

УДК 621.316; 519.242

М. Дивак¹, докт.техн.наук; В. Яськів², канд.техн.наук; А. Пукас¹¹Тернопільський державний економічний університет²Тернопільський державний технічний університет імені Івана Пулюя

ПЛАНУВАННЯ ОПТИМАЛЬНОГО ЕКСПЕРИМЕНТУ ДЛЯ ПОБУДОВИ ІНТЕРВАЛЬНОЇ МОДЕЛІ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВИСОКОЧАСТОТНИХ МАГНІТНИХ ПІДСИЛЮВАЧІВ

У даній статті розглядається задача планування оптимального експерименту для побудови інтервальної моделі універсальної енергетичної характеристики високочастотного магнітного підсилювача з метою подальшого її використання при створенні уніфікованого ряду напівпровідникових перетворювачів електроенергії в широкому діапазоні вихідних потужностей.

M. Dyvak; V. Yaskiv; A. Pukas

DESIGN OF OPTIMAL EXPERIMENT FOR A CONSTRUCTION OF INTERVAL MODEL OF POWER CHARACTERISTIC OF HIGH-FREQUENCY MAGNETIC AMPLIFIERS

The task of design of optimal experiment for creating of interval model of power characteristic of high frequency magnetic amplifier with purpose of subsequent its using for design of unified row of semiconducting power converters in wide range of output power are considered in this work.

I. Вступ

Розробці та дослідженню схемотехнічних та структурних рішень напівпровідникових перетворювачів електроенергії (НПЕ) з виходом на постійному струмі присвячено достатню кількість публікацій [1,3,5].

Однак створення уніфікованого ряду НПЕ на сьогодні залишається актуальною проблемою. Традиційно уніфікацію здійснюють за рядом вихідних потужностей та конструктивних рішень. В роботі [2] запропоновано побудову уніфікованого ряду НПЕ з урахуванням уніфікації елементної бази та схемотехнічних рішень. Реалізація цього підходу є можливою при використанні методів побудови НПЕ на основі високочастотних магнітних підсилювачів (ВМП) [3]. При цьому виникає задача оптимізації характеристик ВМП. Формально дана проблема зводиться до побудови енергетичних характеристик основних елементів регуляторів (стабілізаторів) - ВМП – з метою оптимізації масогабаритних та цінових характеристик осердь їх магнітопроводів.

Розв'язання даної проблеми вимагає достатньо трудомістких експериментальних досліджень, що пов'язані з розробкою та дослідженням значної кількості електронних пристроїв у різних діапазонах вихідних потужностей з максимальними питомими та енергетичними характеристиками при мінімальних економічних затратах.

Тому виникає актуальна проблема оптимального планування експериментальних досліджень, проведення яких дозволить побудувати енергетичну характеристику ВМП для повного ряду уніфікованих НПЕ в заданому діапазоні вихідних потужностей. Розв'язання даної проблеми дозволить не тільки зменшити витрати на експериментальні дослідження, але й оптимізувати згідно з побудованою моделлю вартісні і питомі характеристики створюваного уніфікованого ряду НПЕ.

II. Постановка задачі

У праці [2] запропоновано альтернативний підхід до створення уніфікованих джерел і систем вторинного електроживлення (ДВЕЖ і СВЕЖ), який базується на

використанні сучасних високочастотних аморфних сплавів з прямокутною петлею гістерезису в напівпровідникових перетворювачах електроенергії. Аналіз процесів перемагнічування в імпульсному регуляторі на основі ВМП зроблено в літературі [4]. Принцип роботи його базової схеми (рис.1.а) можна пояснити на основі наведених осцилограм (рис.1.б) [5].

Вхідний високочастотний нерегульований транзисторний інвертор забезпечує високочастотний меандр (50-100 кГц) на силовому трансформаторі, між вторинними півобмотками якого та анодами діодів вихідного високочастотного випрямляча ввімкнені обмотки ВМП. Робочий цикл ВМП забезпечується за рахунок рознесення в часі керуючого та робочого півперіодів випрямним VD1 та розмагнічуючим VD2 діодами. В півперіод керування, який відповідає від'ємному знаку високочастотної змінної напруги, відбувається розмагнічення дроселя насичення з обмеженням швидкості перемагнічування (режим джерела струму) в функції сигналу керування. При зміні знака напруги досягнутий рівень індукції запам'ятовується і починається робочий півперіод – перемагнічування в режимі е.р.с., який складається з двох ділянок: власне самого перемагнічування із запам'ятованого рівня індукції до індукції насичення B_s та насиченого стану ключа, під час якого в колі протікає силовий струм, що визначається опором навантаження. Широтно-імпульсна модуляція в робочий півперіод забезпечується зміною глибини розмагнічення в функції сигналу керування в півперіод керування, що зумовлює зміну співвідношення часів насиченого та ненасиченого станів дроселя насичення в межах одного періоду.

