

УДК 621.301

А.О. Мушаров

Харківський університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків

## АПРОКСИМАЦІЯ ОСНОВНОЇ КРИВОЇ НАМАГНІЧУВАННЯ МАГНІТОПРОВОДУ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРУ СТУПЕНЕВИМ ПОЛІНОМОМ ТРЕТЬОГО СТУПЕНЯ

У статті розглянутий метод апроксимації основної кривої намагнічування силового трансформатора, що входить до системи електропостачання комплексів озброєння і військової техніки за допомогою ступеневого поліному третього ступеня.

**Ключові слова:** апроксимація кривої намагнічування, силовий трансформатор, ступеневий поліном, магнітопровід.

### Вступ

**Постановка науково-технічної задачі.** При дослідженні ферорезонансних явищ у системах електропостачання військового призначення, досить часто доводиться зустрічатися з ділянками системи, які містять нелінійну індуктивність, яка обумовлена наявністю трансформаторів. Для описання її в літературі [1-4] пропонується використовувати апроксимацію нелінійних залежностей ступеневими поліномами. Процес отримання таких залежностей для реальних трансформаторів, що входять до складу систем електропостачання повинен враховувати особливості конструктивного виконання магнітопроводів та обмоток.

**Аналіз літератури.** Дослідження систем електропостачання комплексів озброєння і військової техніки для їх захисту в умовах застосування силових деструктивних впливів проведено в роботах [1-4]. Для описання нелінійності магнітопроводу трансформатора в цих роботах пропонується використовувати залежність струму від потокозчеплення  $i = f(\psi)$ , яка має вигляд

$$i = a_1 \cdot \psi + a_2 \cdot \psi^3, \quad (1)$$

де  $a_1$  та  $a_2$  - коефіцієнти при ступеневому поліномі третього ступеня.

Враховуючи те, що дані коефіцієнти можуть суттєво відрізнятися для різних трансформаторів, що застосовуються в системах електропостачання комплексів озброєння і військової техніки, в залежності від потужності, типу та конструктивних особливостей магнітопроводу, у даній статті пропонується метод їх визначення на основі технічних характеристик силових трансформаторів, а також довідкових даних [5-7] щодо конструкції і габаритних розмірів осердь, а також характеристик матеріалів магнітопроводів.

**Мета** даної статті полягає у викладенні методу апроксимації залежності струму від потокозчеплен-

ня у обмотці високої напруги силового трансформатора системи електропостачання військового призначення.

### Основний матеріал

Для з'ясування особливостей запропонованого методу апроксимації, перш за все, треба врахувати технічні характеристики трансформаторів, відповідні відомості про це зведені до табл. 1.

Магнітна індукція в магнітопроводі трансформатора при номінальному режимі роботи може бути визначена за формулою

$$B = \frac{U_{\text{фнн1}}}{4,44 \cdot f \cdot w_2 \cdot S_{\text{П}}} \quad (\text{Тл}), \quad (2)$$

де  $U_{\text{фнн}}$  - фазна напруга обмотки НН (В);  $f$  - частота мережі (Гц);  $w_2$  - кількість витків обмотки НН;  $S_{\text{П}}$  - активний переріз магнітопроводу ( $\text{м}^2$ );  $S_{\text{П}}$  та  $w_2$  можуть бути визначені за довідковими даними, основні з яких зведені до табл. 2.

Площа активного перерізу магнітопроводу  $S_{\text{П}}$  ( $\text{м}^2$ ) трансформатора визначається за виразом:

$$S_{\text{П}} = k_3 \cdot k_k \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4}. \quad (3)$$

Користуючись формулою, для визначення намагнічуючої сили обмотки трансформатора  $F = i_0 \cdot w_1$ , або

$$i_0 = \frac{H \cdot L}{w_1}, \quad (4)$$

де  $H$  - напруженість магнітного поля в магнітопроводі трансформатора;  $L$  - довжина середньої лінії магнітопроводу, можливо знайти напруженість магнітного поля в магнітопроводі при струмі неробочого ходу.

