінімальні оцінки стану та швидкості системи при $t = T$, а також обчислювальний алгоритм оцінювання вібраційних полів, що має вигляд наближеного мінімаксного фільтру.

При проведенні стендових випробувань, а також при натурному експерименті може виникнути задача оцінки інтенсивності вібровпливів по спостереженнях (54). Задача оцінювання ставиться подібно мінімаксній задачі, що розглянута вище, і зводиться до задачі оптимального управління. Отримано обчислювальний алгоритм вирішення задачі оцінювання.

МОДЕЛЮВАННЯ ТА ПРОМИСЛОВІ ВИПРОБУВАННЯ АЛГОРИТМІВ ІДЕНТИФІКАЦІЇ І УПРАВЛІННЯ В СИСТЕМАХ АНАЛІЗУ ТА ВІДТВОРЕННЯ ВІБРАЦІЙНИХ РЕЖИМІВ

ОБ'ЄКТІВ ВИПРОБУВАНЬ. На рис. 2 наведена функціональна схема алгоритмів і програм цифрової чотирьохвимірної системи управління транспортними вібровипробуваннями, що відображає взаємодію алгоритмів математичного забезпечення в п'яти режимах роботи системи: генерування; аналізу; ідентифікації; управління; в'їробування. За допомогою цифрового моделювання досліджено матричні алгоритми коректної ідентифікації і управління в розглянутій системі.

Моделювання замкненої чотирьохвимірної системи управління проведено з метою дослідження працездатності як алгоритмів ідентифікації і управління, так і деяких інших ключових алгоритмів як основи алгоритмічного забезпечення цифрової системи. Цифрове моделювання показало працездатність і ефективність запропонованих в роботі алгоритмів ідентифікації і управління для об'єктів з невисоким рівнем перехресних зв'язків. Присутність шуму в тракті вимірювання віброприскорень, а також підвищення числа обумовленості МЧХО зменшують збіжність матричного алгоритму (9), в деяких частотних інтервалах порушуючи її. Застосування в цих умовах регуляризованого алгоритму управління (19) дозволило отримати процес, який збігається до завдання.

При розробці АСУ вібровипробуваннями для аналізу та відтворювання вібраційних процесів і полів важливо перевірити адекватність ММ ТВВ реальному об'єкту. При цьому для вирішення задачі ідентифікації бажано використовувати короточасні пробні віброрежими, тому що є обмеженням випробувальний віброресурс виробу. В роботі розглянуто режими ударних імпульсів заданої форми, полігармонічних та широкосмужних випадкових впливів. Маючи амплітудно-частотні характеристики об'єкта, характеристики формуючих і аналізуючих пристроїв, визначаються матриці статичних зв'язків. Наведені блок-схеми апаратури завдання динамічних впливів на об'єкт і вимірювально-реєструючої апаратури. Випробування проводились з метою визначення матриці статичного зв'язку розміром 15×15 в околиці заданого віброрежиму. Експерименти показали, що матриці статичних зв'язків в загальному випадку є цілком заповнені. Проте із їх аналізу можна прийти до висновку, що вони можуть бути апроксимовані стрічними матрицями.

Розглянуто автоматизовану систему реєстрації та обробки експериментальної інформації, що отримується під час вібраційних випробувань оптико-електронних МС. Система в процесі випробувань на скануючий гармонічний вплив дозволяє реєструвати масиви даних в 128 точках частотного інтервалу по 8 каналах на заданих частотах збудження дос-