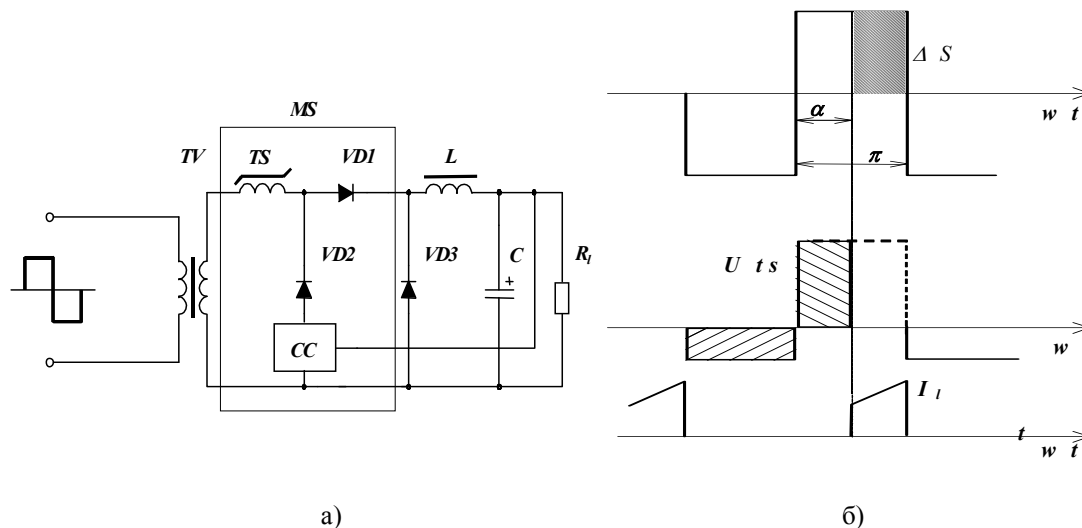


Рисунок 1 - а) Базова схема імпульсного регулятора напруги на ВМП; б) Осцилограми, що пояснюють принцип її роботи.

Переваги ВМП, що працює в режимі ключа, в порівнянні з транзисторним ключем є суттєвими [1].

Однак сам матеріал магнітопроводу ВМП порівняно дорогий (0,5-1 \$/грам). Так для стабілізатора постійної напруги з вихідними параметрами 5 В, 50 А затрати на осердя магнітопроводів ВМП знаходяться на рівні 10 \$. Крім того, як правило, кожен виробник цих матеріалів має свій ряд номіналів типорозмірів магнітопроводів. Тому на практиці часто зустрічаємось із надлишковою їх установленою потужністю. В той же час на сьогодні технологічно стало можливим виготовлення осердь магнітопроводів ВМП за даними замовника.

Аналіз принципів функціонування імпульсного регулятора напруги на ВМП показує, що оптимальні розміри магнітопроводів можна буде визначати шляхом використання універсальної енергетичної характеристики ВМП уніфікованого ряду ДВЕЖ. Вказана характеристика зіставляє вхідну напругу U_{bx} , силовий струм I_n , що

визначається навантаженням, та необхідну енергію $E(U_{bx}, I_n)$ для забезпечення сили даного струму в робочому циклі ВМП.

Тому виникає задача отримання універсальної енергетичної характеристики ВМП, придатної для використання при побудові уніфікованого ряду НПЕ.

Зауважимо, що для побудови енергетичної характеристики ВМП для уніфікованого ряду необхідно провести експериментальні дослідження багатьох приладів – НПЕ із різними як масо-габаритними, так і експлуатаційними характеристиками.

III. Методика експериментальних досліджень

Для отримання функціональної залежності $E(U_{bx}, I_n)$ використовували стабілізатори постійної напруги (5 В, 50 А; 10 В, 50 А; 15 В, 50 А), зібрані за функціональною схемою, наведеною на рис.2.

