

По сравнению с существующими программами автоматизированная подсистема GarAn-2 отличается повышенным уровнем информативности, наглядностью, удобством ввода и корректировки данных, быстротой отклика и современным дизайном. Поэтому её можно рекомендовать в качестве одной из составляющих систем автоматизированного синтеза двухфазных обмоток, а также использовать для активизации учебного процесса при выполнении практических занятий в процессе изучения теории обмоток электрических машин.

1. Дегтев В.Г., Лаврук И.С., Смирнов С.Б. Структурный синтез обмоток // *Вісн. НТУ "ХП"*. – 2001. – № 16. – С. 65–68. 2. Дегтев В.Г. Обобщенная модель многофазных обмоток // *Електричество*. – 1990. – № 11. – С. 40–45. 3. Дегтев В.Г., Смирнов С.Б. Стратегия структурного синтеза обмоток // *Вісн. СНУ*. – 2002. – № 4. – С. 85–88. 4. Диатилу П.К. Анализ свойств двухскоростных двухфазных обмоток с помощью Excel // *Електромашиноб. та електрообладн.* – 1998. – Вып. 51. – С. 54–57. 5. Дегтев В.Г., Лаврук И.С., Самойлов Г.А., Шкира В.А. Модульный синтез обмоток в интерактивном режиме // *Електромашиноб. та електрообладн.* – 2002. – Вып. 58. – С. 72–75. 6. Дегтев В.Г., Бабич С.В., Акиншин П.А. Слабонесимметричные двухфазные обмотки // *Електромашиноб. та електрообладн.* – 1999. – Вып. 52. – С. 72–76. 7. Veinott C.G. Special harmonic magneto-motive forces in irregular windings and special connections of polyphase-windings // *IEEE. Trans. Power Apparatus and Systems*. – 1964. – Vol. 83. – P. 1246–1255.

УДК 621.314

Е. Росоловскі\*, П.Г. Стахів, Ю.Я. Козак, О.П. Гоголюк

Національний університет "Львівська політехніка",

\*Вроцлавський Технологічний Університет, Інститут Електроенергетики

## ПОБУДОВА МАКРОМОДЕЛІ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА

© Росоловскі Є., Стахів П.Г., Козак Ю.Я., Гоголюк О.П., 2003

**Розглянуто проблему побудови математичних моделей та макромоделей силових трансформаторів. Запропоновано метод побудови макромоделі силового трансформатора у вигляді "чорної скриньки" у формі дискретних рівнянь стану.**

**The problem of creation of power transformer mathematical models and macromodels is considered. A method of power transformer macromodel design is presented.**

**Постановка проблеми в загальному вигляді.** Математичні моделі трансформаторів для дослідження електромагнітних перехідних процесів зазнали значних удосконалень протягом останніх 20 років. Під час моделювання трансформаторів, необхідно враховувати такі фізичні явища, як насичення, гістерезис, втрати на вихрові струми та теплові явища тощо [13]. Розроблення моделей трансформаторів з високим ступенем адекватності за допомогою заступних схем зумовлює їх надмірне ускладнення і, як наслідок, суттєві труднощі адаптації до сучасних середовищ аналізу перехідних процесів. Якщо дослідника цікавить тільки реакція на затискачах елемента досліджуваної системи, то доцільним стає

використання принципів макромоделювання, а саме створення макромоделей конкретних елементів замість їх точних математичних моделей. Тому в цій ситуації доцільно застосувати моделі елементів у вигляді “чорної скриньки”, які були започатковані в теорії динамічних систем, і з успіхом використовуються для побудови макромоделей елементів електронних кіл і електромеханічних перетворювачів [2, 3]. Застосування макромоделей зумовлено значними перевагами, а саме: можливістю заміни багатьох елементів складних електричних систем однією макромоделлю, легкою адаптацією до середовищ симулювання перехідних процесів та меншим часом їх симулювання [13].

