

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ "ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА"



Пукас Андрій Васильович

УДК 519.24

**МЕТОДИ ПЛАНУВАННЯ ЕКСПЕРИМЕНТІВ
ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ
НА ОСНОВІ ІНТЕРВАЛЬНИХ ДАНИХ**

01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи

Автореферат

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Львів – 2007

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано в Тернопільському національному економічному університеті Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник доктор технічних наук, професор
Дивак Микола Петрович,
Тернопільський національний економічний університет,
декан факультету комп'ютерних інформаційних
технологій, завідувач кафедри комп'ютерних наук.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Матвійчук Ярослав Миколайович,
Національний університет "Львівська політехніка",
професор кафедри теоретичної радіотехніки та
радіовимірювання;

доктор технічних наук, старший науковий співробітник
Зелик Ярема Ігорович,
Інститут космічних досліджень НАН України та
Національного космічного агентства України,
провідний науковий співробітник відділу системного
аналізу та керування.

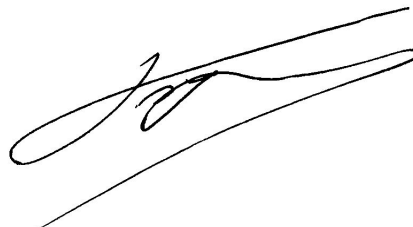
Провідна установа – Вінницький національний технічний університет
Міністерства освіти і науки України, м.Вінниця, кафедра
автоматики та інформаційно-вимірювальної техніки.

Захист відбудеться "15" червня 2007 р. о 14⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 35.052.05 у Національному університеті "Львівська політехніка" за адресою: 79013, м. Львів, вул. С.Бандери, 12.

З дисертацією можна ознайомитися в науково-технічній бібліотеці Національного університету "Львівська політехніка" (79013, м. Львів, вул. Професорська, 1).

Автореферат розіслано " ___ " травня 2007 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради
доктор технічних наук, професор



Р.А. Бунь

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Сучасний розвиток науки і техніки в Україні характеризується широким застосуванням математичних моделей для задач прийняття рішень (ПР) в різних сферах, зокрема, для задач синтезу та оптимізації характеристик уніфікованих рядів технічних пристроїв, для задач контролю порогових рівнів параметрів технічних систем, технологічних процесів, контролю забруднення навколишнього природного середовища та ін. Такі моделі переважно будуються за умов невизначеності, що призводить до отримання стохастичної, нечіткої чи інтервальної критеріальної функції. Внаслідок цього замість одного рішення з'являється множина рішень.

Побудова математичних моделей для вказаних задач вимагає проведення експериментальних досліджень, які, як правило, характеризуються високою вартістю. Так, для задач синтезу характеристик уніфікованого ряду технічних пристроїв, оптимізації їх параметрів необхідним є створення окремих зразків пристроїв з різними параметрами в цілях проведення експериментальних досліджень. Для задачі контролю порогових рівнів забруднення навколишнього природного середовища з метою побудови та оптимізації моделі статичних полів концентрацій шкідливих викидів необхідним є проведення експериментальних досліджень, кожне з яких є високовартісним.

Таким чином, вказані задачі вимагають мінімізації витрат на побудову моделей для ПР, тобто для оптимального планування експериментів.

Актуальність теми. Задачам планування оптимальних експериментів за умов невизначеності присвячено достатньо велику кількість праць вітчизняних і зарубіжних науковців. Зокрема, досить повно методи організації оптимальних експериментів для побудови стохастичних критеріальних функцій описано у працях В.В. Федорова, В.В. Налімова, Ю.П. Адлера, К. Хартмана, Е.К. Лецкого, В. Шефера та ін. Методи планування оптимальних експериментів для задач аналізу інтервальних даних розроблені в меншій мірі. Серед найбільш значущих досліджень у цьому напрямку слід виділити праці О.П.Воцініна, В.М.Кунцевича, М.П.Дивака, Л.Пронзато та ін. Існуючі критерії оптимального планування експериментів та методи синтезу оптимальних планів націлені на забезпечення певних властивостей стохастичних критеріальних функцій та критеріальних функцій, побудованих методами аналізу інтервальних даних. Такі методи є непридатними для розв'язування задач побудови моделей і процедур для ПР, оскільки оптимізують для стохастичних та інтервальних критеріальних функцій такі характеристики, як точність та адекватність, і не забезпечують мінімізації потужності множин рівнозначних рішень. Крім того, методи оптимального планування експериментів, побудовані на критеріях оптимізації властивостей стохастичних критеріальних функцій, вимагають значних експериментальних досліджень, що не завжди можливе за умов високої вартості кожного дослідження.

Отже, актуальною є науково-технічна задача створення методів планування експериментів з інтервальними даними, що оптимізують математичні моделі для задач ПР за критеріями мінімізації потужності множин рішень.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційне дослідження виконано відповідно до державної науково-технічної програми "Методи оптимізації, програмне забезпечення та інформаційні технології у складних системах", в рамках науково-дослідних робіт "Розробка теоретичних засад, алгоритмічного та програмного забезпечення моделювання технічних, екологічних та економічних систем на основі аналізу інтервальних даних" (2002-2006 рр., номер державної реєстрації 0102U002565), "Розробка теоретичних основ апаратного і програмного забезпечення для дослідження та моделювання широкого класу об'єктів методами аналізу інтервальних даних на базі дистрибутивної вимірювально-керуючої мережі" (2003 р., номер державної реєстрації 0103U005903), "Методи, апаратні та програмні засоби для дослідження та моделювання нестационарних розподілених об'єктів на основі інтервальних даних" (2006-2007 рр., номер державної реєстрації 0106U000529), „Співпраця між Україною та Румунією в галузі розподілених систем” (2006-2007 рр., номер державної реєстрації 0106U005307), що входять до тематичного плану наукових досліджень Тернопільського національного економічного університету і в яких здобувач був виконавцем.

Мета і задачі дослідження. Мета дослідження – розробити методи, алгоритми та програмне забезпечення для планування експериментів на основі аналізу інтервальних даних, що оптимізують математичні моделі у задачах прийняття рішень, і застосувати їх для розв'язування прикладних задач.

Для досягнення поставленої мети в дисертації необхідно було вирішити такі основні задачі:

- провести аналіз задач та методів побудови математичних моделей для ПР;
- провести аналіз критеріїв планування оптимальних експериментів для задач побудови математичних моделей за умов невизначеності;
- побудувати математичні моделі критеріїв для задачі контролю порогових рівнів параметрів систем та задачі вибору оптимального рішення на основі критерію мінімуму або максимуму;
- обґрунтувати методи побудови моделей критеріальних функцій для задач ПР на основі аналізу інтервальних даних;
- систематизувати методи побудови спектрів I_G -оптимальних планів для інтервальних моделей;
- розробити метод послідовного планування I_G -оптимальних експериментів;
- розробити методи послідовного планування експериментів для задачі контролю порогових рівнів параметрів систем та задачі вибору оптимального рішення на основі критерію мінімуму або максимуму;
- застосувати розроблені методи послідовного планування експериментів для побудови інтервальної моделі енергетичної характеристики високочастотних магнітних підсилювачів імпульсних джерел електроживлення та для задачі екологічного моніторингу;
- розробити програмний комплекс для реалізації та досліджень оптимальних послідовних планів для побудови та оптимізації моделей у задачах ПР.

Об'єкт дослідження – процеси оптимізації математичних моделей для задач ПР на основі інтервальних даних.

Предмет дослідження – планування експериментів для оптимізації математичних моделей у задачах ПР на основі інтервальних даних.

Методи дослідження. Для вирішення поставлених задач в дисертації застосовувались методи інтервального аналізу, теорія планування експерименту, теорія імовірностей та математична статистика, теорія матриць, чисельні методи.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в тому, що:

– набули подальшого розвитку методи оптимізації інтервальних моделей для задач ПР на основі експериментальних даних, які, на відміну від існуючих, базуються на критеріях мінімізації розмірів множини рівнозначних рішень, забезпечують економію ресурсів на створення цих моделей;

– набули подальшого розвитку методи побудови послідовних I_G -оптимальних експериментів, які, на відміну від існуючих, забезпечують неперервність інтервальних критеріальних функцій моделей для задач ПР, відзначаються низькою обчислювальною складністю і, порівняно з існуючими методами при однаковій кількості спостережень, забезпечують меншу максимальну ширину коридору критеріальних функцій;

– вперше розроблено метод оптимізації інтервальних моделей для задач контролю порогових рівнів параметрів систем на основі процедур оптимального планування експериментів, що дозволило мінімізувати витрати на побудову цих моделей; розроблений метод при однаковій кількості спостережень забезпечує, порівняно з існуючими методами, менший об'єм області рівнозначних рішень щонайменше на 3,22%, а в середньому виграш складає 23,6%;

– вперше розроблено метод оптимізації інтервальних моделей для задач вибору оптимальних параметрів статичної системи на основі процедур послідовного планування експерименту, який при однаковій кількості спостережень забезпечує, порівняно з існуючими методами, менший об'єм області рівнозначних рішень щонайменше на 12,10%, а в середньому виграш складає 25,69%.