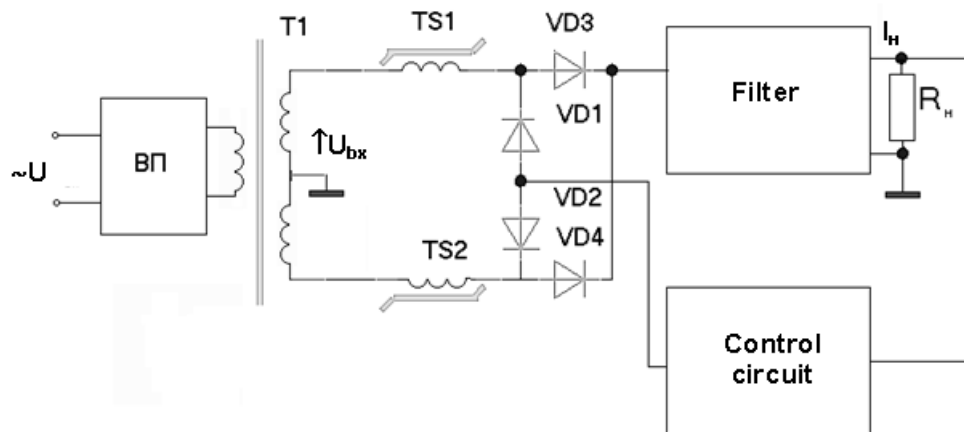


Рисунок 2 - Функціональна схема ДВЕЖ на основі ВМП.

Струми I_n задавалися активним навантаженням. Для їх вимірювання використовувався високоточний вольтметр типу В7-21А, а похибка вимірювання діючого значення амплітуди напруги U_{bx} вторинної обмотки високочастотного силового трансформатора T_1 врахована в похибці вимірювання вольтсекундної площі ΔS (див. рис. 1). Таким чином, похибками вимірювання струму I_n та вхідної напруги U_{bx} можна знехтувати. Вимірювання вольтсекундної площі ΔS , яка задає енергетичну характеристику ВМП і пропорційна вихідній потужності з врахуванням втрат в стабілізаторі, проводилося за допомогою інформаційно-вимірювального комплексу на базі ПК та цифрового осцилографа типу Good Will GDS-810S. При цьому похибка вимірювань включала дві складові: систематичну похибку, яка при попередньому калібруванні приладу була зведена до 1%, та приведену похибку, пов'язану із випадковим коливанням напруги мережі, що складала максимум 10%. Таким чином, аналіз похибок при вимірюванні енергії $E(U_{bx}, I_n)$ для забезпечення сили заданого струму в робочому циклі ВМП дозволив обґрунтувати прийняту гіпотезу про змішану інтервальну похибку вимірювань, яка використовується для побудови моделей „вхід-вихід” в інтервальному аналізі [6]. Екранна форма, отримана на цифровому пристрої із фрагментом осцилограми та результатів вимірювання, наведена на рис. 3.

З метою мінімізації кількості вимірювань, точки вимірювань вибирались відповідно до таблиць оптимальних планів для експериментів з інтервальними похибками вимірювань, наведених у праці [7].

IV. Інтервальна модель енергетичної характеристики ВМП

Розглянемо основні гіпотези, на яких побудовано інтервальну модель енергетичної характеристики ВМП $E(U_{bx}, I_n)$.

Нехай модель енергетичної характеристики ВМП можливо представити у вигляді лінійно-параметричного рівняння

$$E_0(U_{bx}, I_n) = \Phi^T(U_{bx}, I_n) \cdot \beta, \quad (1)$$

де E_0 - істинне невідоме значення енергетичної характеристики; U_{bx}, I_n - вхідні змінні величини: напруга та струм; $\Phi^T(U_{bx}, I_n)$ - відомий вектор базисних функцій; $\beta = (\beta_1, \dots, \beta_m)^T$ - невідомий вектор параметрів. Результати реалізації експерименту представляють в інтервальному вигляді

$$U_{bx_i}, I_{n_i}, [E_i^-; E_i^+], E_{0i} \in [E_i^-; E_i^+], i = 1, \dots, N, \quad (2)$$