**Аналіз літературних джерел.** Макромоделі традиційно розподілено на дві групи, а саме: математичні макромоделі та схемні макромоделі [2]. Макромоделі першого типу відображають властивості модельованого об’єкта за допомогою засобів математичного апарата (диференційних і різницевих рівнянь, графів тощо). Макромоделі другого типу відтворюють залежності між координатами процесу за допомогою створення відповідних електричних схем із традиційних елементів (резистивних, індуктивних, ємнісних, керованих джерел струмів і напруг тощо). Для побудови цих типів моделей можна застосовувати методи як “чорної скриньки”, так і фізико-топологічного моделювання.

Протягом останнього десятиріччя спостерігається значний прогрес у створенні математичних моделей трансформаторів, серед яких перевага надається аналізу перехідних процесів, аварійних режимів і періодичних процесів. У [12] наведено об’ємний перелік робіт і огляд підходів до створення математичних моделей трансформаторів. Ці моделі є достатньо точними у відтворенні відгуків на тестові сигнали. Моделі можуть складатись із декількох сотень вузлів і віток, що, з одного боку утруднює симулювання, а з іншого – є непрактичним і нецікавим під час дослідження реакції типу “вхід–вихід”. Тому логічно доцільними є два підходи до вирішення цієї проблеми, а саме:

- створення так званих редукованих моделей (моделей невисокого порядку) з максимально можливою мінімізацією порядку математичної моделі;
- створення математичних моделей у вигляді “чорної скриньки”. Успішні спроби створення редукованих математичних моделей трансформаторів зроблені в [4–9]. У працях [4, 8, 9] редукована модель зберігає структуру оригінальної моделі. Моделі вимагають розроблення для кожного виду елементів своєї процедури опису, ідентифікації та врахування схемних обмежень. Редуковані моделі такого типу можна назвати схемними макромоделями.

Наведені в [6, 7] редуковані моделі можна зарахувати до класу схемно-математичних макромоделей. Процедура редукції починається з формулювання деталізованої математичної моделі з врахуванням відповідних частотних характеристик. Редукція здійснюється перетворенням матриць рівнянь електромагнітного стану заступної схеми елементів системи. Після цього для отриманої математичної моделі складається нова спрощена заступна схема електричного кола, аналіз якої стає можливим за допомогою наявних методів і засобів моделювання. Редуковані моделі, як правило, зберігають схемну топологію та забезпечують задовільну точність симулювання перехідних процесів.

Математична макромодель однофазного трансформатора вихідного каскаду підсилювача звукової частоти з осердям з пермалою наведена в [11]. Макромоделі силових трансформаторів досі відсутні.

**Мета досліджень.** Метою досліджень є побудова математичної макромоделі силового

трифазного трансформатора у вигляді “чорної скриньки”.

**Основний зміст досліджень.** Як тестовий приклад вибрано силовий трифазний тристрижневий трансформатор ТДТН 110/35/10 потужністю 10 МВА. Заступна схема електричного кола трифазного трансформатора для обвиток високої (ВН) та середньої напруги (СН) зображена на рис. 1. Експериментальні дані, що використані для побудови макромоделі трансформатора, отримані на підставі моделі, наведеної в [1]. Макромодель будуюмо з урахуванням обвиток тільки високої та середньої напруги.

На заступній схемі використано такі позначення:  $i_{A1}, i_{B1}, i_{C1}, i_{A2}, i_{B2}, i_{C2}$  – фазні струми віток відповідно обвиток високої та середньої напруг трифазного трансформатора;  $r_{A1}, r_{B1}, r_{C1}, r_{A2}, r_{B2}, r_{C2}$  – резистивні опори обвиток високої та середньої напруги;  $\psi_{A1}, \psi_{B1}, \psi_{C1}, \psi_{A2}, \psi_{B2}, \psi_{C2}$  – повні потокозчеплення обвиток високої та середньої напруги;  $r_{n1}, r_{n2}, r_{n3}, L_{n1}, L_{n2}, L_{n3}$  – відповідно резистивні опори й індуктивності навантаження фаз з боку середньої напруги;  $u_{AB}, u_{BC}, u_A, u_B, u_C$  – фазні напруги віток обвиток високої та середньої напруги.