Практичне значення одержаних результатів полягає в тому, що:

– розроблені методи дозволили створити програмне забезпечення, що забезпечило мінімізацію витрат на оптимізацію інтервальних моделей у задачах ПР для різних практичних застосувань, зокрема для встановлення фактів перевищення норм гранично допустимих концентрацій шкідливих викидів в атмосферу;

– застосування розроблених оптимальних планів експериментів для побудови та оптимізації інтервальних моделей енергетичних характеристик магнітних ключів імпульсних джерел живлення дозволило зменшити витрати на встановлення загальних характеристик уніфікованого ряду цих пристроїв.

Розроблені методи та алгоритми оптимального планування послідовних експериментів впроваджені у санітарно-епідеміологічній станції м. Тернополя для оптимізації інтервальних моделей контролю порогових рівнів шкідливих речовин, у ВАТ ТКБР "Стріла" для розробки та виробництва джерел вторинного електроживлення, для виконання держбюджетних науково-дослідних робіт на

кафедрі комп'ютерних наук Тернопільського національного економічного університету, що підтверджено актами про впровадження.

На основі проведених досліджень здобувачем розроблено методичне та програмне забезпечення, яке використовують у навчальному процесі в Тернопільському національному економічному університеті для викладання дисципліни “Моделювання систем”.

Особистий внесок здобувача. Усі положення, що становлять суть дисертаційної роботи, сформульовані та вирішені здобувачем самостійно.

У друкованих працях, опублікованих у співавторстві, здобувачу належать: [1, 7] – послідовний I_G -оптимальний план для побудови інтервальної моделі енергетичної характеристики високочастотних магнітних підсилювачів імпульсних джерел електроживлення; [2, 8] – розроблений метод послідовного планування експериментів для задачі вибору оптимального рішення на основі критерію мінімуму або максимуму; [3] – розроблений метод послідовного планування експериментів для задач контролю порогових рівнів параметрів систем; [4, 12] – розроблений метод послідовного I_G -оптимального планування експериментів; [5] – розроблені таблиці оптимальних планів експериментів; [6] – план послідовного експерименту та побудована в результаті його реалізації інтервальна модель поля концентрацій окислів азоту на досліджуваній ділянці м.Тернополя; [9] – розроблений критерій мінімізації об'єму області рівнозначних рішень для оптимізації інтервальної моделі у задачі ПР; [10] – досліджені властивості області рівнозначних рішень при побудові інтервальної моделі для задачі ПР на основі планування експерименту; [11] – проведена оцінка ефективності методу послідовного планування експериментів для задач ПР екологічної експертизи; [13] – запропонована процедура планування експерименту для задач екологічного моніторингу у два етапи: проведення насиченого I_G -оптимального експерименту та проведення послідовних вимірювань; [14, 15] – дослідження точності та ефективності інтервальної квадратичної критеріальної функції з двовимірним вектором рішень, побудованої на основі оптимального плану; [16] – алгоритм застосування оптимальних планів експериментів для ідентифікації інтервальних моделей.

Апробація результатів дисертації. Матеріали дисертації доповідалися та обговорювалися на 10 міжнародних, 6 національних конференціях та семінарах: International Conference „The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics” CADSM (Lviv-Slavske, 2003; Lviv-Polyana, 2005; Lviv-Polyana, 2007), IX науково-технічна конференція „Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах” (Хмельницький, 2003), International Workshop „Computational Problems of Electrical Engineering” (Jazleevets, 2003; Odessa, 2006), International Conference “Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science” TCSET (Lviv-Slavsko, 2004; Lviv-Slavsko, 2006), школа-семінар для молодих науковців „Наукові космічні дослідження” (Київ, 2004), XIII International Symposium „International Symposium on Theoretical Electrical Engineering” ISTET'05 (Lviv, 2005), III

International Workshop „Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications” IDAACS’2005 (Sofia, 2005), школа-семінар для молодих науковців "Індуктивне моделювання" (с. Жукін, Київська обл., 2006); 8th International Symposium on Symbolic and Numeric Algorithms for Scientific Computing SYNASC (Timisoara, Romania, 2006), на наукових семінарах кафедри автоматички Університету Цінхуа (Пекін, 2003), науково-практичних конференціях професорсько-викладацького складу та семінарах кафедри комп’ютерних наук Тернопільського національного економічного університету (Тернопіль, 2003-2007).

Публікації. Результати дисертації опубліковано у 16 наукових працях загальним обсягом 88 сторінок, у тому числі в 5 статтях у фахових наукових виданнях, в 11 публікаціях у матеріалах конференцій та тезах доповідей.

Структура та обсяг роботи. Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел і чотирьох додатків. Загальний обсяг роботи 161 сторінка. Основний зміст викладено на 127 сторінках. Робота містить 32 рисунки і 13 таблиць. Список використаних джерел охоплює 149 найменувань. Додатки на 17 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** наведено загальну характеристику роботи, обґрунтовано актуальність теми, сформульовано мету та задачі досліджень, визначено основні методи досліджень, розкрито наукову та практичну цінність отриманих результатів.

У **першому розділі** проведено аналіз методів побудови математичних моделей для задач ПР, зокрема математичних моделей, які включають критеріальну функцію, що будується на основі експериментальних даних в умовах невизначеності.

Розглянуто особливості задач ПР, зокрема таких, як моделювання характеристик уніфікованого ряду технічних пристроїв, контролю порогових рівнів параметрів систем та вибору оптимальних параметрів статичної системи на основі критерію мінімуму або максимуму. Показано необхідність планування оптимальних експериментів для мінімізації витрат на побудову та оптимізацію математичних моделей.

Розглянуто математичні особливості побудови інтервальних критеріальних функції на основі даних експерименту в інтервальному вигляді

$$\bar{x}_i, [y_i^-; y_i^+], y_0(\bar{x}_i) \in [y_i^-; y_i^+], i = 1, \dots, N, \quad (1)$$

на основі лінійно-параметричного рівняння відомої структури:

$$y_0(\bar{x}) = \bar{\varphi}^T(\bar{x}) \cdot \bar{\beta}, \quad (2)$$

де y_i^-, y_i^+ – відповідно, нижня і верхня межі інтервалу значень критеріальної функції для заданих значень вектора рішень $\bar{x}_i = (x_{1i}, \dots, x_{ni})^T$ на допустимій множині χ ; $y_0(\bar{x}_i)$ – істинне невідоме значення критеріальної функції; $\bar{\varphi}^T(\bar{x})$ – відомий вектор базисних функцій; $\bar{\beta} = (\beta_1, \dots, \beta_m)^T$ – невідомий вектор

коефіцієнтів критеріальної функції; N – кількість спостережень, що у випадку насиченого експерименту збігається з кількістю m невідомих коефіцієнтів.

Завданням аналізу інтервальних даних є оцінювання невідомого вектора $\vec{\beta}$ так, щоб значення критеріальної функції $y = \vec{\varphi}^T(\vec{x}) \cdot \vec{\beta}$ в точках експерименту належали відповідним інтервалам виходу. За даних умов у випадку опрацювання результатів спостережень необхідно розв'язати таку систему інтервальних нерівностей:

$$\vec{Y}^- \leq F \cdot \vec{b} \leq \vec{Y}^+, \quad (3)$$

де $\vec{Y}^- = \{y_i^-, i=1, \dots, N\}$, $\vec{Y}^+ = \{y_i^+, i=1, \dots, N\}$ – вектори, складені, відповідно, з верхніх та нижніх меж інтервалів $[y_i^-, y_i^+]$; $F = \{\varphi_j(\vec{x}_i), i=\overline{1, N}, j=\overline{1, m}\}$ – відома матриця значень базисних функцій, яка задає план експерименту.