де E_i^-, E_i^+ - відповідно нижня і верхня межі інтервалу значень енергетичної характеристики, N - кількість спостережень, яка у випадку насиченого експерименту співпадає з кількістю m невідомих параметрів моделі. Інтервальна похибка вимірювань є постійною, тобто $\Delta(U_{bx_i}, I_{n_i}) = 0,5 \cdot (E_i^+ - E_i^-) = \Delta, \forall i = 1, \dots, N, U_{bx_i}, I_{n_i} \in \chi$, причому область експерименту χ представлена n -вимірним кубом. За таких умов у випадку опрацювання результатів спостережень отримаємо інтервальні моделі статичної системи

$$\hat{E}(U_{bx}, I_n) = \Phi^T(U_{bx}, I_n) \cdot \hat{b}, \quad (3)$$

значення параметрів у яких належать множині

$$\Omega = \left\{ \hat{b} \in R^m \mid \hat{E}^- \leq F \cdot \hat{b} \leq \hat{E}^+ \right\},$$

де $\hat{E}^- = \{E_i^-, i = 1, K, N\}$, $\hat{E}^+ = \{E_i^+, i = 1, K, N\}$ - вектори, складені із нижніх та верхніх меж інтервалів $[E_i^-, E_i^+]$, відповідно; \hat{b} - вектор оцінок параметрів β моделі; $F = \{\varphi_j(U_{bx_i}, I_{n_i}), i = \overline{1, N}, j = \overline{1, m}\}$ - відома матриця значень базисних функцій.

Множина отриманих інтервальних моделей (3) після апроксимації області параметрів еліпсоїдом матиме вигляд коридору

$$[\hat{E}(U_{bx}, I_n)] = [\hat{E}^-(U_{bx}, I_n); \hat{E}^+(U_{bx}, I_n)], \quad (4)$$

де $\hat{E}^-(U_{bx}, I_n) = \Phi^T(U_{bx}, I_n) \cdot \hat{b} - \frac{1}{2} \Delta_{y(U_{bx}, I_n, F_m)} \Big|_{\hat{b} \in Q_m}$; $\hat{E}^+(U_{bx}, I_n) = \Phi^T(U_{bx}, I_n) \cdot \hat{b} + \frac{1}{2} \Delta_{y(U_{bx}, I_n, F_m)} \Big|_{\hat{b} \in Q_m}$ - нижня та верхня межі коридору;

$\Delta_{y(U_{bx}, I_n, F_m)} \Big|_{\hat{b} \in Q_m} = 2 \times \sqrt{\Phi^T(U_{bx}, I_n) \cdot (F_m^T \cdot \delta^{-2} \cdot F_m)^{-1} \cdot \Phi(U_{bx}, I_n) \cdot m}$ - похибка

прогнозування; $\delta = \text{diag}(\Delta_1, \dots, \Delta_i, \dots, \Delta_m)$ - діагональна матриця інтервальних похибок у точках вимірювань; $F_m = \{\varphi_j(x_i), i = \overline{1, m}, j = \overline{1, m}\}$ - квадратна матриця значень базових функцій, що задаватиме план насиченого експерименту.

Точність кожної із моделей визначається похибкою прогнозування $\Delta_{\hat{E}(U_{bx}, I_n, F)} = \hat{E}^+(U_{bx}, I_n) - \hat{E}^-(U_{bx}, I_n)$, що залежить від розмірів множини Ω і відповідно від вибору матриці F .

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

$$\hat{E}(U_{bx}, I_n) = b_0 + b_1 U_{bx} + b_2 I_n + b_3 U_{bx}^2 + b_4 I_n^2 \quad (5)$$

Значення напруги для ряду стабілізаторів постійної напруги знаходились у межах $10 \leq U_{bx} \leq 50$ В, а струму – $0 \leq I_n \leq 50$ А.

Щоб побудувати інтервальну модель енергетичної характеристики виду (5) необхідно провести як мінімум $N=m=5$ вимірювальних експериментів. Оскільки невідомі апріорні статистичні характеристики похибки вимірювань, то для мінімізації кількості вимірювань виберемо план насиченого експерименту, який забезпечує мінімізацію максимальної похибки прогнозування моделі, тобто насичений I_G -оптимальний план.