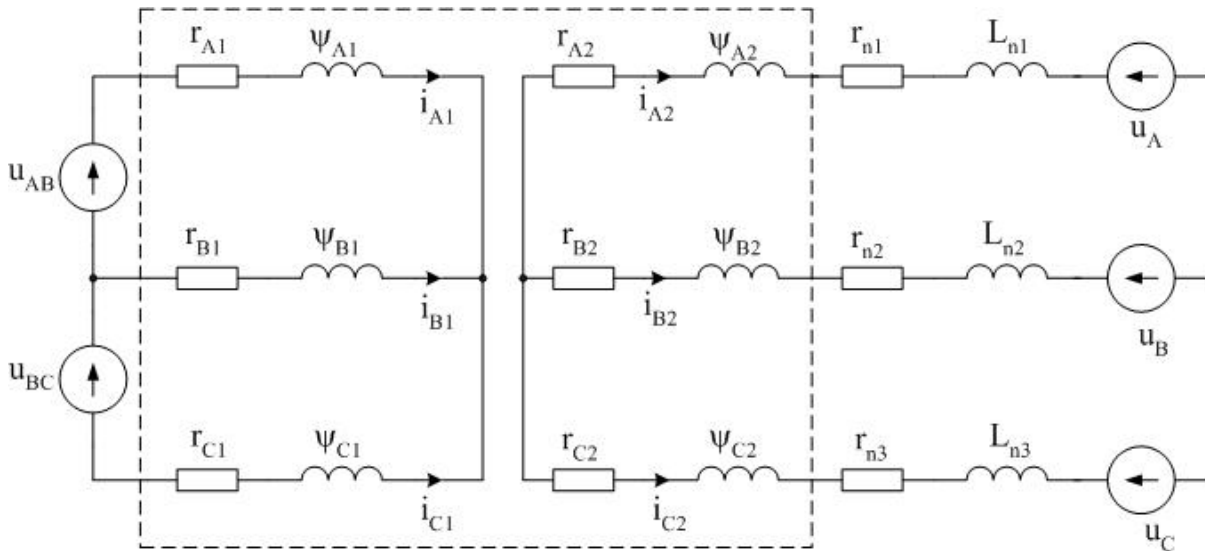


Рис. 1. Заступна схема електричного кола трифазного трансформатора

Побудову макромоделі розглядуваного трансформатора проводили у формі дискретних рівнянь стану (1). Використано таку форму запису, оскільки експериментальні дані, на підставі яких проводилась побудова моделі, є множиною дискретних значень вхідних і вихідних напруг і струмів трансформатора.

$$\begin{cases} \bar{x}^{(k+1)} = F\bar{x}^{(k)} + G\bar{v}^{(k)} + \bar{\Phi}(\bar{x}^{(k)}, \bar{v}^{(k)}) \\ \bar{y}^{(k+1)} = C\bar{x}^{(k+1)} + D\bar{v}^{(k+1)} \end{cases} \quad (3)$$

де  $\bar{x}$  – вектор змінних стану;  $\bar{v}$  – вектор вхідних змінних;  $\bar{y}$  – вектор вихідних змінних;  $F, G, C, D$  – матриці відповідних розмірів;  $\bar{\Phi}$  – нелінійна функція векторів  $(\bar{x}, \bar{y})$ ;  $k$  – номер дискрети.

Процедуру побудови макромоделі трансформатора запропоновано розділити на

п'ять етапів:

1. Вибирається набір вхідних і вихідних даних й форма шуканої моделі, записаної через невідомі коефіцієнти, яка б достатньо точно описувала об'єкт моделювання.

2. Під час побудови макромоделі основною проблемою є висока складність оптимізаційної задачі, яку не завжди можна розв'язати навіть із використанням потужної обчислювальної техніки. Тому проводимо децимацію експериментальних даних так, щоб виконувались співвідношення

$$\bar{x}^{(km)} = \tilde{\tilde{x}}^{(k)}, \bar{v}^{(km)} = \tilde{\tilde{v}}^{(k)}, \bar{y}^{(km)} = \tilde{\tilde{y}}^{(k)}, \quad (2)$$

де  $\bar{x}$ ,  $\bar{v}$ ,  $\bar{y}$  – вектори оригінальних даних,  $\tilde{\tilde{x}}$ ,  $\tilde{\tilde{v}}$ ,  $\tilde{\tilde{y}}$  – вектор проріджених даних,  $m$  – коефіцієнт децимації. Зазначимо, що процедура децимації вхідних даних не повинна суперечити теоремі Котельнікова.