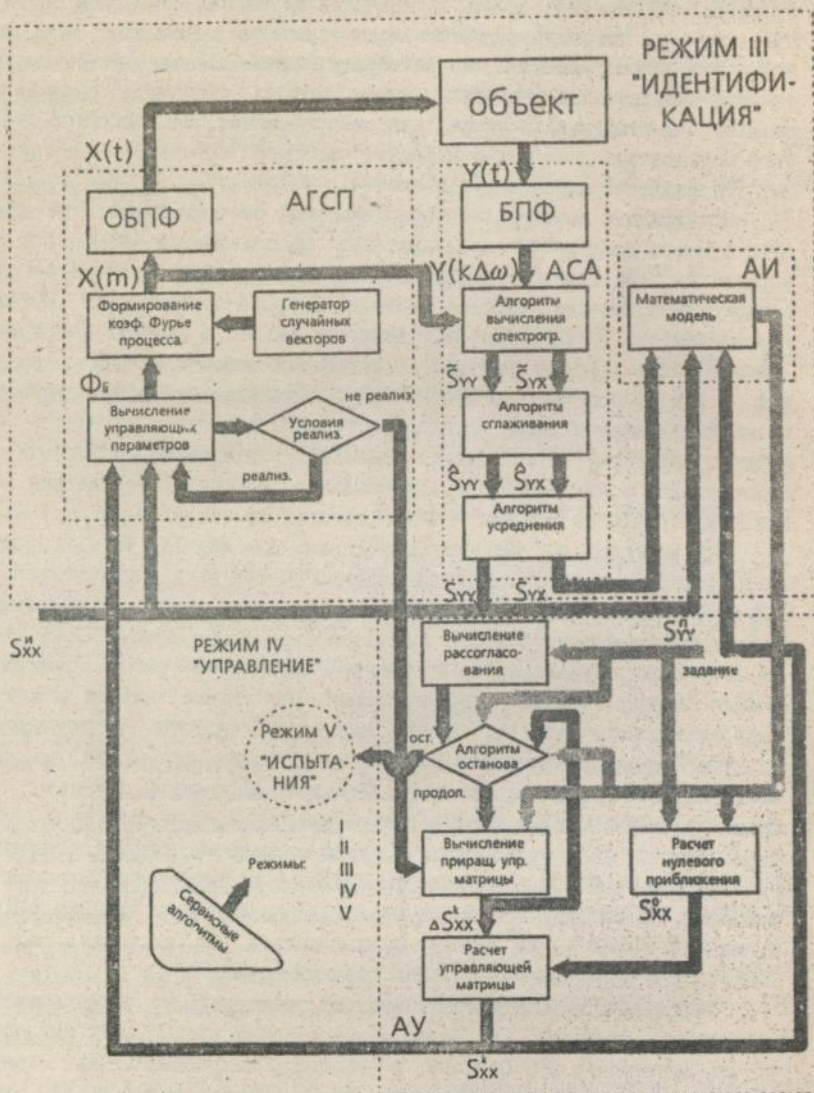


Рис. 2.

ліджуваного об'єкта. Отримані в системі після обробки експериментальних даних ЧХ виробу використовуються далі для ідентифікації ММ об'єкта, а також для визначення послідовності діагностичних ознак, що підтверджують чи спростовують успішність випробувань. Розглянено методику підготовки даних для модуля нестандартних обчислень і роботу програм підсистеми ідентифікації масо-пружних моделей на прикладі ідентифікації фізичної моделі інфрачервоного телескопа, яка була використана при підготовці випробувань реального виробу.

ДОДАТОК. В додатку наведені довідки про використання результатів дисертаційної роботи, графіки ітераційних процесів управління для власних та взаємних спектрів в чотирьохвимірній цифровій системі з використанням та без використання матричного регуляризованого алгоритму управління. Наведені АЧХ об'єкту, що був ідентифікований за допомогою різних режимів силосбуждження, зроблено опис системи обробки та відображення інформації, що використовується при оптимізації режимів відтворення вібраційних полів.

В И С Н О В К И

Основними результатами дисертаційної роботи є створення, дослідження та впровадження сукупності теоретичних і прикладних результатів, що дозволили розв'язати послідовність задач ідентифікації та управління, які виникають при розробці багатовимірних автоматизованих систем вібровипробувань при відтворенні вібраційних полів, а також при вирішенні задачі діагностики випробуваних багатовимірних МС. Запропоновані методи, алгоритми та програми розроблено з урахуванням особливостей прикладних задач, які відрізняються від відомих обчислювальною ефективністю.

