

УДК 621.314.21

## ВОЗМОЖНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТРЕХФАЗНОГО ЛЕНТОЧНОГО МАГНИТОПРОВОДА ДЛЯ АНТИРЕЗОНАНСНОГО ТРАНСФОРМАТОРА НАПРЯЖЕНИЯ

Л. Э. РОГИНСКАЯ, Д. В. ГУСАКОВ

gusakov.den@mail.ru

ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

Поступила в редакцию 9 ноября 2013 г.

**Аннотация.** Проведено экспериментальное исследование трехфазного ленточного магнитопровода, получены зависимости изменения тока и напряжения во времени, а также спектр гармоник напряжения. Проведен сравнительный анализ экспериментальных и теоретических данных. Выявлена возможность использования трехфазного ленточного магнитопровода для антирезонансного трансформатора напряжения.

**Ключевые слова:** антирезонансный трансформатор напряжения; феррорезонансные явления; ленточный магнитопровод.

**Введение.** Витой ленточный магнитопровод для трехфазных трансформаторов характеризуется меньшей массой по сравнению с пластинчатым магнитопроводом, меньшими габаритными размерами при той же мощности, более высоким КПД. При изготовлении трехфазных трансформаторов с использованием витого ленточного магнитопровода уменьшается расход провода, снижается трудоемкость при намотке и сборке трансформатора. Но данный магнитопровод характеризуется также электромагнитными особенностями, необходимыми для применения в антирезонансном трансформаторе напряжения.

Трансформаторы напряжения используются в энергосистемах на всех уровнях напряжений и работают в качестве измерительных преобразователей, передают информацию о напряжении в сети системам защиты и измерений. Работа трансформаторов напряжения во время аварийных режимов может приводить к возникновению феррорезонанса. Феррорезонанс в свою очередь приводит к неправильной работе трансформатора напряжения.

В качестве одной из основных мер по борьбе с феррорезонансными явлениями является использование антирезонансных трансформаторов напряжения (ТН). Антирезонансным называют электромагнитный заземляемый ТН, устойчиво работающий при наличии непрекращающихся феррорезонансных явлений и не вызывающий их [1].

**Постановка цели исследования.** Для обеспечения антирезонансных свойств у ТН 6–10 кВ применяются несколько способов:

- добавление в схему активных гасительных сопротивлений;
- повышение потокосцепления насыщения путем снижения номинальной индукции;
- изменение схемы соединения обмоток трехфазных ТН и т. д. [2].

Однако все эти способы приводят к повышению погрешности измерений трансформаторов напряжений. Одним из способов достижения антирезонансных свойств у трансформаторов напряжения является применение трехфазного трехстержневого ленточного магнитопровода [3] (рис. 1).

**Методика экспериментальных и теоретических исследований.** Как видим, обмотки трансформатора выполняются на двух стержнях, в то же время поток каждого стержня создается МДС двух первичных обмоток. В качестве потоков нулевой последовательности в насыщающихся трансформаторах можно рассмотреть их третьи гармоники, сдвинутые по фазе на  $360^\circ$ . Тогда потокосцепления рабочих обмоток будут синусоидальными, синусоидальными будут и выходные напряжения. При наличии токов нулевой последовательности в первичных обмотках данного трансформатора следует ожидать их отсутствия в выходных напряжениях.

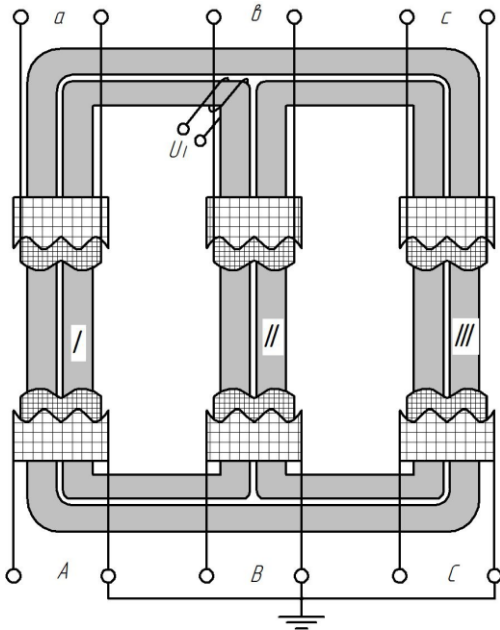


Рис. 1. Конструкция антирезонансного трансформатора напряжения

Индуктивное сопротивление нулевой последовательности будет равняться нулю, что приведет к отсутствию феррорезонанса. Для определения соотношений между нулевыми последовательностями напряжений на рабочих и измерительной обмотках было проведено экспериментальное исследование витого трехстержневого трансформатора со следующими параметрами (рис. 2):

- 1) обмотки: первичные – 80 витков, вторичные – 20 витков, на одном стержне – 10;
- 2) провод: ПЭВ-2,  $S = 1 \times 10^{-6} \text{ м}^2$ .