Довжину середньої лінії магнітопроводу визначимо із виразу

$$L = 2 \cdot C + 2 \cdot (H_{\text{ВН}} + 2 \cdot L_{02} + H_{\text{Я}}). \quad (5)$$

Таблиця 1

## Технічні дані силових трансформаторів

Найменування параметрів	Тип виробу		
	ТМ100 10/0,4	82Х6	83Х6
Номінальна потужність, кВ·А	100	250	400
Номінальна напруга ВН, кВ	6 или 10		
Номінальна напруга НН, кВ	0,4		
Номінальний струм ВН, А	9,8 або 5,8	24 або 14,4	38,5 або 23,1
Номінальний струм НН, А		361	578
Рід струму	Змінний трифазний		
Частота, Гц	50		
Напруга к.з. трансформатора, % $U_n$	4,5		
Струм неробочого ходу трансформатора, % $I_n$	2,2	4,0	3,5
Втрати неробочого ходу трансформатора, Вт	320	660	920
Втрати короткого замикання трансформатора, Вт	2000	4200	6100
Сумарні втрати трансформатора, Вт	2320	4860	7020
Схема та група з'єднання обмоток трансформатора	$\Delta/Y - 11$ или $Y/Y - 0$		
Коефіцієнт трансформації	15 або 26		
Режим роботи	Тривалий		
Регулювання напруги	Автоматичне та дистанційно-ручне від ШАУ		
Точність підтримання напруги на стороні НН, %	$\pm(2\pm 0,5)$		

Таблиця 2

## Параметри осердь трансформаторів

	ТМ100 10/0,4	КТП 82Х6	КТП 83Х6
$d$ - діаметр стрижнів магнітопроводу, мм	125	160	180
$w_1$ - кількість витків обмотки ВН	1838	998	788
$w_2$ - кількість витків обмотки НН	70	38	30
$k_{кр}$ - коефіцієнт кола для розрахунку активного перерізу стрижнів магнітопроводу	0,915	0,96	0,96
$k_3$ - коефіцієнт заповнення	0,905	0,905	0,905
$D_2$ - зовнішній діаметр обмотки ВН, мм	256	324	347
$a_{22}$ - відстань між обмотками сусідніх стрижнів	8	10	10
$H_{ВН}$ - висота обмотки ВН	500	525	590
$H_я$ - висота ярма магнітопроводу	105	155	175
$C$ - відстань між вісями сусідніх стрижнів	264	334	377
$L_{02}$ - відстань від обмотки ВН до ярма	20	30	30

Знаючи магнітну індукцію та напруженість магнітного поля у магнітопроводі, за допомогою кривих намагнічування, що зображені на рис. 1, можливо визначити марку електротехнічної сталі із якої виготовлене осердя даного трансформатора.

Чисельні значення для визначення точок, по яким побудовані характеристики на рис. 1 для сталей марок Э330 та Э340 зведені до таблиці 3.

Таким чином, трансформаторам ТМ100 10/0,4 та КТП 83Х6 відповідає сталь марки Э330, а КТП 82Х6 – сталь марки Э340.

Криву намагнічування магнітопроводу трансформатора можливо перетворити в подібну їй залежність струму від потокозчеплення  $i = f(\psi)$ , користуючись тим, що потокозчеплення  $\psi = \Phi \cdot w$ , або

$$\psi = B \cdot S_{\Pi} \cdot w_1, \quad (6)$$

де  $B$  – магнітна індукція в магнітопроводі трансформатора;  $S_{\Pi}$  – активний переріз магнітопроводу;  $w_1$  – кількість витків обмотки ВН.

