

УДК 621.314

В.І. Яськів¹, д. т. н., доц., М.П. Дивак², д. т. н., проф., А.В. Яськів², к. т. н.¹ Тернопільський національний технічний університет імені Іван Пулюя² Західноукраїнський національний університет

**МОДЕЛЮВАННЯ ТА ЧИСЕЛЬНА ОПТИМІЗАЦІЯ ПИТОМИХ
ХАРАКТЕРИСТИК ОСЕРДЬ ВИСОКОЧАСТОТНИХ МАГНІТНИХ
ПІДСИЛЮВАЧІВ ПРИ ПОБУДОВІ УНІФІКОВАНОГО РЯДУ
ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ НАПРУГИ**

V.I. Yaskiv, Dr., Assoc. Prof., M.P. Dyvak, Dr., Prof., A.V. Yaskiv, PhD

**SIMULATION AND NUMERICAL OPTIMIZATION OF SPECIFIC
CHARACTERISTICS OF HIGH-FREQUENCY MAGNETIC AMPLIFIERS IN THE
CONSTRUCTION OF A UNIFIED SERIES OF POWER CONVERTERS**

Abstract. Design of a unified series of MagAmp power converters requires optimization of MagAmp mass and price characteristics. Solving this task manually requires complex experiments and is time-consuming. Authors consider the optimal experiment plan and formulate the optimization problem in a form of an interval equation. It is shown that the proposed approach is suitable for MagAmp switch mass and size characteristics optimization.

З метою задоволення найвибагливіших споживачів електроенергії актуальною задачею є створення уніфікованого ряду напівпровідникових перетворювачів електроенергії (НПЕ). Традиційно уніфікацію здійснюють за рядом вихідних потужностей та конструктивних рішень. Пропонуються нові підходи до створення уніфікованого ряду НПЕ з урахуванням уніфікації елементної бази та схемотехнічних рішень [1, 2]. Такий підхід найкраще може бути реалізований при побудові НПЕ на основі високочастотних магнітних підсилювачів (ВМП) [3-9]. Однак, в цьому випадку виникає задача оптимізації масо-габаритних та цінових характеристик осердь їх магнітопроводів [10]. Тому зазначена задача зводиться до побудови енергетичних характеристик основних елементів регуляторів (стабілізаторів) – ВМП.

Розв'язання цієї задачі 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, спочатку розглянуто задачу оптимального планування експериментальних досліджень, а потім на основі проведених досліджень побудовано модель енергетичної характеристики ВМП для повного ряду уніфікованих НПЕ в заданому діапазоні вихідних потужностей. На основі побудованої моделі енергетичної характеристики наведено результати оптимізації вартісних і питомих характеристик створюваного уніфікованого ряду НПЕ.

Аналіз принципів функціонування імпульсного регулятора напруги на ВМП [3-9] показує (рис.1), що оптимальні розміри магнітопроводів можна буде визначати шляхом використання універсальної енергетичної характеристики ВМП уніфікованого ряду ДВЕЖ. Вказана характеристика з'являє 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.