Схемы эксперимента приведены на рис. 3. Для измерений параметров трансформатора использовался цифровой осциллограф (Fluke 124).

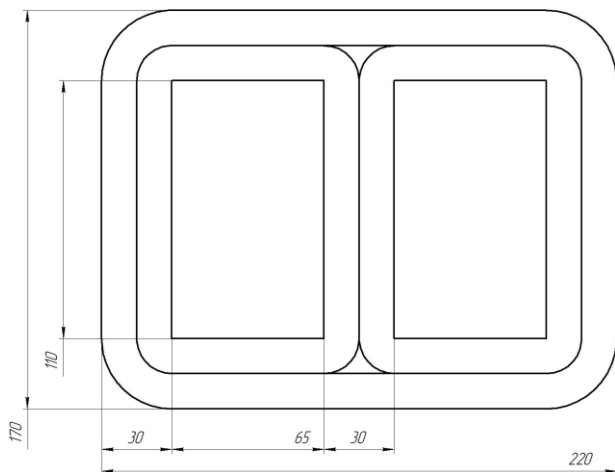


Рис. 2. Габаритные размеры трансформатора

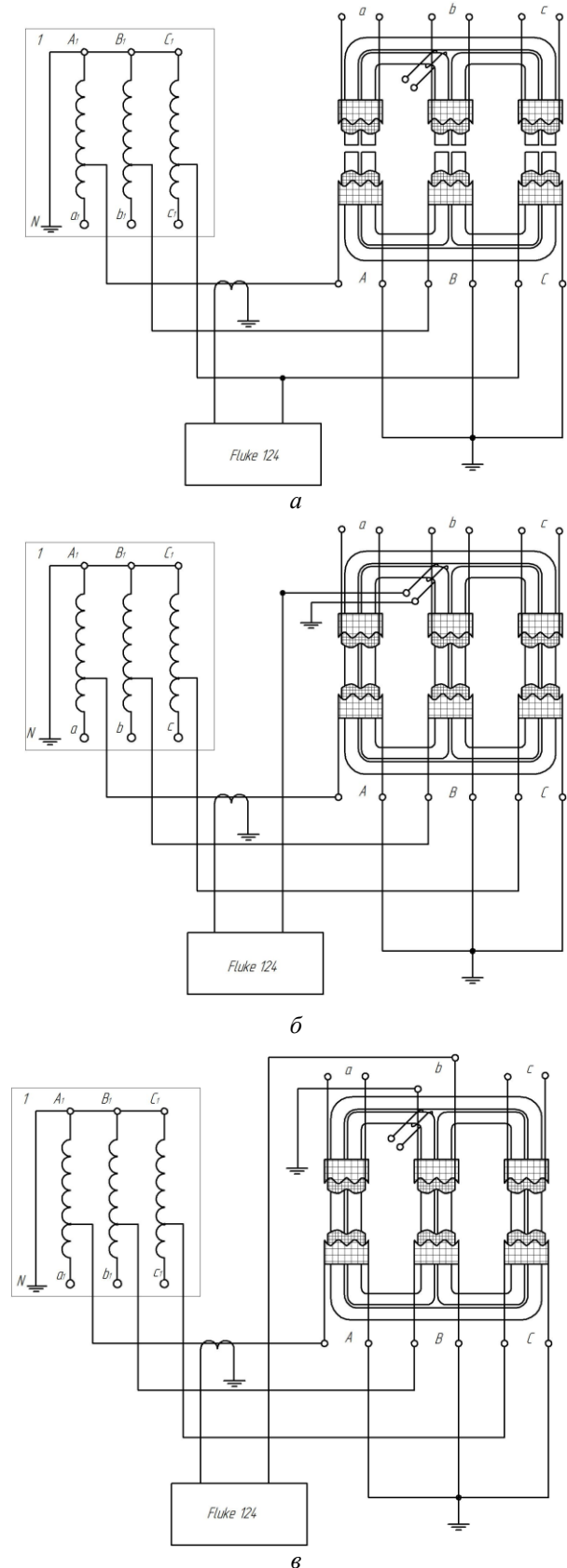
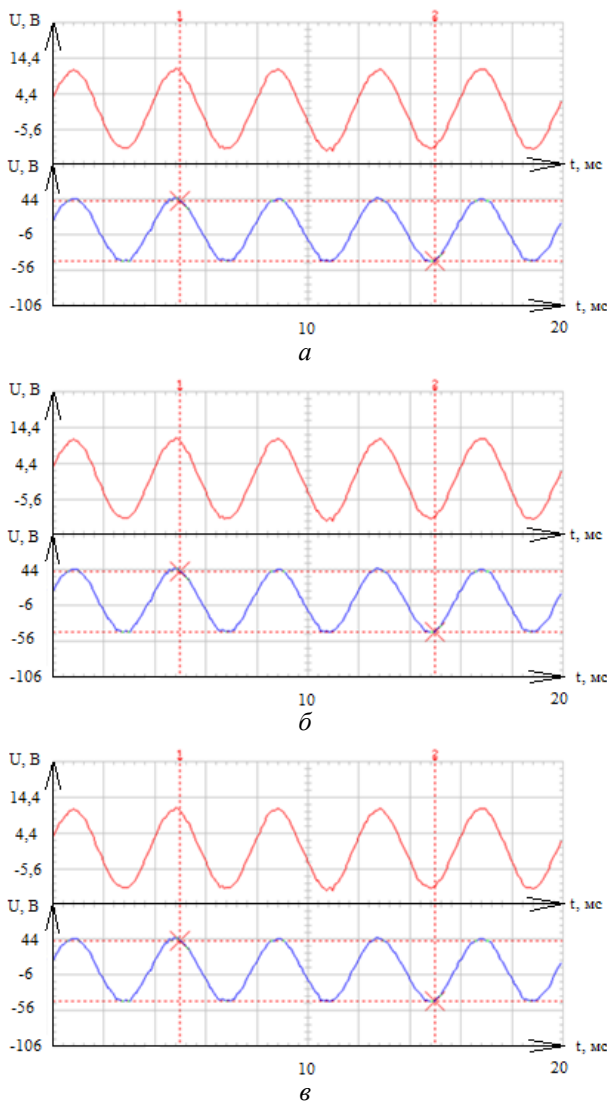