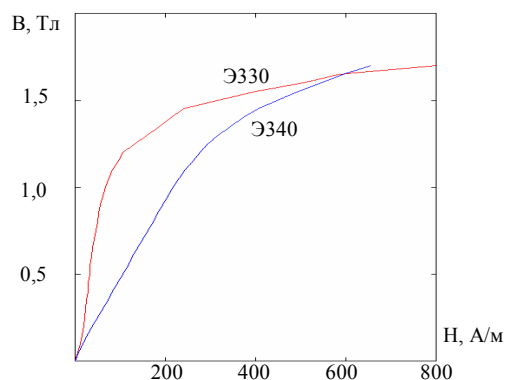


Рис. 1. Криві намагнічування сталей Э330 та Э340 у змінному магнітному полі частотою 50 Гц

Таблиця 3

Залежність  $B = f(H)$  для сталей марок Э330 та Э340 у змінному магнітному полі частотою 50 Гц

B(Тл)		0,15	0,45	0,55	0,65	0,75	0,95	1,05	1,25	1,50	1,60	1,70
H(A/м)	Э330	15,96	29,26	33,25	38,57	45,22	61,15	74,48	133,3	320	506,5	800
	Э340	27,8	94,43	116,65	138,8	161	205,5	230,53	294,4	450	544	655

Користуючись формулами (2) та (4), а також визначеними даними  $L$  та  $S_{II}$ , поставимо у відповідність значенням магнітної індукції  $B$  та напруженості магнітного поля  $H$  для електротехні-

чної сталі значення потокозчеплення  $\psi$  та струму  $i_0$  у первинній обмотці ненавантаженого трансформатора. Результати занесемо до табл. 4.

Таблиця 4

Залежність  $i_0 = f(\psi)$  при частоті струму 50 Гц

TM100 10/0,4	$\psi$ (Вб)	2,757	7,9	11,95	16,72	19,29	23,52	27,93	30,69	31,61	32,71	33,08
	$i_0$ (А)	0,015	0,029	0,039	0,059	0,089	0,197	0,395	0,791	1,187	1,582	1,978
82Х6	$\psi$ (Вб)	1,8	3,6	5,39	7,18	10,78	14,37	17,9	21,56	25,15	26,94	28,74
	$i_0$ (А)	0,047	0,094	0,14	0,188	0,266	0,375	0,5	0,594	0,813	0,96	1,2
83Х6	$\psi$ (Вб)	2,6	7,45	11,27	15,77	18,2	22,2	26,35	28,95	29,82	30,86	31,2
	$i_0$ (А)	0,045	0,09	0,12	0,18	0,27	0,6	1,2	2,4	3,6	4,8	6

За даними табл. 4, користуючись програмою Mathcad, побудуємо графічні залежності  $i_0(\psi)$ , які зображені на рис. 2.

Для того, щоб апроксимуюча функція найбільш точно відтворювала форму нелінійної характеристики  $i_0(\psi)$  та була зручною для аналізу й математичної обробки, будемо розглядати робочу ділянку характеристики  $i \in [0; i_{HX}]$ .

Для визначення коефіцієнтів поліному скористаємося методом обраних точок.

Запишемо систему рівнянь:

$$\begin{aligned} i_1 &= a_1 \cdot \psi_1 + a_2 \cdot \psi_1^3; \\ i_2 &= a_1 \cdot \psi_2 + a_2 \cdot \psi_2^3. \end{aligned} \quad (7)$$

Виберемо з кожного графіку на рис. 2 дві точки, ордината однієї з яких відповідає початковому

відрізку залежності  $i(\psi)$ , який є практично лінійним, а ордината другої лежить поблизу значення струму неробочого ходу:

TM100 –  $A_1(11,95; 0,039)$  та  $B_1(26; 0,23)$ ;

82Х6 –  $A_2(10,78; 0,266)$  та  $B_2(26,94; 0,96)$ ;

83Х6 –  $A_2(11,27; 0,12)$  та  $B_2(27,73; 1,5)$ .