Наукові та практичні результати можна сформулювати у вигляді наступних висновків.

1. Представлено короткий огляд розвитку теорії і практики вібраційних випробувань, із якого витікає, що сучасний етап розробки багатовимірних систем вібровипробувань пов'язаний з переходом від векторно-матричних алгоритмів функціонування і моделей об'єкта - до матричних, до управління вібраційними полями МС як об'єктів з розподіленими параметрами.

2. Досліджено природу виникнення некоректності при реалізації

алгоритма управління. Розроблено методи для визначення коректного управління. Доказано теорему, за допомогою якої отримано матричний регуляризований ітераційний алгоритм управління.

3. За допомогою метода регуляризації Тихонова отримано матричний алгоритм коректної ідентифікації оберненої МЧХО. Розроблено метод декомпозиції нелінійної задачі функціональної ідентифікації моделі об'єкта та цифровий алгоритм ідентифікації нелінійного об'єкта випробувань за допомогою описуючих функцій.

4. На основі запропонованого методу декомпозиції вирішено задачі параметричної ідентифікації масо-пружних моделей МС, модальних моделей, моделей у вигляді ПФ з великим числом степенів свободи.

5. Розроблено алгоритми ідентифікації, управління та прогнозування для системи оптимізації вібраційного стану об'єкта випробувань при вирішенні задачі управління вібраційним полем об'єкта як в скінченному, так і в нескінченному просторах. За допомогою метода інтегральних тотожностей і при початкових значеннях, які гарантовано належать деякому еліпсоїду, вирішено задачу ідентифікації деякого класу МС з розподіленими параметрами та нелінійними пружними характеристиками.

6. Запропоновано підхід і методику вирішення задачі мінімаксного оцінювання для систем вібровипробувань, за допомогою яких розроблено мінімаксний фільтр для оцінювання вібраційних полів у випадку шумів негаусової природи, а також вирішена задача оцінювання інтенсивності вібровпливів у мінімаксній постановці.

7. Розглянуто прикладні питання, що виникають в задачах відтворення вібраційних процесів і полів. Представлено систему обробки та відображення інформації, що використовується при цих випробуваннях. Ряд основних висновків дисертації підтверджуються моделюванням та промисловими випробуваннями розроблених алгоритмів і програмних продуктів.

Основні результати дисертації опубліковані в роботах:

1. Савенков А.И. Методы идентификации частотных характеристик механических систем по данным виброиспытаний // В кн.: С.Ф.Рядько, В.Ф.Ушклов, В.П.Яковлев. Идентификация механических систем. Определение динамических характеристик и параметров. - К. : Наук. думка, 1985. - С. 141-158.

2. Савенков А.И. О некоторых вопросах стабилизации и размещения

поллюсов систем управления, описывающихся разностными матричными уравнениями // Дискретные системы управления. - К.: Ин-т кибернетики АН УССР, 1980. - С. 86-94.

3. Савенков А.И., Яковлев В.П. О выборе параметра регуляризации в матричных алгоритмах корректной идентификации объектов вибротестирования // Дискретные системы управления. - К.: Ин-т кибернетики АН УССР, 1980. - С. 56-65.

4. Савенков А.И., Яковлев В.П. Матричный алгоритм управления спектральными характеристиками векторных случайных процессов при вырожденной матрице частотных характеристик объекта // Сложные системы управления. - К.: Ин-т кибернетики АН УССР, 1980. - С. 86-94.

5. Савенков А.И., Яковлев В.П. Матричные методы корректной идентификации и управления в системах воспроизведения спектральных характеристик случайных процессов // Кибернетика и вычислит. техника. - 1981. - Вып. 51. - С. 85-96.