3. Створюємо лінійну макромодель для проріджених даних за допомогою оптимізації у вигляді

$$\begin{cases} \tilde{\tilde{x}}^{(k+1)} = \tilde{F}\tilde{\tilde{x}}^{(k)} + \tilde{G}\tilde{\tilde{v}}^{(k)} \\ \tilde{\tilde{y}}^{(k+1)} = \tilde{C}\tilde{\tilde{x}}^{(k+1)} \end{cases}, \quad (3)$$

де  $\tilde{F}$ ,  $\tilde{G}$ ,  $\tilde{C}$  – матриці відповідних розмірів (вважаємо, що  $\tilde{D}=0$  [11]). Матрицю  $\tilde{F}$  вибираємо діагональною.

4. Переходимо від матриць  $\tilde{F}$ ,  $\tilde{G}$ ,  $\tilde{C}$ , побудованих для проріджених даних до матриць  $F$ ,  $G$ ,  $C$ , справедливих для макромоделі в області оригінальних експериментальних даних за допомогою перетворення

$$x_i^{(k+1)} = \sqrt[m]{\tilde{F}_{ii}} x_i^k + \frac{1 - \sqrt[m]{\tilde{F}_{ii}}}{1 - \tilde{F}_{ii}} \sum_j \tilde{G}_{ij} v_j^{(k)}, \quad (4)$$

$$y_i^{(k+1)} = \sum_j \tilde{C}_{ij} x_j^{(k+1)} \quad (5)$$

причому

$$F_{ii} = \sqrt[m]{\tilde{F}_{ii}}, \quad G_{ij} = \tilde{G}_{ij} \frac{1 - \sqrt[m]{\tilde{F}_{ii}}}{1 - \tilde{F}_{ii}}, \quad C_{ij} = \tilde{C}_{ij}. \quad (6)$$

Доведемо справедливості наведених формул (4), (5).

$$\begin{aligned} x_i^{m(k+1)} &= F_{ii} x_i^{(mk+m-1)} + \sum_j G_{ij} v_j^{(mk+m-1)} = F_{ii} (F_{ii} x_i^{(mk+m-2)} + \sum_j G_{ij} v_j^{(mk+m-2)}) + \\ &+ \sum_j G_{ij} v_j^{(mk+m-1)} = \dots = F_{ii}^m x_i^{(mk+m-m)} + (1 + F_{ii} + F_{ii}^2 + \dots + F_{ii}^{m-1}) \sum_j G_{ij} v_j^{(mk+m-m)}; \\ x_i^{m(k+1)} &= F_{ii}^m x_i^{(mk)} + \frac{1 - F_{ii}^m}{1 - F_{ii}} \sum_j G_{ij} v_j^{(mk)}. \end{aligned} \quad (7)$$

Врахувавши співвідношення (2) з (7) отримуємо:

$$\tilde{\tilde{x}}_i^{(k+1)} = F_{ii}^m \tilde{\tilde{x}}_i^{(k)} + \frac{1 - F_{ii}^m}{1 - F_{ii}} \sum_j G_{ij} \tilde{\tilde{v}}_j^{(k)}.$$

Тобто  $\tilde{F}_{ii} = F_{ii}^m$ ,  $\tilde{G}_{ij} = \frac{1 - F_{ii}^m}{1 - F_{ii}} G_{ij}$ , звідки бачимо справедливість (6).

1. Доповнюємо лінійну макромодель нелінійною функцією  $\tilde{\Phi}$  спеціального вигляду;
2. Проводимо остаточну оптимізацію макромоделі, де процедурі оптимізації підлягають усі коефіцієнти.
3. Перевіряємо отриману нелінійну макромодель на незалежному наборі тестових експериментальних даних.