Враховуючи тип вибраної моделі (5) (неповна квадратична модель), I_G -оптимальний насичений план експерименту можемо отримати із таблиці [6], попередньо пронормувавши вхідні змінні U_{bx}, I_n :

$$x_1 = 2 \frac{U_{bx} - U_{bx}^{min}}{U_{bx}^{max} - U_{bx}^{min}} - 1, x_2 = 2 \frac{I_n - I_n^{min}}{I_n^{max} - I_n^{min}} - 1 \quad (6)$$

Матриця I_G -оптимального насиченого плану

$$X^T = \begin{pmatrix} 1 & -0,227 & -1 & -1 & 0,386 \\ 1 & 1 & 0,227 & -1 & -0,386 \end{pmatrix}.$$

Область експерименту після масштабування задано у вигляді квадрату: $-1 \leq x_1 \leq 1, -1 \leq x_2 \leq 1$.

Тоді модель (5) для нормованих вхідних змінних матиме такий вигляд:

$$\hat{E}(x_1, x_2) = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_3 \cdot x_1^2 + b_4 \cdot x_2^2$$

Реальні значення напруги та струму відповідно до I_G -оптимального насиченого плану для вимірювання енергетичної характеристики, якщо $U_{bx}^{min} = 10$ В, $U_{bx}^{max} = 50$ В, $I_n^{min} = 5$ А, $I_n^{max} = 50$ А, визначались згідно з формулами (6):

$$U_{bx} = \frac{1}{2}(x_1 + 1)(U_{bx}^{max} - U_{bx}^{min}) + U_{bx}^{min}, I_n = \frac{1}{2}(x_2 + 1)(I_n^{max} - I_n^{min}) + I_n^{min}$$

Результати вимірювань наведено в таблиці 1.

Таблиця 1 - Результати вимірювань в точках насиченого плану

№ точки	x_1	x_2	U_{bx} , В	I_n , А	Е
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

Осцилограми в одній з точок вимірювань наведено на рисунку 3.

Однак, в зв'язку з наявністю похибки вимірювань для побудови інтервальної моделі було сформовано інтервальні значення в точках вимірювань, виходячи з похибки у 10% максимального значення енергетичної характеристики.