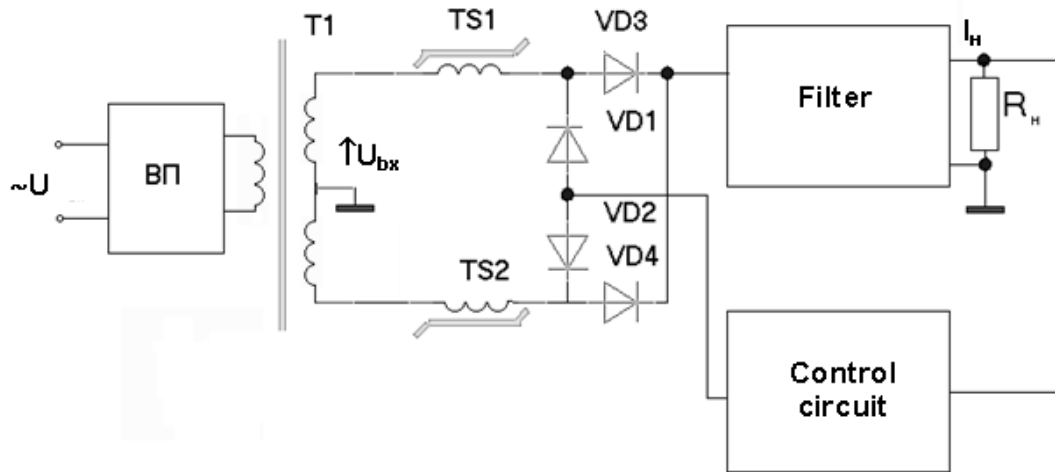


Рис. 1. Функціональна схема ДВЕЖ на основі ВМП

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

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

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

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

$$\hat{E}(U_{bx}, I_n) = b_0 + b_1 U_{bx} + b_2 I_n + b_3 U_{bx}^2 + b_4 I_n^2 \quad (3)$$

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 у вигляді (3) необхідно провести як мінімум $N=m=5$ вимірювальних експериментів (рис.2). Враховуючи тип вибраної моделі (3) (неповна квадратична модель), I_G -оптимальний насичений план експерименту можемо отримати із таблиці [10]

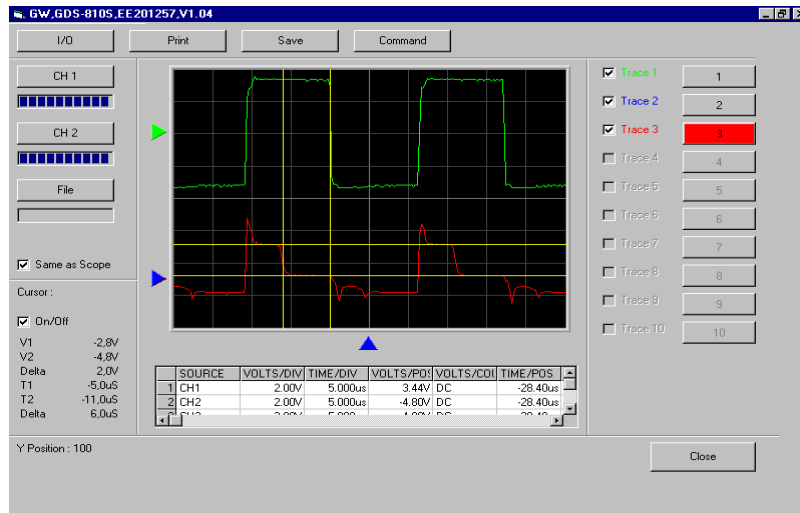


Рис. 2. Осцилограма напруги на дроселі насичення ВМП для вимірювань в одній з точок визначення значення енергетичної характеристики (площа перетину горизонтальної та вертикальної смуг пропорційна енергії, що поступає в навантаження)

Використовуючи методи інтервального аналізу [10-12], було побудовано модель енергетичної характеристики. А далі було знайдено її у функції геометричних розмірів осердь ВМП (l – довжина магнітної лінії осердя; s – площа його поперечного перерізу) у вигляді

$$[E(l, s)] = 191,837 + 83,672l + 24,928s - 38,616l^2 + 15,379s^2 \pm \frac{1}{2} \Delta_{\hat{E}(l,s,F)} \geq [E(U_{bx}, I_H)] \quad (4)$$

Для знаходження оптимальних масо-габаритних характеристик ключа, перейдемо від нерівності до рівняння у виразі (4):

$$[E(l, s)] = 191,837 + 83,672l + 24,928s - 38,616l^2 + 15,379s^2 \pm \frac{1}{2} \Delta_{\hat{E}(l,s,F)} = [E(U_{bx}, I_H)] \quad (5)$$

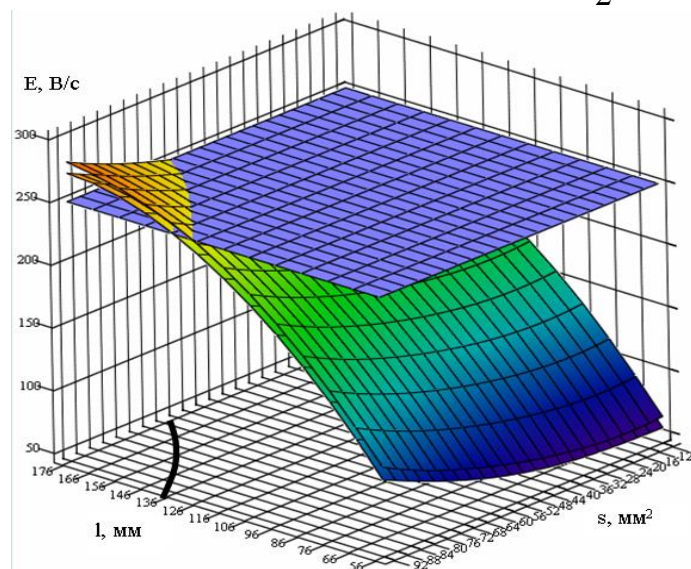


Рис. 3. Ілюстрація отримання розв'язків трансцендентного інтервального рівняння (5)