Рис. 3. Схема экспериментального исследования: 1 – автотрансформатор; а – измерение входного тока и напряжения; б – измерение входного тока и выходного напряжения на одном стержне; в – измерение входного тока и выходного напряжения на двух стержнях

**Результаты и их обсуждения.** На рис. 4 представлены зависимости первичных напряжений (нижний график) и выходного напряжения (верхний график) от времени. Зависимости выходного напряжения (верхний график) от времени (фазы  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ) имеют синусоидальную форму, откуда видно, что выходное фазное напряжение нулевой последовательности равно нулю.

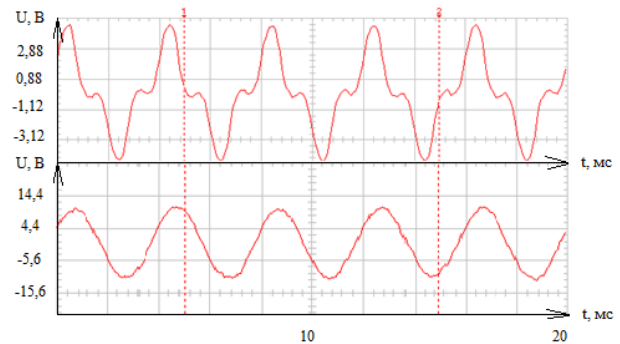


**Рис. 4.** Экспериментальные зависимости первичного напряжения и выходного напряжения фазных обмоток:  $a$  – фаза  $A$  (верхний график – первичное напряжение, нижний график – выходное напряжение);  $b$  – фаза  $B$  (верхний график – первичное напряжение, нижний график – выходное напряжение);  $c$  – фаза  $C$  (верхний график – первичное напряжение, нижний график – выходное напряжение)

В результате эксперимента были определены следующие значения напряжений трансформатора:

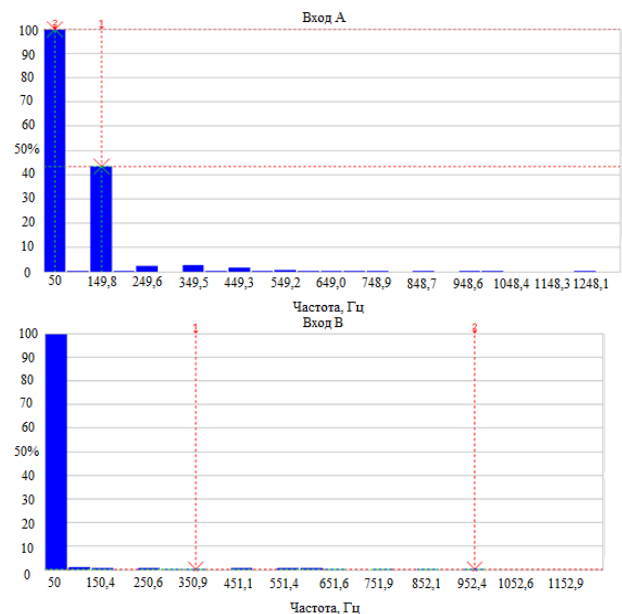
$U_A = 31,4 \text{ В}$ ,  $U_a = 7,78 \text{ В}$  – подаваемое напряжение и вторичное напряжение фазы  $A$ ;  
 $U_B = 30,9 \text{ В}$ ,  $U_b = 7,67 \text{ В}$  – подаваемое напряжение и вторичное напряжение фазы  $B$ ;  
 $U_C = 31,3 \text{ В}$ ,  $U_c = 7,59 \text{ В}$  – подаваемое напряжение и вторичное напряжение фазы  $C$ ;  
 $U_{\text{изм}} = 2,47 \text{ В}$ ,  $U_B = 31,5 \text{ В}$  – напряжение на измерительной обмотке и фазное первичное напряжение.

На рис. 5 приведены осциллограммы напряжений на измерительной обмотке и фазные напряжения. Как видим, в первом случае выходное напряжение имеет заостренную форму, а во втором – практически синусоидальную.



**Рис. 5.** Осциллограммы напряжений на измерительной обмотке и фазные напряжения

На рис. 6 даны гармонические составляющие напряжений, приведенных на рис. 5.



**Рис. 6.** Гармонические составляющие напряжений на измерительной обмотке и фазных напряжений

Рассмотрим соотношения между фазными напряжениями и потоками в стержнях: потоки прямой последовательности в стержнях (I, III; II, I; III, II) сдвинуты на угол  $\frac{\pi}{3}$ .

Величины индукции в каждом стержне равны между собой:

$$B_I = B_{II} = B_{III} = B_A. \quad (1)$$

Суммарная индукция в фазе A может быть определена по формуле:

$$B_A = \frac{U_A}{4,44 \times f \times w_I \times \sqrt{3} \times S_\Sigma}, \quad (2)$$

где  $S_\Sigma$  – суммарное сечение двух стержней.

Напряжения в фазах определим следующим образом:

$$u_A = w_I \left( \frac{d\Phi_I}{dt} - \frac{d\Phi_{III}}{dt} \right) + i_1 R_I + L_S \frac{di_1}{dt}; \quad (3)$$

$$u_B = w_I \left( \frac{d\Phi_{II}}{dt} - \frac{d\Phi_I}{dt} \right) + i_2 R_I + L_S \frac{di_2}{dt}; \quad (4)$$

$$u_C = w_I \left( \frac{d\Phi_{III}}{dt} - \frac{d\Phi_{II}}{dt} \right) + i_3 R_I + L_S \frac{di_3}{dt}. \quad (5)$$

Приближенно

$$u_{изм} = U_{1m} \sin \omega t - U_{3m} \sin 3\omega t, \quad (6)$$

где  $u_{изм}$  – мгновенное напряжение на измерительной обмотке;  $U_{1m}$  – напряжение по первой гармонике;  $U_{3m}$  – напряжение по третьей гармонике.