Результатом розв'язку системи (3) є множина Ω векторів оцінок \vec{b} коефіцієнтів $\vec{\beta}$

$$\Omega = \{\vec{b} \in R^m \mid \vec{Y}^- \leq F \cdot \vec{b} \leq \vec{Y}^+\}. \quad (4)$$

Отримана множина Ω у просторі параметрів β_1, \dots, β_m є опуклим многогранником і довільна точка $\vec{b} \in \Omega$ цієї множини є розв'язком системи (4) і утворює модель критерію оптимальності рішень

$$\hat{y}(\vec{x}) = \vec{\varphi}^T(\vec{x}) \cdot \vec{b}, \quad \vec{b} \in \Omega, \quad (5)$$

що включається в усі інтервали $[y_i^-, y_i^+]$. Множина розв'язків Ω породжує множину рівнозначних, з погляду наявної інтервальної невизначеності, інтервальних моделей, кожна з яких задовольняє умови задачі. При цьому, всі інтервальні моделі критерію оптимальності рішень знаходяться у коридорі:

$$[\hat{y}(\vec{x})] = [\hat{y}^-(\vec{x}); \hat{y}^+(\vec{x})], \quad (6)$$

ширина якого задається різницею меж

$$\Delta_{y(\vec{x})} = \hat{y}^+(\vec{x}) - \hat{y}^-(\vec{x}) = \max_{\vec{b} \in \Omega} (\vec{\varphi}^T(\vec{x}) \cdot \vec{b}) - \min_{\vec{b} \in \Omega} (\vec{\varphi}^T(\vec{x}) \cdot \vec{b}). \quad (7)$$

Досліджено критерії оптимальності та методи планування регресійних D -, A -, E -, Q -, G -оптимальних та інтервальних I_D -, I_A -, I_E -, I_Q -, I_G -оптимальних експериментів за умови припущення про наявність в експериментальних даних адитивної похибки. Показано їх непридатність для побудови моделей у задачах ПР, оскільки вони спрямовані на забезпечення оптимальних прогностичних властивостей стохастичних чи інтервальних критеріальних функцій, а не на мінімізацію потужності множин рівнозначних рішень.

Сформульовано постановки задач оптимального планування експериментів для побудови моделей у задачах ПР на основі інтервальних даних та обґрунтовано використання для розв'язування цих задач інтервального підходу.

У другому розділі сформульовано задачу контролю порогових рівнів параметрів систем у випадку опрацювання експериментальних даних на основі інтервального підходу, коли критеріальна функція представляється у формі гарантованого коридору, який порівнюється з допустимим значенням рівня

характеристики, що моделюється:

$$[\hat{y}(\bar{x})] < y_{lev}, [\hat{y}(\bar{x})] > y_{lev}, \quad (8)$$

де $\bar{x} = (x_1, \dots, x_n)$ – n -вимірний вектор рішень; $[\hat{y}(\bar{x})]$ – інтервальна критеріальна функція; y_{lev} – допустимий пороговий рівень.

Розглянемо можливі варіанти при прийнятті рішень для задачі контролю значення характеристики системи, яке нижче або вище допустимого рівня (8), із урахуванням точності моделі з одним входом (рис. 1). Як видно з рис. 1, однозначні рішення можна прийняти у випадках а та б – коли коридори інтервальних моделей критеріїв $[\hat{y}(\bar{x})] = [\hat{y}^-(\bar{x}); \hat{y}^+(\bar{x})]$, ширина яких задає точність моделі, знаходяться вище або нижче рівня порогу. Отже, у цих випадках точність моделі на усій області експерименту є задовільною і достатньою для прийняття рішення про наявність (рис. 1, а) або відсутність (рис. 1, б) перевищення допустимого рівня характеристики системи.

У випадках в та г рівень порогу y_{lev} знаходиться в коридорі прогнозування інтервальних моделей $[\hat{y}(\bar{x})]$ на всій області експерименту (рис. 1, в) або на окремих ділянках: області $[0; x_i]$ та $[x_j; \infty]$ (рис. 1, г).

У двох останніх випадках ситуація ПР ускладнюється через велику ширину коридору інтервальних моделей.

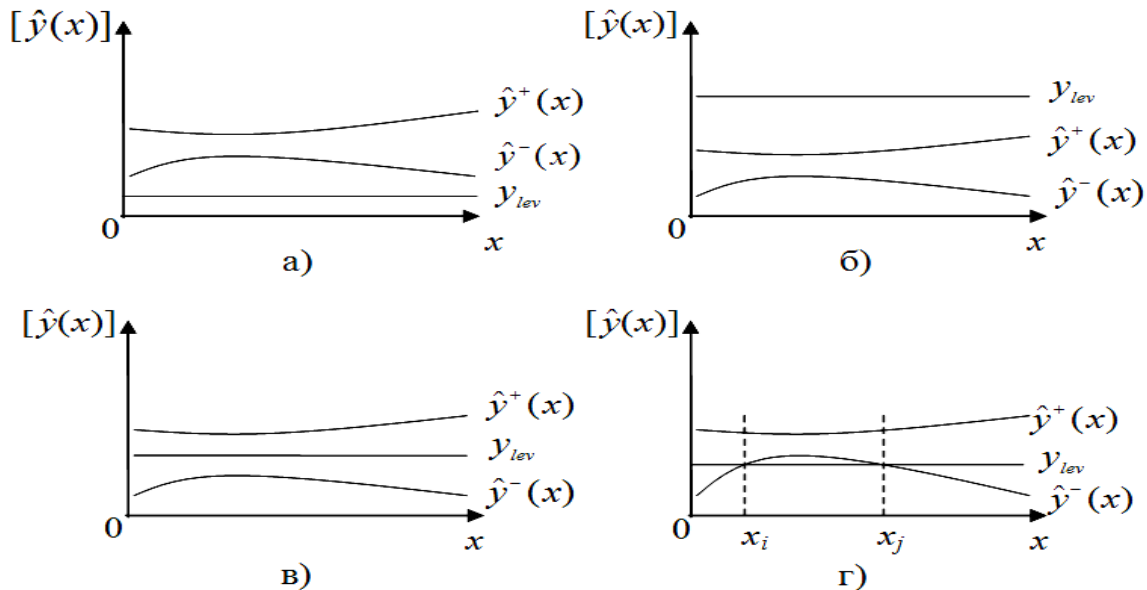


Рис.1. Зіставлення коридору інтервальних моделей з рівнем порогу

Означення 1. Множиною X^* нерозпізнаних рішень задачі контролю порогових рівнів параметрів системи називатимемо таку множину $X^* \subset \chi$, для кожного елемента якої інтервал критеріальної функції $[\hat{y}(\bar{x})]$ включає порогове значення y_{lev} :

$$X^* = \{\bar{x}_i \mid y_{lev}(\bar{x}_i) \in [\hat{y}^-(\bar{x}_i); \hat{y}^+(\bar{x}_i)]\}, \bar{x}_i \in \chi. \quad (9)$$

У формулі (8) ширина коридору інтервальних моделей $[\hat{y}(\bar{x})]$ безпосередньо впливає на потужність множини нерозпізнаних рішень. У багатовимірному випадку кількісну оцінку потужності цієї множини запропоновано оцінювати

наближеним значенням її об'єму V , обчисленого як суму одиничних об'ємів n -вимірних прямокутних паралелепіпедів, отриманих шляхом апроксимації області нерозпізнаних рішень методом сіток:

$$V(F, \bar{x}) = \sum_{p=1}^P V_p, \quad (10)$$

де P – величина, значення якої визначає загальну кількість n -вимірних прямокутних паралелепіпедів на допустимій області рішень χ і залежить від точності апроксимації цієї області; V_p – величина, значення якої визначається за умовою:

$$V_p = \begin{cases} 1, & \text{якщо } y_{lev} \in [\hat{y}^-(\bar{x}_p); \hat{y}^+(\bar{x}_p)] \\ 0, & \text{якщо } y_{lev} \notin [\hat{y}^-(\bar{x}_p); \hat{y}^+(\bar{x}_p)] \end{cases}, \quad (11)$$

де \bar{x}_p – центр p -го n -вимірного прямокутного паралелепіпеда; y_{lev} – пороговий рівень параметра системи.

Зауважимо, що для загального випадку область нерозпізнаних рішень не обов'язково має бути зв'язаною. Надалі, не порушуючи загальності, будемо припускати наявність однієї області нерозпізнаності.

Далі у цьому розділі розглянуто задачі вибору оптимальних параметрів статичної системи за критерієм мінімуму або максимуму інтервальної критеріальної функції

$$[\hat{y}^-(\bar{x}); \hat{y}^+(\bar{x})] \xrightarrow{\bar{x} \in \chi} \min, \quad (12)$$

$$[\hat{y}^-(\bar{x}); \hat{y}^+(\bar{x})] \xrightarrow{\bar{x} \in \chi} \max. \quad (13)$$

Схематично ці задачі подано на рис. 2.