Жирна чорна лінія на рис. 3 є шуканою областю визначення масо-габаритних характеристик осердь ВМП, для яких побудовано модель енергетичної характеристики (на рис. 3 це дві паралельні площини), при заданих вихідних параметрах конкретного перетворювача напруги (горизонтальна площина синього кольору). Перетин цих площин і утворює шукану область визначення.

Вперше створено інтервальну макромодель енергетичної характеристики ВМП у вигляді функції від вихідних параметрів перетворювачів електроенергії, що забезпечило створення технології проектування уніфікованого ряду НПЕ з оптимальними масо-габаритними характеристиками.

Література

1. Яськів В. Нові підходи при вирішенні задачі розробки уніфікованого ряду джерел вторинного електроживлення. Матеріали шостої наукової конференції Тернопільського держ. техн. ун-ту ім. Івана Пулюя, м. Тернопіль, 24-26 квіт. 2002 р., Тернопіль, 2002. С. 100.
2. Yaskiv V., Gao Xinzong, Gao Lijin. The Substantiation and New Methods of a Solution of a Problem of Development of the Unitized Switching Power Supplies. The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics: Proceedings of the VIII-th International Conference CADSM 2005. Lviv, 2005. P. 232.
3. K. Harada, T. Nabeshima, "Applications of magnetic amplifiers to high-frequency dc-to-dc converters," Proc. IEEE, vol. 76, no. 4, April 1988. pp. 355-361.
4. C. Jamerson, D. Y. Chen, "Magamp Postregulators for Symmetrical Topologies with Emphasis on Half-Bridge Configuration," IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 8, No. 1, January 1993, pp. 26-29.
5. Yaskiv V. Using of High-Frequency Magnetic Amplifier in Switch Mode DC Power Supplies / V. Yaskiv // 35th Annual IEEE Power Electronic Specialists Conference (PESC'04). — Aachen, Germany, 2004. — P. 1658–1662.
6. Yaskiv V. MagAmp Regulated Isolated AC-DC Converter with High Power Factor / Volodymyr Yaskiv, Alexander Abramovitz, Keyue Smedley, Anna Yaskiv // Communications (Scientific Letters of the University of Zilina). — Zilina, Slovakia : University of Zilina, 2015. — No 1A. — P. 28–34.
7. V. Yaskiv, A. Martseniuk, A. Yaskiv, O. Yurchenko, B. Yavorsky, "Modular High-Frequency MagAmp DC-DC Power Converter", in Proceedings of 2 9th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT), Ceske Budejovice, Czech Republic, 2019, pp. 213–216.
8. Yaskiv V. Synchronous Rectifier in High-Frequency 24V/15A MagAmp Power Converter / Volodymyr Yaskiv, Oleg Yurchenko, Anatoliy Martseniuk, Anna Yaskiv // 2020 IEEE 4th International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS). — Istanbul, Turkey, 2020. — P. 113–117.
9. B. Mamano, "Magnetic amplifier control for simple, low-cost, secondary regulation," Unitrode corp. slup129. [Online]. Available: <http://www.ti.com/lit/ml/slup129/slup129.pdf>.
10. M. Dyvak, V. Yaskiv, A. Pukas, "Interval estimation of weight-dimensional characteristics of high-frequency magnetic amplifier of pulse power supplies", Przeglad elektrotechniczny (Electrical Review), No 4, 2009. p. 92–94.
11. 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.
12. M. Dyvak, P. Stakhiv, A. Pukas, "Algorithms of parallel calculations in task of tolerance ellipsoidal estimation of interval model parameters", Bulletin of the Polish Academy of Sciences-Technical Sciences, vol. 60, issue 1, 2012, pp.159-164.