Вхідними змінними під час побудови макромоделі досліджуваного трансформатора вибрано напруги обвиток високої та середньої напруги, а вихідних – струми віток фаз відповідно з боку високої та середньої напруг. Вектор-стовпці вхідних і вихідних змінних мають такий вигляд:

$$\vec{v} = (u_1, u_2, u_3, u_4)^T, \quad \vec{y} = (i_1, i_2, i_3, i_4)^T, \quad (8)$$

де  $u_1 = u_{AB}$ ,  $u_2 = u_{BC}$ ,  $u_3 = u_A - u_B$ ,  $u_4 = u_C - u_B$ ,  $i_1 = i_{A1}$ ,  $i_2 = i_{C1}$ ,  $i_3 = i_{A2}$ ,  $i_4 = i_{C2}$ .

Макромодель трансформатора побудована на підставі експериментальних даних, отриманих при дослідженні режиму короткого замикання на обвитках високої та середньої напруги. Для створення лінійної макромоделі використано множину даних процесу під час вмикання трансформатора на постійну напругу. Безпосередньо для побудови макромоделі використовувались проріджені масиви даних (використовувалась кожна 25-та дискрета, тобто  $m = 25$ ).

Шляхом оптимізації коефіцієнтів матриць  $\tilde{F}$ ,  $\tilde{G}$ ,  $\tilde{C}$  отримано лінійну макромодель для проріджених даних у вигляді

$$\begin{aligned} \tilde{x}^{(k+1)} &= \begin{pmatrix} 0.885 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.885 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.75 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.75 \end{pmatrix} \tilde{x}^{(k)} + \begin{pmatrix} 0.0201 & -0.0102 & -0.0386 & 0.0196 \\ -0.0102 & 0.0201 & 0.0196 & -0.0386 \\ -0.0695 & 0.0351 & -0.3356 & 0.1681 \\ 0.0351 & -0.0695 & 0.01682 & -0.3356 \end{pmatrix} \tilde{v}^{(k)} \\ \tilde{y}^{(k+1)} &= \begin{pmatrix} 0.7165 & 0.0079 & -0.1816 & -0.0031 \\ 0.0084 & 0.7151 & -0.0024 & -0.1822 \\ 1.1479 & 0.0056 & 0.7209 & 0.0007 \\ 0.0064 & 1.1490 & 0.0010 & 0.7209 \end{pmatrix} \tilde{x}^{(k+1)}. \end{aligned} \quad (9)$$

Оптимізація проводилась за методом напрямного конуса Растрігіна з адаптацією параметрів пошуку [12].

Здійснено перехід від матриць  $\tilde{F}$ ,  $\tilde{G}$ ,  $\tilde{C}$ , побудованих для проріджених даних до матриць  $F$ ,  $G$ ,  $C$ , справедливих для макромоделі в області оригінальних експериментальних даних за допомогою співвідношень (4) і (5).

Отримана лінійна макромодель трансформатора має вигляд:

$$\bar{x}^{(k+1)} = \begin{pmatrix} 0.995 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.995 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.989 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.989 \end{pmatrix} \bar{x}^{(k)} + \begin{pmatrix} 0.0008 & -0.0004 & -0.0016 & 0.0008 \\ -0.0004 & 0.0008 & 0.0008 & -0.0016 \\ -0.0032 & 0.0016 & -0.0154 & 0.0077 \\ 0.0016 & -0.0032 & 0.0077 & -0.0154 \end{pmatrix} \bar{v}^{(k)}$$

$$\bar{y}^{(k+1)} = \begin{pmatrix} 0.7165 & 0.0079 & -0.1816 & -0.0031 \\ 0.0084 & 0.7151 & -0.0024 & -0.1822 \\ 1.1479 & 0.0056 & 0.7209 & 0.0007 \\ 0.0064 & 1.1490 & 0.0010 & 0.7209 \end{pmatrix} \bar{x}^{(k+1)}. \quad (10)$$

Доповнимо отриману лінійну макромодель нелінійною функцією вигляду

$$\bar{\Phi}(\bar{x}, \bar{y}) = \sum_k \bar{\alpha}_k x_{i_k}^\gamma v_{j_k}^{3-\gamma}, \quad (11)$$

де  $\bar{\alpha}_k$  — шукані коефіцієнти моделі,  $\gamma \in \{2, 3\}$ .