Координати обраних точок підставимо у систему рівнянь (7) для знаходження коефіцієнтів  $a_1$  та  $a_2$  при ступеневому поліномі.

Після вирішення системи рівнянь отримаємо значення коефіцієнтів, які занесені до табл. 5.

Графіки функції  $i_0(\psi)$ , побудовані за допомогою апроксимації поліномом третього ступеня із виразу  $i_0(\psi) = a_1\psi + a_2\psi^3$  зобразимо на рис. 3 в одній системі координат із графіком  $i_0(\psi)$ , побудованим за даними табл. 4. (рис. 2).

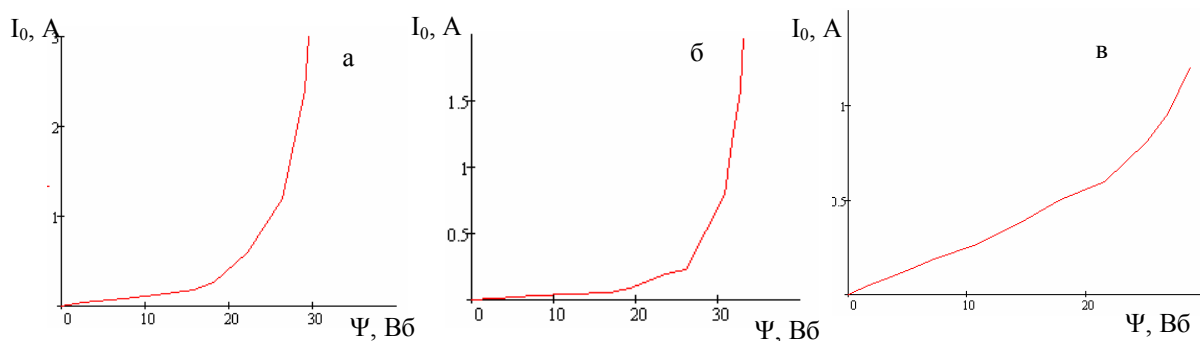


Рис. 2. Залежність струму від потокозчеплення обмотки ВН:  
а – КТП 83Х6, б – TM100 10/0,4, в – КТП 82Х6

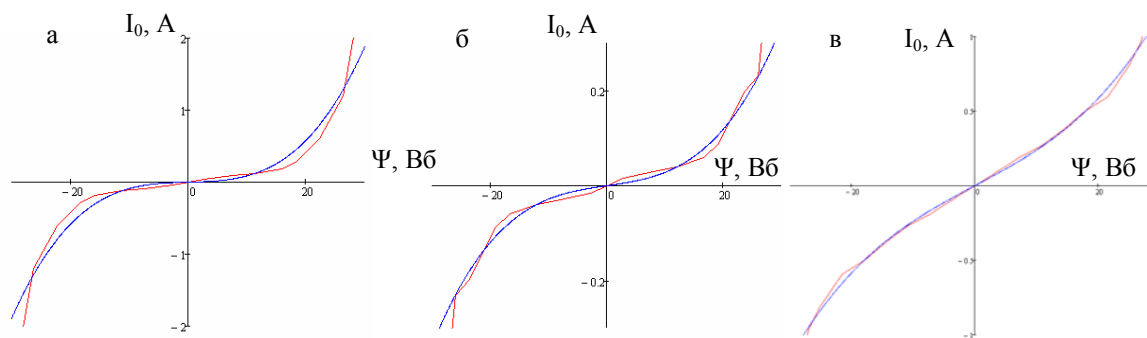


Рис. 3. Графіки залежності струму від потокозчеплення обмотки ВН та апроксимуючі криві:  
а – КТП 83Х6, б – ТМ100 10/0,4, в – КТП 82Х6

Таблиця 5  
Коефіцієнти при ступеневому поліномі апроксимуючих функцій.