6. Яковлев В.П., Савенков А.И. О корректном управлении спектром случайных процессов на выходе объекта с плохо обусловленной матрицей частотных характеристик // Кибернетика и вычислит. техника. - 1981. - Вып. 53. - С. 103-110.

7. Яковлев В.П., Савенков А.И. Декомпозиция задачи идентификации многомерного динамического объекта по спектральным характеристикам // Кибернетика и вычислит. техника. - 1982. - Вып. 56. - С. 35-40.

8. Яковлев В.П., Савенков А.И. Идентификация механических систем по частотным характеристикам с использованием комплексных матриц чувствительности // Кибернетика и вычислит. техника. - 1984. - Вып. 64. - С. 29-35.

9. Мандровский-Соколов Б.Ю., Савенков А.И. Управление многомерным объектом с ограниченным числом управляющих воздействий // Кибернетика и вычислит. техника. - 1985. - Вып. 67. - С. 67-69.

10. Козлов В.В., Савенков А.И., Соколов В.К., Яковлев В.П. Алгоритмы идентификации и прогнозирования в системе оптимизации вибрационного состояния динамических объектов // Кибернетика и вычисл. техника. - 1985. - Вып. 67. - С. 87-93.

11. Вирабян Г.Б., Савенков А.И., Яковлев В.П. О выборе начального приближения в задаче идентификации механических систем // Кибернетика и вычислит. техника. - 1986. - Вып. 69. - С. 90-95.

12. Яковлев В.П., Савенков А.И. К задаче идентификации части сложной механической системы по частотным характеристикам // Кибернетика и вычислит. техника. - 1987. - Вып. 74. - С. 44-51.

13. Мотылев Н.Г., Савенков А.И., Яковлев В.П. Экспериментальное

исследование методов оценки порядка и коэффициентов передаточных функций механических систем по частотным характеристикам // Кибернетика и вычислит. техника. - 1987. - Вып. 75. - С 81-90.

14. Данилов С.П., Куртов В.Н., Мотылев Н.Г., Савенков А.И., Яковлев В.П. Экспериментальная оценка точности определения частотных характеристик механической системы при испытаниях на сканирующее гармоническое воздействие // Дискретные системы управления. - К.: Ин-т кибернетики АН УССР, 1988. - С. 12-21.

15. Савенков А.И., Яковлев В.П. Матричные методы управления и идентификации в задачах воспроизведения характеристик векторных случайных процессов // Тр. III междунар. конф. "Комплексная автоматизация промышленности". - Вроцлав: Вроцлавский политех. ин-т, 1988. - С. 288-291.

16. Данилов С.П., Мотылев Н.Г., Савенков А.И., Яковлев В.П. Об оценке параметров многомерных динамических систем при стендовых испытаниях на гармоническое воздействие // Кибернетика и вычисл. техника. - 1988. - Вып. 79. - С. 97-105.

17. Савенков А.И., Яковлев В.П. О декомпозиции задачи определения передаточных функций сложных механических систем по частотным характеристикам // Кибернетика и вычислит. техника. - 1989. - Вып. 83. - С 96-101.

18. Савенков А.И., Яковлев В.П. Матричный алгоритм управления вырожденным объектом // Тр. IV междунар. конф. "Проблемы комплексной автоматизации". - К.: Киевский политех. ин-т, 1990. - С. 126-132.

19. Савенков А.И., Яковлев В.П. Декомпозиция задачи идентификации механических систем модальным методом по частотным характеристикам // Автоматика, 1990, №3, с. 41-48.

20. Borisenko A.I., Zelyk Ja.I., Lychak M.M., Savenkov A.I., Jakovlev V.P. Adaptive matrix control in spectral characteristic reproduction system with identifier // Pracedings of the IFAC workshop (Tbilisi, USSR), Pergamon Press, Oxford, New-York, Frankfurt, 1990, pp. 193-195.