Досліджуємо поведінку отриманої макромоделі на незалежному наборі даних. Реакцію отриманої моделі на тестові дані зображено на рис. 2–4. де  $i_{A1}, i_{A2}, i_{C1}, i_{C2}$  — струми, отримані на підставі оригінальної моделі, а струми  $i_{A1}(op), i_{A2}(op), i_{C1}(op), i_{C2}(op)$  — на підставі створеної макромоделі.

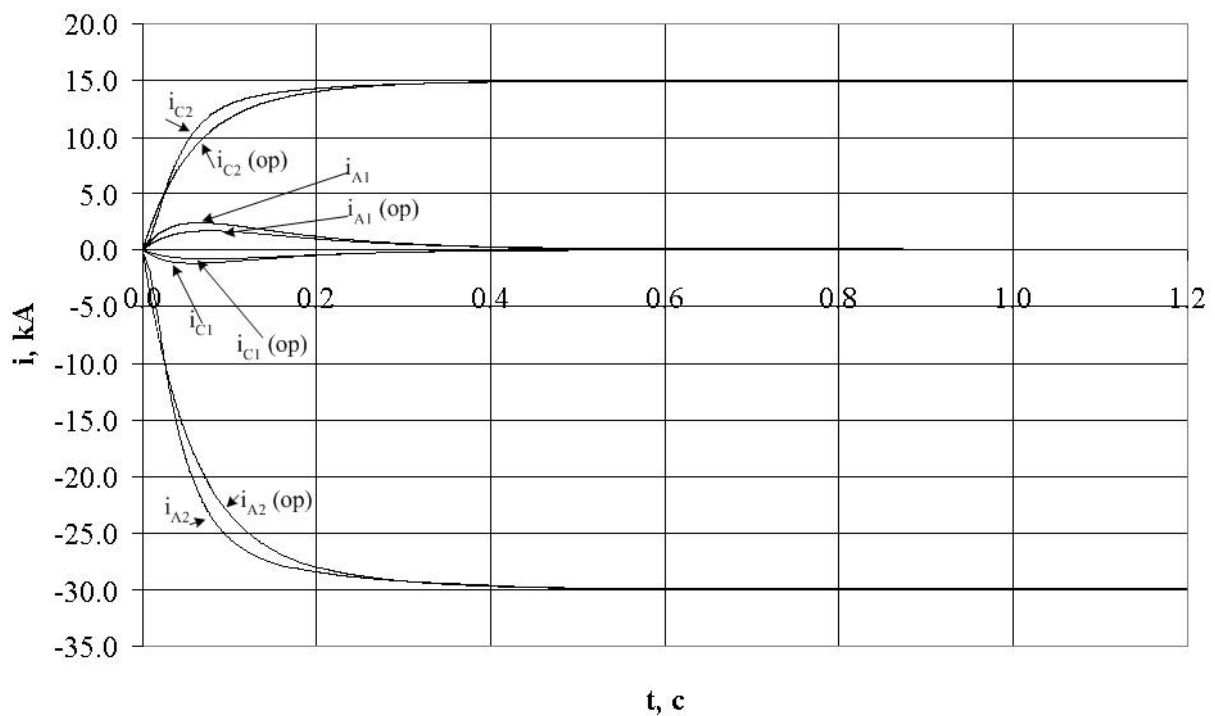


Рис. 2. Залежність струмів обмоток ВН і СН від напруги обмотки СН  
 $u_{ab}=u_{bc}=0, u_a=u_{anom}=const$