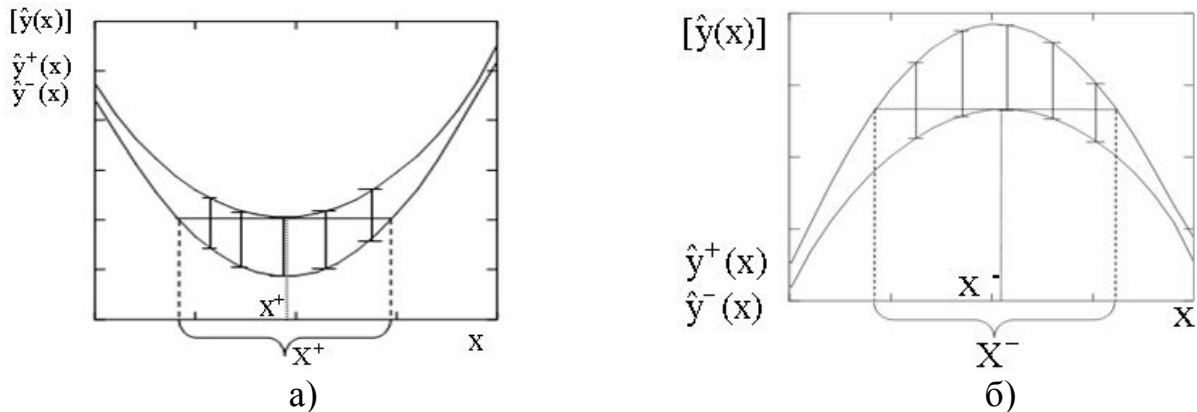


Рис. 2. Множини рівнозначних рішень X^+ для (12) та X^- для (13)

Означення 2. Множиною рівнозначних рішень X^+ задачі вибору оптимальних параметрів статичної системи за критерієм (12) називатимемо таку множину $X^+ \subset \chi$, для кожного елемента якої інтервал критеріальної функції $[\hat{y}(\bar{x})]$ включає значення $\hat{y}^+(\bar{x}^+)$, тобто:

$$X^+ = \{\bar{x} \in R^n \mid \hat{y}^-(\bar{x}) \leq \hat{y}^+(\bar{x}^+)\}, \quad (14)$$

де $x^+ = \arg \min_{x \in \chi} \hat{y}^+(\bar{x})$.

Подібно до того визначаємо множину рівнозначних рішень X^- задачі вибору оптимальних параметрів статичної системи за критерієм (13)

$$X^- = \{ \bar{x} \in R^n \mid \hat{y}^-(\bar{x}^-) \leq \hat{y}^+(\bar{x}) \}, \quad (15)$$

де $x^- = \arg \max_{x \in \chi} \hat{y}^-(\bar{x})$.

Кількісну оцінку потужності множин рівнозначних рішень моделі оцінюватимемо аналогічно до задачі контролю порогових рівнів параметрів систем – наближеним значенням об'єму V , обчисленого за формулою (10).

У цьому розділі також обґрунтовано використання еліпсоїдної локалізації області параметрів Ω (4) для забезпечення аналітичного задання меж коридору критеріальних функцій, а також для зменшення обчислювальних витрат на побудову критеріальних функцій. При цьому коридор критеріальних функцій набуде вигляду

$$[\hat{y}(\bar{x})]_{\bar{b} \in Q_m} = [\bar{\varphi}^T(\bar{x}) \cdot \bar{b} - \frac{1}{2} \cdot \Delta_{\hat{y}(\bar{x})} \Big|_{\bar{b} \in Q_m}; \bar{\varphi}^T(\bar{x}) \cdot \bar{b} + \frac{1}{2} \cdot \Delta_{\hat{y}(\bar{x})} \Big|_{\bar{b} \in Q_m}], \quad (16)$$

де $\Delta_{\hat{y}(\bar{x})} \Big|_{\bar{b} \in Q_m}$ – ширина коридору, що обчислюється за формулою

$$\Delta_{\hat{y}(\bar{x})} \Big|_{\bar{b} \in Q_m} = 2 \cdot \sqrt{\bar{\varphi}^T(\bar{x}) \cdot H^{-1} \cdot \bar{\varphi}(\bar{x}) \cdot \gamma}. \quad (17)$$

У формулі (17): H – матриця конфігурації еліпсоїда; γ – радіус еліпсоїда.

У третьому розділі розроблено три методи послідовного планування експериментів: для мінімізації ширини коридору критеріальних функцій (послідовні I_G -оптимальні плани); для оптимізації інтервальних моделей у задачах контролю порогових рівнів параметрів систем; для оптимізації інтервальних моделей у задачах вибору оптимальних параметрів систем за критеріями (12) чи (13).

Зв'язок між шириною коридору інтервальних критеріальних функцій та розмірами множини рівнозначних рішень спочатку встановлюватимемо через матрицю $F_m = \{ \varphi_j(\bar{x}_i), i = \overline{1, m}, j = \overline{1, m} \}$ – квадратну матрицю значень базисних функцій, яка задаватиме план насиченого експерименту. Оскільки розміри області рівнозначних рішень задаємо об'ємом V за формулою (10), то формально задачу планування насиченого експерименту можна записати у такому вигляді:

$$V(F_m) \xrightarrow{F_m} \min. \quad (18)$$

Розглянемо деякі важливі для розв'язування задачі (18) властивості функціоналу $V(F_m)$. Нехай необхідно оцінити можливість зменшення функціоналу $V(F_m)$ внаслідок послідовності серій експериментів з однаковою m_k кількістю спостережень в кожній k -й серії, що характеризуються однаковою матрицею $F_{m_1} = F_{m_2} = \dots = F_{m_k} = F_m \quad \forall k = 1, 2, \dots, K$. Тоді справедливе твердження:

Твердження 1. Для функціоналу $V(F_m)$ в серіях $k = 1, 2, \dots, K$ експерименту справедлива нерівність $V(F_{m_{k+1}}) \leq V(F_{m_k})$, якщо

$$\max_{\bar{x} \in \chi} \Delta_{\hat{y}(\bar{x}, F_{m_{k+1}})} \Big|_{\bar{b} \in Q_{m_{k+1}}} < \max_{\bar{x} \in \chi} \Delta_{\hat{y}(\bar{x}, F_{m_k})} \Big|_{\bar{b} \in Q_{m_k}} \quad \forall k = 1, 2, \dots, K.$$

Зауважимо, що в цьому випадку ширину коридору $\Delta_{\hat{y}(\bar{x}, F_{m_{k+1}})} \Big|_{\bar{b} \in Q_{m_{k+1}}}$ критеріальних функцій обчислюємо за формулою (17), в якій: $H = F^T \cdot E^{-1} \cdot F$; $\gamma = m$.

Таким чином, при мінімізації максимальної ширини $\max_{\bar{x} \in \chi} \Delta_{\hat{y}(\bar{x}, F_m)} \Big|_{\bar{b} \in Q_m}$ коридор інтервальних критеріальних функцій звужується, що призводить до зменшення функціоналу $V(F_m)$.

Твердження 2. Достатньою умовою для $V(F_m) = 0$, є умова $\max_{\bar{x} \in \chi} \Delta_{\hat{y}(\bar{x}, F_m)} \Big|_{\bar{b} \in Q_m} = 0$.

Доведені у дисертації твердження щодо властивостей функціоналу $V(F_m)$ дозволяють знайти наближення розв'язку задачі (18) із розв'язку такої задачі:

$$\max_{\bar{x} \in \chi} \Delta_{\hat{y}(\bar{x}, F_m)} \Big|_{\bar{b} \in Q_m} \xrightarrow{F_m} \min, \quad (19)$$

яка еквівалентна достатньо вивченій задачі планування наближених I_G -оптимальних насичених інтервальних експериментів.