21. Борисенко А.И., Зельк Я.И., Лычак М.М., Савенков А.И., Яковлев В.П. Матричные алгоритмы управления и идентификации в системе воспроизведения спектральных характеристик случайных процессов // Автоматика, 1991, № 1, с. 3-8.

22. Аксенова Г.Г., Бровдий Н.К., Данилов С.П., Кунцевич В.М., Лычак М.М., Мотылев Н.Г., Савенков А.И., Яковлев В.П. Комплекс алгоритмических, технических и программных средств для определения динамических характеристик объектов испытаний // Автоматика, 1991, №1.

с. 38-44.

23. Войчук Л.М., Савенков А.И., Яковлев В.П., Яценко В.А., Яременко Н.П. Синтез оптимального управления механической системой одного класса (подвижным составом) и стабилизация ее динамики // Автоматика, 1991, №5, с. 75-80.

24. Мотылев Н.Г., Савенков А.И., Яковлев В.П. О цифровом алгоритме построения описывающих функций механических систем // Киббернетика и вычислит. техника. - Вып. 89. - 1991. - С. 39-43.

25. Савенков А.И., Кораблев В.А. Алгоритм построения квазиоптимального управления и выбор точек наблюдения в системе оптимизации вибрационного состояния распределенных динамических систем // Киббернетика и вычислит. техника. - 1993. - Вып. 97. - С. 50-53.

26. Савенков А.И. Минимаксное оценивание вибрационных почв в задачах виброиспытаний // Автоматика, 1993, № 4, с. 38-44.

27. Савенков А.И., Яковлев В.П. Идентификация многомерных механических систем с применением метода регуляризации // Тез. докл. Всесоюз. конф. "Проблемы механики железнодорожного транспорта". - Днепр-петровск: Ин-т инженеров железнодорожного транспорта, 1980. - С. 125.

28. Савенков А.И., Яковлев В.П. Обратные задачи в системах измерения и воспроизведения спектральных характеристик векторных случайных процессов // Тез. докл. III Всесоюз. симпозиума "Методы идентификации в задачах измерительной техники и метрологии". - Новосибирск: Сибирский гос. НИИ метрологии, 1982. - С. 132-134.

29. Савенков А.И., Васяня В.А. Итерационный метод параметрической идентификации с использованием комплексных матриц чувствительности // Тез. докл. III Всесоюз. совещания - семинара "Проблемы теории чувствительности электронных и электромеханических устройств и систем". - Кишинев: Кишиневский политех. ин-т, 1983. - С. 13-14.

30. Савенков А.И., Яковлев В.П. Планирование эксперимента для оценки параметров моделей в АСУ виброиспытаний. // Тез. докл. IV Всесоюз. симпозиума "Методы теории идентификации в задачах измерительной техники и метрологии". - Новосибирск: Сибирский гос. НИИ метрологии, 1985. - С. 167.

31. Савенков А.И., Давлятшин Р.Н. Приближенный метод импульсного и граничного управления для полулинейных уравнений параболического типа // Тез. докл. республ. конф. "Управление в распределенных системах". - К.: КГУ, 1987. - С. 57.

32. Савенков А.И., Яковлев В.П. Метод декомпозиции в задаче идентификации механических систем со многими степенями свободы // Тез. докл. Всесоюз. конф. "Проблемы механики железнодорожного транс-

порта". - Днепропетровск: Ин-т инженеров железнодорожного транспорта, 1988. - С. 120-121.

33. Данилов С.П., Мотылев Н.Г., Савенков А.И., Черняева Л.А., Яковлев В.П. Автоматизированные методы экспериментального исследования динамических характеристик механических систем // Тез. докл. II Всесоюз. научно-техн. конф. "Вибрация и вибродиагностика. Проблемы стандартизации". - Горький: ВНИИМаш, 1988. - С. 306.