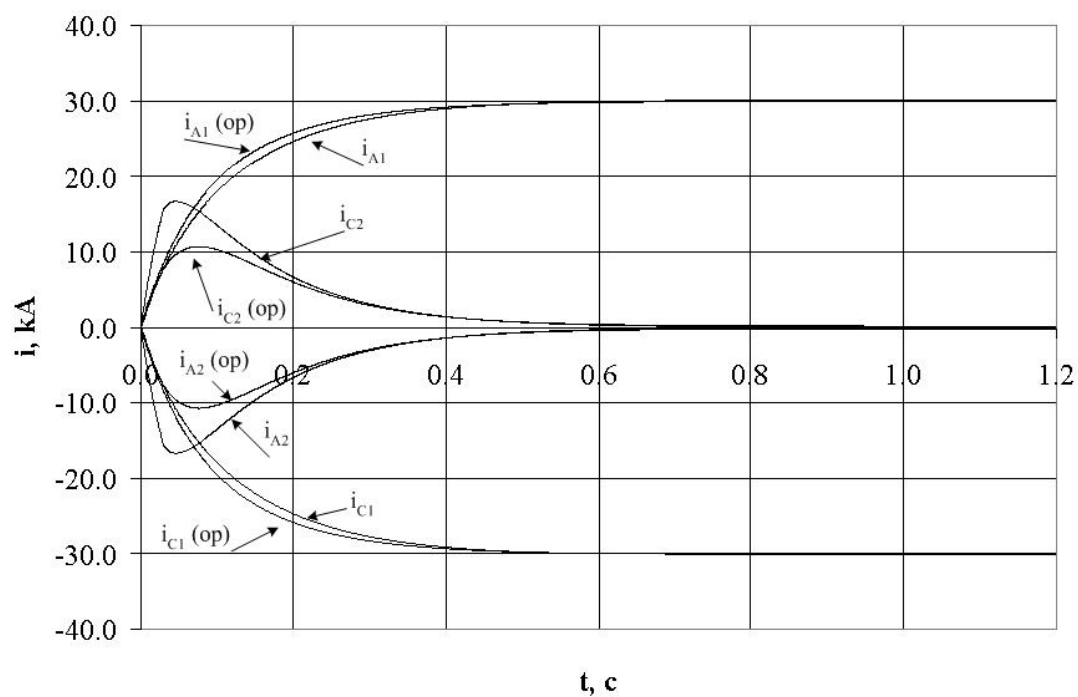


Рис. 3. Залежність струмів обмоток ВН і СН від напруги обмотки ВН  
 $u_a = u_b = u_c = 0, u_{ab} = u_{nom} = \text{const}, u_{bc} = u_{nom} = \text{const}$