У дисертаційній роботі запропоновано таку схему організації послідовних експериментів. На першому етапі – проведення насиченого I_G -оптимального експерименту, план для якого отримуємо із розв'язку задачі (19), і побудова за його результатами початкової інтервальної критеріальної функції (16). На другому етапі, з метою оптимізації інтервальних критеріальних функцій проводяться додаткові спостереження у точках \bar{x}_{k+1} , що збігаються з точками насиченого плану:

- для побудови послідовних I_G -оптимальних планів за критерієм

$$\max_{\bar{x} \in \chi} \Delta_{\hat{y}(\bar{x}, F)} \xrightarrow{\bar{x}_{k+1} \in \{x_i, i=1, \dots, m\}} \min; \quad (20)$$

- для задач контролю порогових рівнів параметрів систем та для задач (12) чи (13) за критерієм

$$V(F, \bar{x}_{k+1}) \xrightarrow{\bar{x}_{k+1} \in \{\bar{x}_i, i=1, \dots, m\}} \min. \quad (21)$$

Задачі (20) та (21) оптимального розподілу повторних вимірювань в точках насиченого плану експерименту розглянуто для випадку змішаної моделі похибки спостережень $y_i = y_{0i} + e_{1i} + e_{2i}$, де e_{1i} – не випадкова обмежена похибка з відомим діапазоном можливих значень $-\Delta_{1i} \leq e_{1i} \leq \Delta_{1i}$; e_{2i} – випадкова похибка, що має симетричний (у загальному випадку невідомий) розподіл на відомому інтервалі $[-\Delta_{2i}; \Delta_{2i}]$. У кожній точці, при додаванні нових спостережень, отримуємо вибірку із N_i випадкових інтервалів. Ширина результуючого перетину цих інтервалів визначатиметься так: $\Delta_{N_i} = \Delta_{N(\bar{x}_i)} = \min_i \{y_{N_i}^+\} - \max_i \{y_{N_i}^-\}$, де $y_{N_i}^+$, $y_{N_i}^-$ – відповідно верхня та нижня межі інтервалу критеріальної функції в i -й точці спектра.

З урахуванням зосередження повторних вимірювань у точках спектра

насиченого плану експерименту результуючу ширину коридору інтервальних критеріальних функцій (16) на k -му кроці можна представити у вигляді:

$$\Delta_{\hat{y}(\bar{x}, F, k)} \Big|_{\bar{b} \in Q_m} = 2 \cdot \sqrt{\bar{\varphi}^T(\bar{x}) \cdot (F^T \cdot \hat{E}_k^{-2} \cdot F)^{-1} \cdot \bar{\varphi}(\bar{x}) \cdot m}, \quad (22)$$

де $\hat{E}_k = \text{diag}(\Delta_{N(\bar{x}_1)}, \dots, \Delta_{N(\bar{x}_i)}, \dots, \Delta_{N(\bar{x}_m)})$, $\bar{x}_k \in \{\bar{x}_i, i = 1, \dots, m\}$.

Твердження 3. $\max_{\bar{x} \in \chi} \Delta_{\hat{y}(\bar{x}, F, k+1)} \Big|_{\bar{b} \in Q_m} \forall \bar{x}_{k+1} \in \{\bar{x}_i, i = 1, \dots, m\}$ не зростає при $\Delta_{N(\bar{x}_i)} \rightarrow \min$.

Твердження 4. Достатньою умовою для $\max_{\bar{x} \in \chi} \Delta_{\hat{y}(\bar{x}, F, k+1)} \Big|_{\bar{b} \in Q_m} = 0$ є умова $\Delta_{N(\bar{x}_i)} = 0 \forall \bar{x}_i, i = 1, \dots, m$.

Доведені у дисертації твердження 3 та 4 дозволяють формально записати процедуру вибору розв'язку \bar{x}^0 задачі (20) у вигляді

$$\bar{x}^0 = \arg \max_{\bar{x}_i, i=1..m} \left\{ \max_{\bar{x} \in \chi} \Delta_{\hat{y}(\bar{x}, F, k)} \Big|_{\bar{b} \in Q_m} - \max_{\bar{x} \in \chi} \Delta_{\hat{y}(\bar{x}, F, k+1)} \Big|_{\bar{b} \in Q_m} \right\}, \quad (23)$$

за умови $\hat{E}_{k+1} = \text{diag}(\Delta_{N(\bar{x}_1)}, \dots, \Delta_{N(\bar{x}_i)} - \delta, \dots, \Delta_{N(\bar{x}_m)})$, $\bar{x}_k \in \{\bar{x}_i, i = 1, \dots, m\}$ чи $\hat{E}_{k+1} = \text{diag}(\Delta_{N(\bar{x}_1)}, \dots, \Delta_{N(\bar{x}_i)} \cdot \delta, \dots, \Delta_{N(\bar{x}_m)})$, $\bar{x}_k \in \{\bar{x}_i, i = 1, \dots, m\}$, де $\delta \ll \Delta_{N(\bar{x}_i)}$ – деяке задане число.

Вказана процедура забезпечує послідовну мінімізацію максимальної похибки прогнозування на будь-якій замкненій області рішень.

Для отримання оптимального розподілу повторних спостережень у точках насиченого плану експерименту за критерієм (21) в дисертації доведено такі важливі властивості функціоналу $V(F, \bar{x}_{k+1})$: $V(F, \bar{x}_{k+1}) \geq 0 \forall F_m$ не зростає при

$\max_{\bar{x} \in \chi} \Delta_{\hat{y}(\bar{x}, F, k+1)} \Big|_{\bar{b} \in Q_m} \rightarrow \min$; достатньою умовою для $V(F, \bar{x}_{k+1}) = 0$ є умова

$\max_{\bar{x} \in \chi} \Delta_{\hat{y}(\bar{x}, F, k+1)} \Big|_{\bar{b} \in Q_m} = 0$; $V(F, \bar{x}_{k+1}) \geq 0 \forall F$, $\forall \bar{x}_{k+1} \in \{\bar{x}_i, i = 1, \dots, m\}$ не зростає при

$\Delta_{N(\bar{x}_i)} \rightarrow \min$; достатньою умовою для $V(F, \bar{x}_{k+1}) = 0$ є умова $\Delta_{N(\bar{x}_i)} = 0 \forall \bar{x}_i, i = 1, \dots, m$.

Спираючись на отримані властивості функціоналу $V(F, \bar{x}_{k+1})$, можемо стверджувати, що послідовна мінімізація елементів $\Delta_{N(\bar{x}_1)}, \dots, \Delta_{N(\bar{x}_i)}, \dots, \Delta_{N(\bar{x}_m)}$ матриці \hat{E}_{k+1} в формулі (21) забезпечує зменшення потужності множини рівнозначних рішень, а оптимальний розподіл повторних спостережень в точках насиченого плану експерименту отримуємо із розв'язку

$$\bar{x}^0 = \arg \min_{\bar{x}_{k+1} \in \{\bar{x}_i, i=1..m\}} \{V(F, \bar{x}_{k+1})\}, \quad (24)$$

при рівномірному зменшенні значень ширини результуючих інтервалів $\Delta_{N(\bar{x}_1)}, \dots, \Delta_{N(\bar{x}_i)}, \dots, \Delta_{N(\bar{x}_m)}$ на однакову величину $\delta \ll \Delta_{N(\bar{x}_i)}$ за умови $\Delta_{N(\bar{x}_i)} - \delta$ чи $\Delta_{N(\bar{x}_i)} \cdot \delta$.

Оцінка ефективності запропонованих методів побудови послідовних оптимальних планів проводилась у порівнянні з іншими відомими методами на основі показників ефективності:

$$Ef(N) = \frac{\max_{\bar{x} \in \chi} \Delta \hat{y}(\bar{x}, F_{DIFF}, k) |_{\bar{b} \in Q_m} - \max_{\bar{x} \in \chi} \Delta \hat{y}(\bar{x}, F_{OPTIM}, k) |_{\bar{b} \in Q_m}}{\max_{\bar{x} \in \chi} \Delta \hat{y}(\bar{x}, F_{OPTIM}, k) |_{\bar{b} \in Q_m}} \cdot 100\% - \quad (25)$$

для послідовних I_G -оптимальних планів та

$$Ef(N) = \frac{V(F_{DIFF}, \bar{x}_{k+1}) - V(F_{OPTIM}, \bar{x}_{k+1})}{V(F_{OPTIM}, \bar{x}_{k+1})} \cdot 100\% - \quad (26)$$

для задач оптимізації інтервальних моделей контролю порогових рівнів та вибору оптимальних параметрів систем за критеріями (12) чи (13), де N – загальна кількість вимірювань; F_{DIFF} – матриці планів для різних методів організації послідовних експериментів (рівномірний розподіл вимірювань в точках спектра насиченого плану – "unif", метод випадкового генерування точок спостережень на множині \bar{x}_i ($i = 1, \dots, m$) – "rand"); F_{OPTIM} – матриці відповідних оптимальних планів.

У табл. 1 наведено результати порівняння ефективності розроблених методів та відомих для неповної квадратичної моделі статичної системи з одним виходом і двома входами.