34. Савенков А.И., Яковлев В.П. Метод декомпозиции задачи идентификации механических систем по частотным характеристикам // Тез. докл. V Всесоюз. симпозиума "Методы теории идентификации в задачах измерительной техники и метрологии". - Новосибирск: Сибирский гос. НИИ метрологии, 1989. - 142.

35. Савенков А.И., Яковлев В.П. Идентификация параметров пространственной системы твердых тел и сосредоточенных масс // Тез. докл. VII Всесоюз. конф. "Управление в механических системах". - Свердловск: Ин-т математ. и механ. Урал. отд. АН СССР, 1990. - С. 87.

36. Савенков А.И. Об одной задаче оптимизации вибрационного режима при испытаниях механических систем // Тез. докл. I науч.-техн. конф. стран СНГ "Контроль и управление в технических системах". - Винница: Винницкий техн. ун-т, 1992. - С. 93.

37. Savenkov A.I. Decomposition method in the problem of dynamic systems identification // Abstracts of papers Inter. Conf. on Systems Science "Systems Science XI". - Wrocław, 1992. - P. 140.

38. Савенков А.И. Гарантированное оценивание вибрационных полей механических объектов в условиях стендовых испытаний // Тез. доп. I української конф. з автоматичного управління "Автоматизація-94". - К.: ІК імені В.М.Глушкова НАН України, 1994. - С. 78.

Савенков А.И. Идентификация и управление в задачах воспроизведения вибрационных режимов механических систем.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности - 05.13.01 - управление в технических системах, Киевский политехнический институт, Киев, 1994.

Защитается 38 научных работ, в которых рассмотрены задачи построения функциональных моделей нелинейных механических систем (МС) - объектов испытаний. Для управления многомерными вибропроцессами предложен матричный регуляризованный итерационный алгоритм управления. Получен матричный алгоритм корректной идентификации обратной матрицы частотных характеристик объекта, используемой для регуляризации алгоритма управления. Разработаны алгоритмы идентификации, управления и прогно-

зирования для системы оптимизации вибрационного состояния объекта испытаний при решении задачи управления вибрационным полем. Предложен минимаксный фильтр для оценивания вибрационных полей изделий, решена задача оценивания интенсивности вибровоздействий в минимаксной постановке.

Промышленные испытания и цифровое моделирование предложенных в диссертации алгоритмов показали их эффективность.