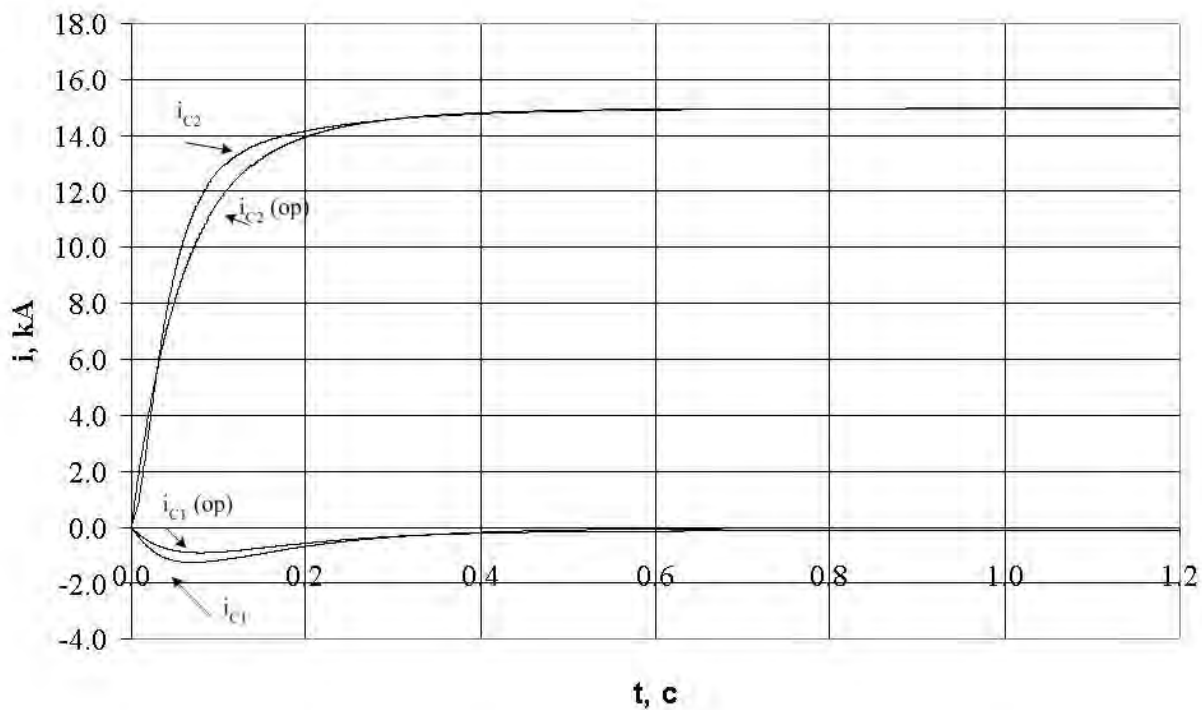


Рис. 4. Залежність струму фази С обмотки СН від напруги обмотки СН  
 $u_{ab} = u_{bc} = 0, u_b = u_{bnom} = \text{const}, u_a = 0, u_c = 0$

На підставі запропонованого підходу створено нелінійну макромодель, відносна

похибка якої становить 8 %.

**Висновки.** Запропоновано удосконалений метод і алгоритм побудови макромоделі силового трифазного трансформатора у вигляді “чорної скриньки”. Побудовано макромодель силового трифазного трансформатора, придатну для інженерних розрахунків.

1. Горячко В.І. Математичні моделі елементів системи електропередачі: Автореф. ...канд. техн. наук: 05.09.05 / Нац. ун-ту “Львівська політехніка”. – Львів, 2002. – 19 с.
2. Стахів П. Г. Анализ динамических режимов в электронных схемах с многополюсниками. – Львов, 1988. – 154 с.
3. Стахів П.Г., Козак Ю.Я. Побудова макромоделей електромеханічних компонент // Технічна електродинаміка. – 2001. – № 4. – С. 33–38.
4. F. de Leon, A. Semlyen. Reduced Order Model for Transformer Transients // IEEE Trans. on Power Delivery. – January 1992. – Vol. 7, N 1. – P. 361–369.
5. F. de Leon, A. Semlyen. Complete Transformer Model for Electromagnetic Transients // IEEE Trans. on Power Delivery. – January 1992. – Vol. 7, N 1. – P. 361–369.
6. Degeneff R.C., Gutierrez M.R., Schneider J.M. Linear, Lumped Parameter Transformer Model Reduction Technique // IEEE Trans. on Power Delivery. – April 1995. – Vol. 10, N 2. – P. 853–861.
7. Degeneff R.C., Gutierrez M.R., Vakilian M. Nonlinear, Lumped Parameter Transformer Model Reduction Technique // IEEE Trans. on Power Delivery. – April 1995. – Vol. 10, N 2. – P. 862–868.
8. Degeneff R.C., Gutierrez M.R., McKenny P.J. A Method for Constructing Reduced Order Models for System Studies for Detailed Lumped Parameter Models // IEEE Trans. on Power Delivery. – April 1992. – Vol. 7, N 2. – P. 649–655.
9. Galarza R.J., Chow J.H., Degeneff R.C. Transformer Model Reduction Using Time and Frequency Domain Sensitivity Techniques // IEEE Trans. on Power Delivery. – April 1995. – Vol. 10, N 2. – P. 1052–1058.
10. Soysal A.O., Semlyen A. Reduced Order Transmission Line Modeling for Improved Efficiency in the Calculation of Electromagnetic Transients // IEEE Trans. on Power Systems. – August 1994. – Vol. 9, N 3. – P. 1494–1498.
11. Козак Ю., Пуцало Ю., Стахів П. Побудова дискретної макромоделі нелінійного трансформатора на основі експериментально знятих перехідних характеристик // Електроніка і зв'язь. – 1998. – № 5. – С. 15–18.
12. Козак Ю.Я. Модифікація методу направляючого конуса Растрігіна // Електроніка і зв'язь. – Тем. вып. Проблемы физической и биомедицинской электроники. – 1997. – С. 424.
13. Stakhiv P.G., Rosolowski E., Hoholyuk O. P. Features of electrical power systems modeling with components described by discrete macromodels in ATP environment // Технічна електродинаміка: Тем. вип. Проблеми сучасної електротехніки. – К., 2002. – Ч. 1. – С. 23–28.