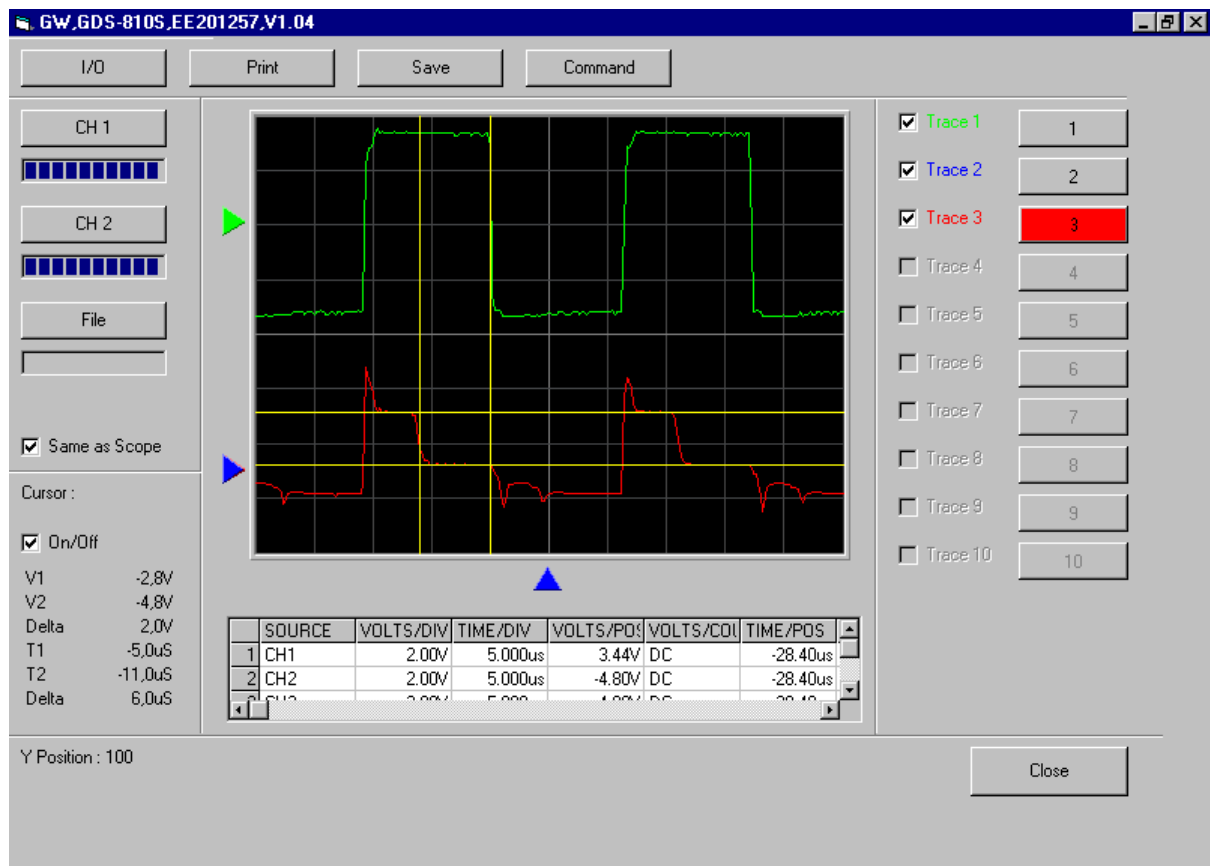


Рисунок 3 - Осцилограми для визначення енергетичної характеристики.

На основі даних насиченого I_G -оптимального експерименту будемо інтервальну модель (рис. 4)

$$[E(U_{bx}, I_H)] = 191,837 + 83,672U_{bx} + 24,928I_H - 38,616U_{bx}^2 + 15,379I_H^2 \pm \frac{1}{2} \Delta \hat{E}(U_{bx}, I_H, F),$$

де

$$\Delta \hat{E}(U_{bx}, I_H, F) = 2 \cdot \sqrt{1610,1 + 232,1U_{bx} - 232,1I_H - 667U_{bx}I_H - 1209,5U_{bx}^2 - 1209I_H^2 + 230U_{bx}^2I_H - 230I_H^2 \times U_{bx} - 22U_{bx}^2I_H^2 + 430U_{bx}^3 - 430I_H^3 + 810U_{bx}^4 + 1810I_H^4}$$

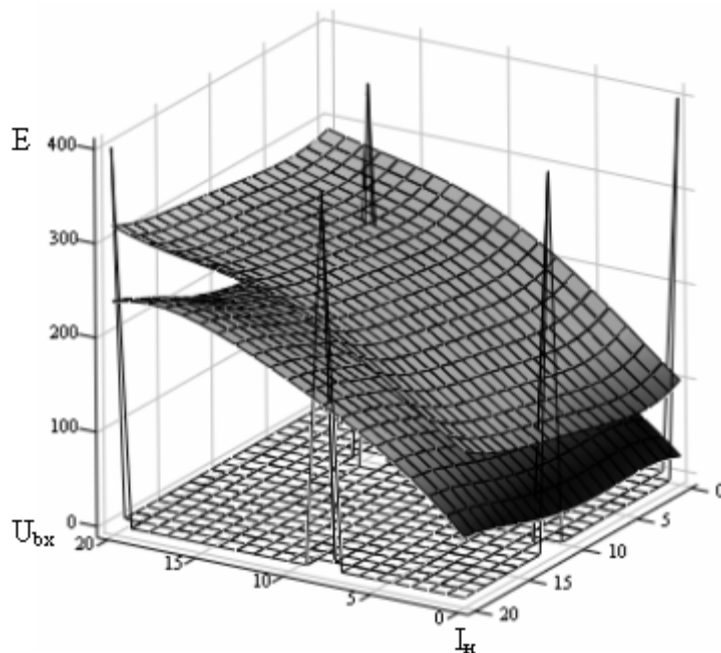


Рисунок 4 - Інтервальна модель енергетичної характеристики.

Як видно з рисунка 4, максимальна похибка прогнозування моделі є значною.

Тому для мінімізації цієї похибки запропоновано провести послідовний I_G -оптимальний експеримент, тобто провести повторні вимірювання для зменшення приведеної похибки в точках вимірювань. Метод проведення послідовного I_G -оптимального експерименту наведено в праці [8]. Даний метод передбачає після побудови початкової моделі проведення експерименту за таким алгоритмом:

Крок 1. Визначення точки на області експерименту, в яких похибка прогнозування максимальна.

Крок 2. Перевірка точності інтервальної моделі. Якщо $\max_{x \in \chi} \Delta_{y(x,F,k)} \Big|_{b \in Q_m} \leq \Delta_{max}$, де Δ_{max} – допустима максимальна похибка прогнозування на області експерименту, то – кінець експерименту. В протилежному випадку перехід на наступний крок.