Ефективність запропонованих методів побудови послідовних планів для задач оптимізації інтервальних моделей підтверджена результатами комп'ютерного моделювання.

Таблиця 1. Ефективність послідовних планів

К-сть вимірювань, N	Метод послідовного панування експерименту					
	I_G -оптимальний порівняно з unif	I_G -оптимальний порівняно з rand	у задачі (8) порівняно з unif	у задачі (8) порівняно з rand	у задачі (13) порівняно з unif	у задачі (13) порівняно з rand
5	9,62	9,62	6,65	3,22	12,10	22,38
10	17,83	17,83	19,50	19,03	21,62	34,95
50	25,94	26,76	26,08	77,34	41,96	100
100	83,63	80,56	27,29	53,14	65,08	187,16
500	35,50	24,05	22,86	38,37	-	-
1000	48,26	45,55	49,04	44,23	-	-
2000	65,17	39,90	14,04	29,83	-	-
середнє	40,85	34,90	23,64	37,88	42,49	90,56

У четвертому розділі наведено результати синтезу послідовних планів для задач побудови та оптимізації інтервальної моделі енергетичної характеристики високочастотних магнітних підсилювачів імпульсних джерел електроживлення та інтервальної моделі поля концентрацій окислів азоту, що використовується для задачі екологічного моніторингу, а також подано структуру розробленого програмного забезпечення та електронний каталог оптимальних планів.

Для розробки та дослідження схемотехнічних та структурних рішень уніфікованого за сукупністю вихідних потужностей та конструктивних рішень ряду джерел вторинного електроживлення (ДВЕЖ) з виходом на постійному струмі необхідно побудувати енергетичну характеристику високочастотних магнітних підсилювачів (ВМП), які є однією з основних складових цих пристроїв.

Розв'язання цієї задачі вимагає досить трудомістких експериментальних досліджень, пов'язаних з розробкою та дослідженням значної кількості електронних пристроїв в різних діапазонах вихідних потужностей.

Базова схема ДВЕЖ наведена на рис. 3, а, а її функціонування пояснюють осцилограми, наведені на рис. 3, б.

Енергетична характеристика $E(U_{bx}, I_n)$ – це вольт-секундна характеристика ВМП, в якій зіставлено вхідна напруга U_{bx} , силовий струм I_n , що визначається навантаженням, та необхідна енергія для забезпечення сили даного струму в робочому циклі ВМП. Вона представлена площею ΔS на рис. 3, б.

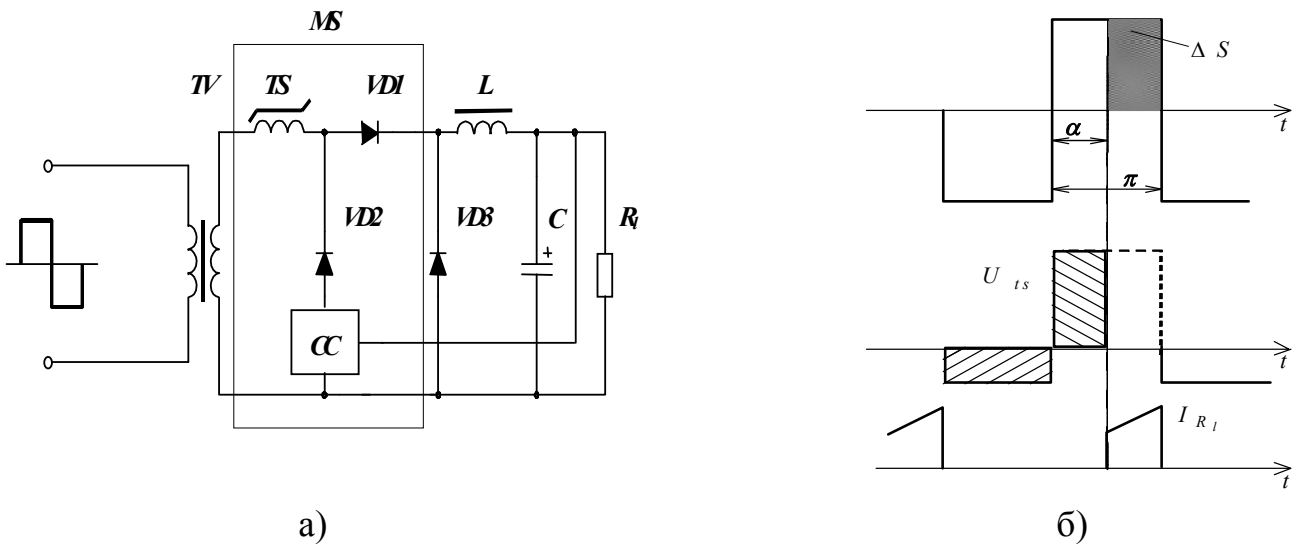


Рис.3. ДВЕЖ на базі ВМП:

а) базова схема; б) осцилограми, що пояснюють принцип роботи.

Згідно з апріорним аналізом залежності енергетичної характеристики від струму навантаження та вхідної напруги, для її представлення вибрано квадратичну модель

$$E(U_{bx}, I_n) = \beta_0 + \beta_1 U_{bx} + \beta_2 I_n + \beta_3 U_{bx}^2 + \beta_4 I_n^2. \quad (27)$$

Значення напруги для ряду стабілізаторів постійної напруги знаходились у межах $10 \leq U_{bx} \leq 50$ В, а струму – $5 \leq I_n \leq 50$ А.

На основі даних насиченого I_G -оптимального експерименту (табл. 2) отримано таку інтервальну модель

$$[E(U_{bx}, I_n)] = 191,837 + 83,672U_{bx} + 24,928I_n - 38,616U_{bx}^2 + 15,379I_n^2 \pm 0,5\Delta_{\hat{E}(U_{bx}, I_n, F)},$$

$$\text{де } \Delta_{\hat{E}(U_{bx}, I_n, F)} = 2 \cdot (1610,1 + 232,1U_{bx} - 232,1I_n - 667U_{bx}I_n - 1209,5U_{bx}^2 - 1209I_n^2 + 230U_{bx}^2I_n - 230I_n^2 \times U_{bx} - 22U_{bx}^2I_n^2 + 430U_{bx}^3 - 430I_n^3 + 810U_{bx}^4 + 1810I_n^4)^{1/2}.$$

Таблиця 2. Результати вимірювань в точках насиченого плану

№ точки	x_1	x_2	U_{bx} , В	I_H , А	E
1	1	1	50	50	277,2
2	-0,227	1	25,46	50	211,16
3	-1	0,227	10	32,61	76
4	-1	-1	10	5	60
5	0,386	-0,386	37,72	18,815	211,05

Проведення послідовного I_G -оптимального експерименту, тобто повторних вимірювань, дозволило компенсувати випадкові коливання напруги мережі.

Як видно з табл. 3, у результаті проведення 100 повторних вимірювань ширина зменшилась майже у 7,5 разів.

Таблиця 3. Максимальна ширина коридору значень енергетичної характеристики

Кількість повторних вимірювань, N	0	10	20	30	50	80	100
Максимальна похибка, В/с	112,3	66,2	38,1	26,3	25,2	15,3	15,3

Розглянуто в дисертації інше застосування розроблених методів, для задач контролю рівня шкідливих забруднень атмосфери лабораторіями СЕС міста.

Одним з основних завдань цих лабораторій є контроль перевищень допустимих норм забруднень атмосфери як транспортом, так і промисловими підприємствами. Однак вимірювання концентрацій шкідливих викидів із застосуванням наявних в лабораторіях СЕС спектроаналізаторів відзначається надзвичайно високою вартістю і достатньо низькою точністю. Останнє досить часто є приводом до відмови у позові до винуватців (промислових підприємств – забруднювачів навколишнього середовища) щодо компенсації нанесених екології збитків.

За цих умов актуальним завданням для більшості СЕС є мінімізація кількості вимірювань концентрацій шкідливих викидів і в той же час забезпечення високої точності встановлення ділянок, де є перевищення допустимих норм.

У дисертації розглянуто інтервальну модель концентрацій окислів азоту – шкідливих викидів в атмосферу у місті Тернополі. Пороговий рівень викидів в атмосферу цієї речовини (гранично-допустима концентрація) складає $0,085 \text{ мг/м}^3$. За допустиму область рішень χ прийнято центральну частину міста Тернополя. Відносні значення координат для фрагмента схеми міста знаходилися в межах $0 \leq x \leq 2500$ та $0 \leq y \leq 1500$.