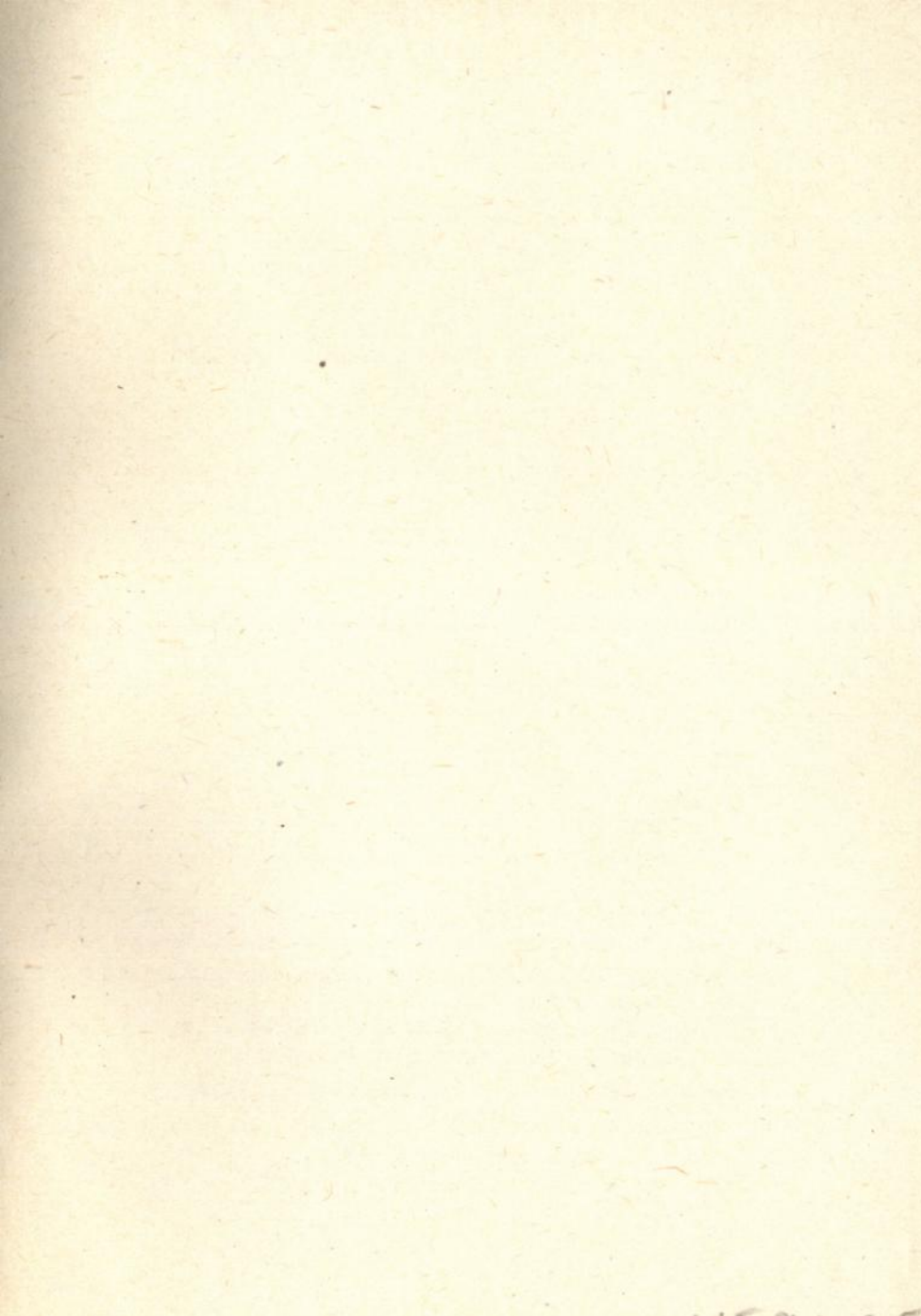
Ключові слова: ідентифікація, управління, вібрація, оцінювання, механічна система.

Savenkov A.I. Identification and control in the problem of vibration condition reproduction in mechanical systems. Doctor of Technical Sciences thesis in specialty - 05.13.01 - Control in Technical Systems, Kiev Polytechnic Institute, Kiev, 1994. It is defended 38 scientific works, in which construction the problems of functional models of non-linear mechanical systems (MS) as the tested objects is considered in the thesis. Matrix regularized iterative control algorithm is suggested for the control of multidimensional vibrational processes. Matrix algorithm is obtained for correct identification of the inverse matrix of the frequency response of the object, which is used for control algorithm regularization. Identification, control, and prediction algorithms are devised for the system of vibration state optimization of the tested object in the solution of the problem of vibration field control. Minimax filter is suggested for estimation of vibration field of the products; the problem in minimax formulation is solved of estimating the vibration effect intensity.

Industrial test and digital simulation of the algorithms suggested in the paper have showed their efficiency.

Підп. до друку 08.09.94. Формат 60х84/16. Папір друк. № 2.
Сфс. друк. Ум. друк. арк. 2,09. Ум.фарбо-відб. 2,21.
Обл. вид.-арк. 2.0. Тираж 100 прим. Зам. 895.

Редакційно-видавничий відділ з поліграфічною дільницею
Інституту кібернетики Імені В.М.Глушкова НАН України
252650 Київ МСД 22, проспект Академіка Глушкова, 40



AB 30.921