Амплитуда напряжения в измерительной обмотке (рис. 3, б) составила 4,64 В, значит

$$U_{1m} + U_{3m} = 4,64 \text{ В}. \quad (6)$$

Как видно из рис. 4

$$U_{3m} = 43,6\% \text{ от } U_{1m} \quad (7)$$

$$\text{или } U_{3m} = 0,436 U_{1m}.$$

Тогда

$$U_{1m} + 0,436 U_{1m} = 4,64 \text{ В}. \quad (8)$$

В результате расчетов были определены следующие значения напряжений:

$$U_{1m} = 3,23 \text{ В}, \quad U_{3m} = 1,41 \text{ В}.$$

Исходя из закона электромагнитной индукции [4], найдем  $\Phi_I$  – поток в стержне I:

$$\Phi_I = \frac{U_I}{4,44 \times f \times w_{изм}}. \quad (9)$$

Поток в стержне I:  $\Phi_I = 0,001 \text{ Вб}$ .

Так как суммарный поток

$$\Phi_\Sigma = \sqrt{3} \times \Phi_I, \quad (10)$$

то  $\Phi_\Sigma = 1,73 \text{ мВб}$ .

Отсюда находим вторичное напряжение фазы b

$$U_b = 4,44 \times f \times w_2 \times \Phi_\Sigma. \quad (11)$$

В результате расчетов определено, что  $U_b = 7,69 \text{ В}$ , что совпадает с экспериментальными данными (рис. 4, б).

**Выводы.** Анализ экспериментальных исследований показал, что данная конструкция магнитопровода трансформатора дает возможность предотвращения феррорезонанса: магнитные потоки нулевой последовательности компенсируются благодаря встречному направлению, сопротивление нулевой последовательности близко к нулю и феррорезонанс будет отсутствовать. Конструкция обладает следующими достоинствами: повышенная надежность и уменьшенные массогабаритные показатели трансформатора, отсутствие дополнительных сопротивлений и потерь в стали, отсутствие конструкционной стали. А также уменьшается погрешность, связанная с явлением феррорезонанса. Форма кривой напряжения на измерительной и выходной обмотке различаются. На измерительной обмотке присутствуют высшие гармоники, на выходной – нет. Исходя из результатов эксперимента, выходное напряжение нулевой последовательности не содержит.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **ГОСТ 1983–2001.** Межгосударственный стандарт. Трансформаторы напряжения. Общие технические условия. [GOST 1983–2001. Interstate standard. The voltage transformers. General specifications.]
2. **Зихерман М. Х.** Антирезонансные трансформаторы напряжения // Новости электротехники. 2011. № 2 (68). С. 68–71. [М. Н. Ziherman, "Antiresonance voltage transformers," *News of electrical engineering*, no. 2 (68) 2011.]
3. **Патент РФ** № 131231 U1, H01F30/12, 16.01.2013. [RF Patent no. 131231 U1, H01F30/12, 16.01.2013.]
4. **Бессонов Л. А.** Теоретические основы электротехники. М.: Гардарики, 2006. 701 с. [L. A. Bessonov, *Theory of Electrical Engineering*. Moscow: Gardariki, 2006.]

#### ОБ АВТОРАХ

**РОГИНСКАЯ Любовь Эммануиловна**, проф. каф. электро-механики. Дипл. инж.-электромех. (Горьковск. политехн. ин-т, 1959). Д-р техн. наук по полупроводн. преобр. электроэнергии (МЭИ, 1994). Иссл. в обл. полупроводн. преобр. комплексов.

**ГУСАКОВ Денис Валерьевич**, асп. той же каф. Дипл. инж.-электроэнергетик (УГАТУ, 2011). Иссл. в обл. измер. трансформ. напряжения.

**METADATA**

**Title:** Possibility of using of a three phase strip magnetic circuit for the antiresonance voltage transformer.

**Authors:** L. E. Roginskaya and D. V. Gusakov.

**Affiliation:** Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia.

**Email:** gusakov.den@mail.ru

**Language:** Russian.

**Source:** Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 18, no. 3 (64), pp. 112-116, 2014. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

**Abstract:** An experimental research of the three-phase magnetic ribbon, received his addiction. A comparative analysis of experimental and theoretical data. Found the possibility of using magnetic ribbon for three-phase antiresonant voltage transformer.

**Key words:** antiresonant voltage transformer; ferroresonance phenomena; magnetic ribbon.

**About authors:**

**ROGINSKAYA, Lubov' Emmanuilovna**, prof. Dept. of Electromechanics.. Dipl. electromechanical engineer. (Gorkovsk. Polytechnic. Institute, 1959). Dr. of Tech. Sci. (MEI, 1994).

**GUSAKOV, Denis Valer'evich**, Postgrad. (PhD) Student, Dept. of electromechanical. Dipl. electricity engineer (UGATU, 2011).