Запропоновані лабораторії СЕС точки для вимірювання концентрацій окислів азоту, сформовані на основі розробленого електронного каталогу оптимальних планів, наведено на схемі досліджуваного фрагмента території міста на рис. 4 (точки 1-5).

На основі даних проведеного лабораторією СЕС насиченого I_G -оптимального експерименту (табл.4) отримано інтервальну критеріальну функцію у такому вигляді:

$$[\hat{K}(x, y)] = 0,097 + 0,0001545x + 0,038y - 0,004944x^2 - 0,031y^2 \pm 0,5\Delta_{\hat{K}(x, y, F)}, \quad (28)$$

де $\Delta_{\hat{K}(x, y, F)} = 2,236 \cdot 10^{-3} \cdot (260,123 - 60,994 \cdot x - 16,416 \cdot y - 168,872 \cdot x \cdot y - 189,731 \cdot x^2 - 144,585 \cdot y^2 + 24,754 \cdot x \cdot y^2 + 11,460 \cdot y \cdot x^2 - 273,942 \cdot x^2 \cdot y^2 + 184,154 \cdot x^3 + 22,482 \cdot y^3 + 423,259 \cdot x^4 + 300,348 \cdot y^4)^{1/2}$.



Рис.4. Фрагмент схеми міста Тернополя

Таблиця 4. Результати вимірювань в точках насиченого плану

Вулиця	Збаразька	Гоголя	Замонастирська	Парк Нац. Відродження	Ген. Гарнавського
$K, \text{мг/м}^3$	0,099	0,1055	0,0988	0,023	0,077

Графічно ця модель проілюстрована на рис. 5.

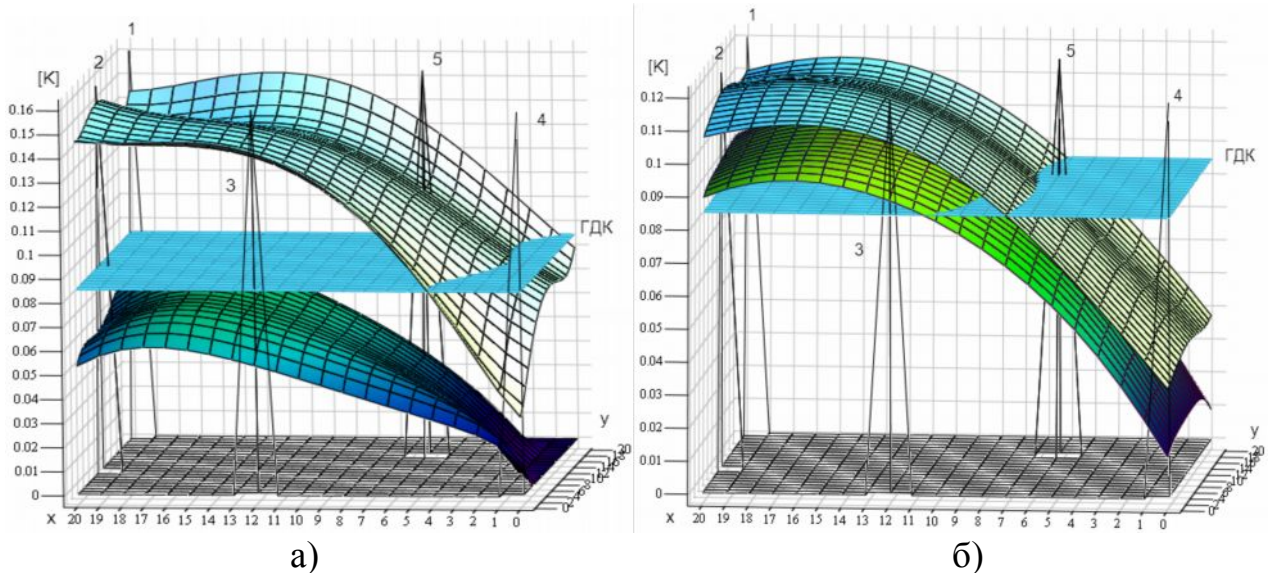


Рис. 5. Модель контролю порогового рівня окислу азоту:
а) початкова; б) кінцева.

Як видно із рис. 5, а, початкова інтервальна критеріальна функція включає область нерозпізнаних рішень майже на всій області визначення, що не дозволяє прийняти рішення про наявність чи відсутність перевищень ГДК. Тому проведено додаткові 50 вимірювань, що забезпечили оптимізацію початкової критеріальної функції (див. рис. 5, б) і зменшення об'єму області рівнозначних рішень у 6,45 разів

(табл. 5). Значення об'єму області нерозпізнаних рішень представлені у кількостях одиничних паралелепіпедів, на які розбита ця область.

Таблиця 5. Об'єм області рівнозначних рішень

Кількість повторних вимірювань (N)	0	10	20	30	40	50
Об'єм області (V)	355	227	120	80	79	55

Отже, результуюча інтервальна модель поля концентрацій окислів азоту дозволяє прийняти рішення про наявність чи відсутність (див. рис. 4) перевищення ГДК окислів азоту майже на всій території дослідження.

У додатках подано документи, що підтверджують впровадження результатів наукових досліджень дисертації, наведено коди програм генерування насичених I_G -оптимальних планів та послідовних планів, що розроблені в ході дисертаційного дослідження, а також систематизовані таблиці I_G -оптимальних насичених планів.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі розв'язано важливу науково-технічну задачу створення методів планування експериментів з інтервальними даними, що оптимізують математичні моделі для задач ПР за критеріями мінімізації потужності множин рішень. Розроблені методи послідовного планування експериментів дозволяють будувати та оптимізувати математичні моделі статичних об'єктів для задач ПР на основі інтервальних даних у різних сферах, зокрема екологічного моніторингу, проектування технічних пристроїв та ін. з мінімальними витратами. Основні наукові результати та висновки дисертаційного дослідження:

1. Проведено аналіз методів побудови математичних моделей для задач ПР, зокрема математичних моделей критеріальних функцій, що будуються за результатами експерименту в умовах невизначеності. Показано необхідність використання методів інтервального аналізу для побудови цих моделей за умов невідомих статистичних характеристик похибок.

2. Досліджено критерії оптимальності та методи планування регресійних та інтервальних експериментів. Показано їх непридатність для побудови моделей для задач ПР. Побудовано математичні моделі критеріїв для задачі контролю порогових рівнів параметрів статичної системи та задачі вибору оптимального рішення на основі критерію мінімуму або максимуму, які спрямовані, на відміну від існуючих, на оптимізацію потужності множин рівнозначних рішень у випадку представлення експериментальних даних в інтервальному вигляді.

3. Обґрунтовано для побудови моделей критеріальних функцій для задач ПР на основі аналізу інтервальних даних використання методу еліпсоїдальної локалізації області параметрів, що дозволить представити критеріальні функції в аналітичному вигляді і зменшити обчислювальні витрати на їхню побудову.

4. Розроблено метод побудови послідовних I_G -оптимальних планів, застосування якого забезпечує вигравш в середньому 34,8%, що підтверджує високу ефективність. При однаковій кількості спостережень запропонований метод порівняно з існуючими забезпечує меншу максимальну ширину коридору

критеріальних функцій щонайменше на 9,6%.

5. Розроблено метод побудови послідовних планів для задач контролю порогових рівнів параметрів систем, застосування якого забезпечує вигреш в середньому 23,6%, що підтверджує його високу ефективність. При однаковій кількості спостережень запропонований метод порівняно з існуючими забезпечує менший об'єм області рівнозначних рішень щонайменше на 3,22%.

6. Розроблено метод побудови послідовних планів для задач вибору оптимальних параметрів системи на основі критерію мінімуму або максимуму, застосування якого забезпечує вигреш в середньому 25,6%, що підтверджує його високу ефективність. При однаковій кількості спостережень запропонований метод у порівнянні з існуючими забезпечує меншу область рівнозначних рішень щонайменше на 12,10%. Ефективність запропонованих методів побудови послідовних планів для задач ПР підтверджена результатами комп'ютерного моделювання.

7. Побудовано інтервальну модель енергетичної характеристики високочастотних магнітних підсилювачів уніфікованого ряду імпульсних джерел електроживлення на основі методу планування насиченого I_G -оптимального експерименту та виконано її оптимізацію за критерієм підвищення точності на основі послідовного I_G -оптимального експерименту. Використання методики вибору насичених I_G -оптимальних планів та методу і алгоритму побудови послідовних I_G -оптимальних планів експерименту дозволило знизити собівартість кожного джерела живлення на 12% за рахунок оптимального вибору ВМП на основі енергетичної характеристики.