Крок 3. Визначення точки повторного вимірювання згідно з наступним виразом

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

$$\text{де } \Delta_{y(x,F,k+1)} \Big|_{b \in Q_m} = 2 \cdot \sqrt{\Phi^T(x) \cdot (F^T \cdot E_{k+1}^{-2} \cdot F)^{-1} \cdot \Phi(x) \cdot m},$$

$$E_{k+1} = \text{diag}(\Delta_{N(x_1)}, \dots, \Delta_{N(x_i)} - \delta, \dots, \Delta_{N(x_m)}), \quad x_k \in \{x_i, i=1, \dots, m\}.$$

Крок 4. Реалізація експерименту в точці x^0 і перехід на крок 1.

У таблиці 2 наведено значення максимальної похибки прогнозування після проведення 100 повторних вимірювань в точках насиченого плану.

Таблиця 2 - Максимальна похибка прогнозування

Кількість повторних вимірювань	0	10	20	30	50	80	100
Максимальна похибка, В/с	112,348	66,213	38,078	26,336	25,170	15,348	15,348

Як видно з таблиці 2 та рисунка 5, проведення послідовного експерименту дозволило підвищити точність моделі більше ніж у 7 разів.

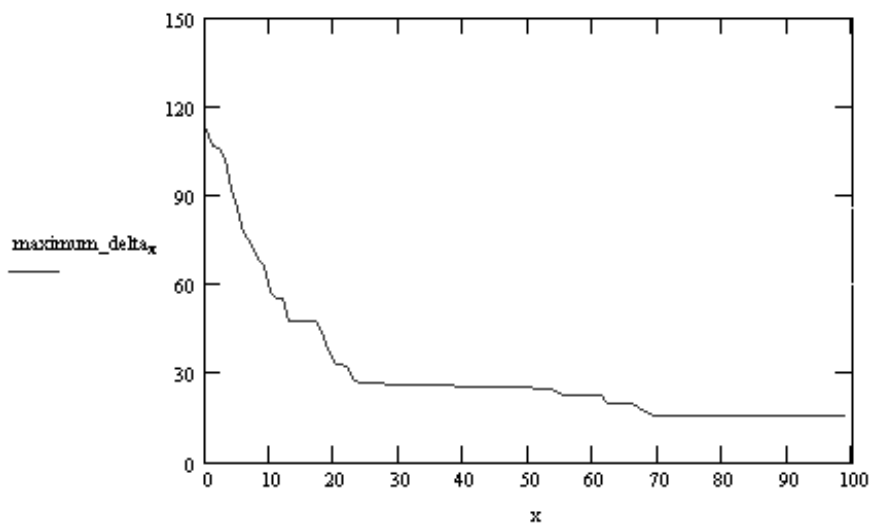


Рисунок 5 - Графік зміни максимальної похибки прогнозування моделі при збільшенні кількості повторних вимірювань.

Графічне представлення похибки прогнозування наведено на рис.6.