	ТМ100 10/0,4	82Х6	83Х6
$a_1$	$1,768 \cdot 10^{-3}$	0,022	$2,052 \cdot 10^{-3}$
$a_2$	$1,047 \cdot 10^{-5}$	$1,798 \cdot 10^{-5}$	$6,768 \cdot 10^{-5}$

З рис. 3. видно, що отримані аналітичні вирази залежності  $i_0(\psi)$  у межах робочої ділянки відповідають залежностям струму неробочого ходу від потокозчеплення, побудованим за даними кривих намагнічування сталей Э330 та Э340 з урахуванням конструктивних особливостей магнітопроводів трансформаторів та кількості витків обмоток ВН.

### Висновки

1. Оримана в результаті апроксимації функція  $i_0 = a_1 \cdot \psi + a_2 \cdot \psi^3$ , дозволяє описати графічну залежність  $i = f(\psi)$  з високою точністю.
2. Апроксимація поліномом третього ступеня може бути застосована тільки в межах робочої ділянки кривої намагнічування, оскільки не досить точно враховує насичення магнітопроводу.
3. Враховуючи той факт, що головний магнітний потік трансформатора зберігає свою величину при всіх режимах роботи, можливо отримати анало-

гічні залежності для номінального струму від потокозчеплення.

### Список літератури

1. Кононов Б.Т. Защита систем электроснабжения от электромагнитного оружия / Б.Т. Кононов, А.А. Мушаров // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. – 2012. – № 3(9). – С. 143-145.
2. Кононов Б.Т. Феррорезонанс в электрических сетях с поперечной и продольной компенсацией потерь напряжения / Б.Т. Кононов, Е.А. Кононова, А.А. Мушаров // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил. – Х.: ХУПС, 2012. – Вип. 1(30). – С. 144-146.
3. Кононов Б.Т. Феррорезонанс в электрических цепях с различными схемами соединения активного сопротивления, емкости и катушки с ферромагнитным сердечником / Б.Т. Кононов, А.А. Мушаров // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил. – Х.: ХУПС, 2012. – Вип. 2 (31). – С. 111-113.
4. Кононов Б.Т. Феррорезонанс напруг в дисипативній системі / Б.Т. Кононов, А.А. Мушаров // Системи озброєння і військова техніка. – 2012. – № 4(32). – С. 118-120.
5. Сапожников А.В. Конструирование трансформаторов / А.В. Сапожников. – М., 1959. – 361 с.
6. Тихомиров П.М. Расчет трансформаторов / П.М. Тихомиров. – М. Энергоатомиздат 1986. – 234 с.
7. Дружинин В.В. Магнитные свойства электротехнической стали / В.В. Дружинин. – М.: Энергия, 1974. – 240 с.

Надійшла до редколегії 18.12.2013

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Б.Т. Кононов, Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків

### АПРОКСИМАЦИЯ ОСНОВНОЙ КРИВОЙ НАМАГНИЧИВАНИЯ МАГНИТОПРОВОДА СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА СТЕПЕННЫМ ПОЛИНОМОМ ТРЕТЬЕЙ СТЕПЕНИ

А.А. Мушаров

В статье рассмотрен метод получения аналитического выражения для описания основной кривой намагничивания силового трансформатора, который входит в состав системы электроснабжения комплексов вооружения и военной техники, с помощью степенного полинома третьей степени.

**Ключевые слова:** аппроксимация кривой намагничивания, силовой трансформатор, степенной полином, магнитопровод.

### APPROXIMATION OF BASIC MAGNETIZATION CURVE OF THE POWER TRANSFORMERSES MAGNETIC CORES WITH THIRD DEGREE POWER POLYNOMIALS

A.A. Musharov

This article describes method of obtaining an analytical expression to describe the basic magnetization curve of the power transformer, which is part of the power supply system of of weapon systems and military equipment, with third degree power polynomial.

**Keywords:** approximation of the magnetization curve, the power transformer, the power polynomial, magnetic core.