8. Побудовано та оптимізовано математичну модель поля концентрацій окислів азоту, що використовується для задачі екологічного моніторингу, на основі запропонованого методу планування послідовного експерименту, що дозволило зменшити витрати на проведення експериментальних вимірювань лабораторіями СЕС і забезпечило можливість прийняття рішення про наявність або відсутність перевищення ГДК даної речовини на досліджуваній ділянці м.Тернополя.

9. Розроблено програмний комплекс для реалізації та досліджень оптимальних послідовних планів для побудови та оптимізації моделей у задачах прийняття оптимальних рішень, а також електронний каталог I_G -оптимальних та наближених до них насичених планів експериментів, які дозволяють задавати спектри оптимальних планів для побудови моделей у задачах ПР для різних критеріальних функцій.

СПИСОК ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Дивак М.П., Пукас А.В., Яськів В.І. Планування оптимального експерименту для побудови інтервальної моделі енергетичної характеристики високочастотних магнітних підсилювачів імпульсних джерел живлення // Вісник Тернопільського державного технічного університету. – Тернопіль, 2006. – Том 11, № 3. – С. 169 – 177.
2. Дивак М.П., Пукас А.В., Сапожник Г.В. Оптимальна адаптивна процедура прийняття рішень на основі інтервальних моделей // Відбір і обробка інформації. – 2006. – №100. – С. 15-21.

3. Дивак М.П., Пукас А.В., Шпінталь М.Я. Послідовне планування експериментів для побудови інтервальних моделей прийняття рішень // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Радіоелектроніка та телекомунікації. – 2005. – №534. – С.138-147.
4. Дывак Н.П., Пукас А.В. Последовательное планирование I_G -оптимальных экспериментов для построения интервальных моделей статических систем // Проблемы управления и информатики. – 2004. – №5. – С. 31-38.
5. Дивак М.П., Пукас А.В. Таблиці оптимальних планів експерименту у випадку локалізації області параметрів інтервальної моделі // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2002. – №2. – С. 181-190.
6. Dyvak M., Pukas A. Interval model in task of environmental impact assessment // The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics. Proc. of the IX Intern. Conf. –Lviv-Polyana: National University „Lviv Polytechnic”, 2007. – P. 479-483.
7. Dyvak M., Pukas A., Yaskiv V., Gurnik O. Interval model of power characteristic of high-frequency magnetic amplifier of pulse power supplies // Computational Problems of Electrical Engineering. Proc. of the V Intern. Workshop. – Odessa, 2006. – P. 22-25.
8. Dyvak M., Pukas A. Estimation of efficiency of adaptive procedure of creation of interval models for decisions support // Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science. Proc. of the VII Intern. Conf. TCSET'2006. – Lviv-Slavsko: National University „Lviv Polytechnic”, 2006. – P. 173-175.
9. Dyvak M., Pukas A. Criterion of design of experiments for tasks of decision support interval model creation // Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications. Proc. of the III Intern. Workshop. – Sofia (Bulgaria), 2005. – P. 495-497.
10. Dyvak M., Pukas A. Optimum interactive procedure of decision support based on unimodal interval models of criterion // Proc. of the XIII Intern. Symposium on Theoretical Electrical Engineering ISTET'05. – Lviv: National University „Lviv Polytechnic”, 2005. – P. 259-263.
11. Dyvak M., Pukas A. Design of experiments for creation of interval model of decision support systems // The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics. Proc. of the VIII Intern. Conf. –Lviv-Polyana: National University „Lviv Polytechnic”, 2005.–P. 318-321.
12. Дивак М.П., Пукас А.В. Послідовне планування I_G -оптимальних експериментів для побудови інтервальних моделей статичних систем // Наукові космічні дослідження: Школа-семінар для молодих науковців: Матеріали виступів. – К.: ІВЦ "Видавництво "Політехніка", 2004. – С. 50-51.
13. Dyvak M., Pukas A. Design of experiment for tasks of the ecological monitoring systems // Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science. Proc. of the VI Intern. Conf. TCSET'2004. – Lviv-Slavsko: National University „Lviv Polytechnic”, 2004. – P. 67-69.
14. Dyvak M., Pukas A., Mangula V. Estimation efficiency of optimal localization designs

for interval models synthesis // Computational Problems of Electrical Engineering. Proc. of the V Intern. Workshop. – Jazleevets, 2003. – P. 86-88.

15. Дивак М.П., Пукас А.В., Манжула В.І. Оцінка ефективності застосування оптимальних локалізаційних планів при побудові інтервальних моделей статичних систем // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. Тези ІХ науково-техн. конф. – Хмельницький: ТУП, 2003. – С. 8.
16. Dyvak M., Pukas A. Identification of the static system interval models by application of optimal localization experiment // The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics. Proc. of the VII Intern. Conf. –Lviv-Slavske: National University „Lviv Polytechnic”, 2003. – P. 180-184.

АНОТАЦІЯ

Пукас А.В. Методи планування експериментів для оптимізації математичних моделей на основі інтервальних даних. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи. – Національний університет "Львівська політехніка", Львів, 2007.

Дисертаційна робота присвячена розробці методів послідовного планування експериментів для оптимізації математичних моделей статичних систем, коли дані представлені в інтервальному вигляді.

Розроблені методи планування послідовних експериментів використовуються для побудови та оптимізації критеріальних функцій за умов невизначеності для задачі контролю порогових рівнів параметрів систем, задачі вибору оптимальних параметрів статичних систем на основі критерію мінімуму або максимуму та задачі послідовного I_G -оптимального планування. Вони реалізуються у два етапи: проведення мінімальної кількості спостережень, необхідних для побудови критеріальної функції, тобто насиченого I_G -оптимального експерименту; проведення додаткових спостережень з метою оптимізації інтервальних критеріальних функцій.

Ключові слова: планування експериментів, математична модель, інтервальна критеріальна функція, послідовний план, критерій оптимальності, задача прийняття рішень.

АННОТАЦИЯ

Пукас А.В. Методы планирования экспериментов для оптимизации математических моделей на основании интервальных данных. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.05.02 – математическое моделирование и вычислительные методы. – Национальный университет "Львовская политехника", Львов, 2007.

Диссертационная работа посвящена разработке методов последовательного планирования экспериментов для оптимизации математических моделей статических систем, когда данные представлены в интервальном виде.

В работе проанализировано существующие методы планирования экспериментов в условиях неопределенности и показано отсутствие методов последовательного планирования экспериментов для оптимизации критеріальних

функций в интервальном виде, которые можно использовать для задач принятия решений.

Разработанные критерии оптимальности, методы и алгоритмы планирования последовательных экспериментов используются для построения и оптимизации критериальных функций в условиях неопределенности для задачи контроля пороговых уровней параметров систем, задачи выбора оптимальных параметров статических систем на основании критерия минимума или максимума и задачи последовательного I_G -оптимального планирования. Они реализуются в два этапа: проведение минимального количества наблюдений, необходимых для построения критериальной функции, то есть насыщенного I_G -оптимального эксперимента; проведения дополнительных наблюдений с целью оптимизации интервальных критериальных функций.

Разработанное программное обеспечение для реализации методов последовательного планирования экспериментов использовано для оптимизации интервальных моделей полей концентраций окисей азота и интервальных моделей энергетических характеристик высокочастотных магнитных усилителей в источниках вторичного электропитания.

Ключевые слова: планирование экспериментов, математическая модель, интервальная критериальная функция, последовательный план, критерий оптимальности, задача принятия решений.

ABSTRACT

Pukas A. V. Methods of design of experiments for mathematical model optimization on the basis of interval data. – Manuscript.

Thesis for a Ph.D. (candidate of science) degree by speciality 01.05.02 – mathematical modeling and computing methods. – Lviv Polytechnic National University, Lviv, 2007.

The dissertation work is devoted to development of methods of the sequential design of experiments for optimization of mathematical models of the static systems when data presented in an interval kind.

The developed methods of design of sequential experiments are used for construction and optimization of criterion functions subject to the condition uncertainty for the task of control of threshold levels of parameters of the systems, task of choice of optimum parameters of the static systems on the basis of criterion of minimum or maximum and task of the sequential I_G -optimal design. They are realized in two stages: conducting of the least of observations necessary for construction of criterion function, that is the saturated I_G -optimal experiment and conducting of additional observations with the purpose of optimization of interval criterion functions.

Keywords: design of experiments, mathematical model, interval criterion function, sequential design, criterion of optimum, decision support task.