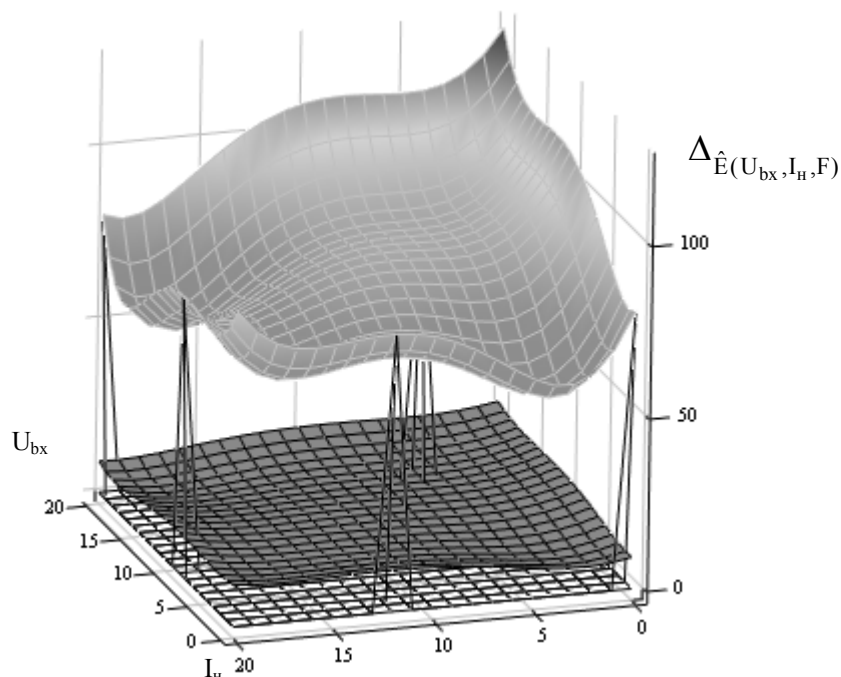


Рисунок 6 - Графік зміни максимальної похибки прогнозування на області експерименту до та після повторних вимірювань.

Результуюча інтервальна модель енергетичної характеристики наведена на рис. 7.

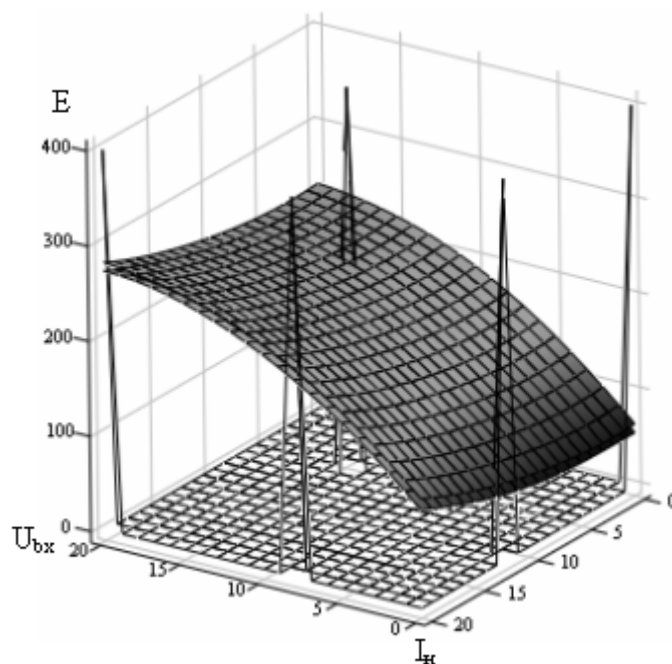


Рисунок 7 - Інтервальна модель енергетичної характеристики після повторних вимірювань.

Висновки

У статті розглянуто задачу планування оптимального експерименту для побудови інтервальної моделі універсальної енергетичної характеристики високочастотного магнітного підсилювача з метою подальшого її використання при створенні уніфікованого ряду імпульсних вторинних джерел електроживлення в широкому діапазоні вихідних потужностей. Запропонований метод проведення

експерименту дозволив мінімізувати витрати на побудову моделі енергетичної характеристики ВМП для ДВЕЖ.

Література

1. Яськів В.І. Нові методи проектування імпульсних джерел вторинного електроживлення засобів комп'ютерної техніки // "Теоретична електротехніка", Збірник наукових праць. - Випуск 56 - Львівський національний університет імені Івана Франка, 2002. - С. 135-141.
2. В.Яськів. Нові підходи при вирішенні задачі розробки уніфікованого ряду джерел вторинного електроживлення // Матеріали шостої наукової конференції Тернопільського державного технічного університету імені Івана Пулюя, Тернопіль, 24-26 квітня, 2002. - С.100.
3. Volodymyr Yaskiv. Using of High-Frequency Magnetic Amplifier in Switch Mode DC Power Supplies // Proceedings of the 35th Annual IEEE Power Electronic Specialists Conference (PESC'04), Aachen, Germany, 2004, p. 1658-1662.
4. Яськів В.І. Математична модель імпульсного стабілізатора напруги на магнітних ключах // "Технічна електродинаміка". - №6ю - 2002 р. - С. 20-22.
5. K. Harada, T. Nabeshima. Applications of magnetic amplifiers to high-frequency dc-to-dc converters. Proc. of the IEEE, 1988, vol. 76, N. 4, p. 355-361.
6. Design of experiments and data analysis: New trends and results / Letzky E.K., Voshinin A.P., Dyvak N.P., Simoff S.J., Orlov A.I., Gorsky V.G., Nikitina E.P., Nosov V.N./ Edited by E.K. Letzky. – Moscow.: ANTAL, 1993 – 192p.
7. Дывак 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.
8. 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.

Одержано 27.06.2006 р.