

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТРЕХФАЗНО-МНОГОФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧИСЛА ФАЗ С ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫМ СОЕДИНЕНИЕМ КАТУШЕК КАЖДОЙ ФАЗЫ ВТОРИЧНОЙ ОБМОТКИ

В статье рассмотрен трехфазно-многофазный трансформаторный преобразователь числа фаз с последовательным соединением катушек каждой фазы вторичной обмотки; приведена его схема замещения и линейная математическая модель. В качестве примера выполнен анализ работы изготовленного трехфазно-семифазного трансформаторного преобразователя числа фаз. В результате электромагнитных испытаний опытного образца определены параметры схемы замещения устройства. С использованием математической модели рассчитаны и построены рабочие характеристики. Выполнено сравнение результатов теоретических расчетов и экспериментальных измерений. Наибольшие погрешности, полученные при сравнении расчетных и экспериментальных значений КПД и коэффициента мощности, составили 3,5 % и 2,2 % соответственно.

Ключевые слова: преобразователь числа фаз, трансформатор, многофазная обмотка, схема замещения, математическая модель.

В структуру различных электротехнических комплексов и систем часто входят трансформаторные преобразователи числа фаз (ТПФ). Например, ТПФ необходимы для работы многофазных систем, обеспечивающих транспорт электроэнергии [1–4], в устройствах для выпрямления и инвертирования [5–8], для питания электропривода с многофазными электрическими машинами [9, 10]. Благодаря увеличению числа фаз можно повысить энергетические, массогабаритные показатели, а также улучшить электромагнитную совместимость таких комплексов и систем.

В настоящее время известны ТПФ с разными конструкциями магнитопровода и схемами соединения обмоток [11–14]. Формирование необходимого количества фаз многофазной обмотки ТПФ осуществляется за счет соединения выводов катушек (и их отпаек) вторичной обмотки устройства в различные схемы. Это существенно усложняет конструкцию такого специального трансформатора, увеличивает трудоемкость при его сборке и ремонте. Более простую схему соединения обмоток имеет ТПФ с последовательным соединением катушек каждой фазы многофазной вторичной обмотки (рис. 1).

Многофазная симметричная система ЭДС на выводах вторичной обмотки может быть получена для различного количества витков катушек $w_{2,i}$ (рис.

1), где $I = 1...3m_2$; $k = 1...m_2$, m_2 — количество фаз вторичной обмотки.

В [15, 16] рассмотрен подход для определения количества витков многофазной обмотки ТПФ (рис. 1). Число витков $w_{2,i}$ может принимать положительные или отрицательные значения. У катушек с отрицательными значениями количества витков ЭДС должно быть в противофазе с ЭДС катушек с положительными значениями, размещённых на одном стержне сердечника ТПФ, что обеспечивается различным направлением намотки катушек или маркировкой их выводов. Определение минимального количества витков катушек выполняется с учетом нескольких ограничений, при которых на выводах вторичной обмотки будет многофазная симметричная система ЭДС, мощность многофазной симметричной нагрузки равномерно распределяется по трем фазам первичной обмотки, а также обеспечивается одинаковое количество витков каждой фазы вторичной обмотки [16].

Необходимо отметить, что преобразователь числа фаз со схемой соединения катушек вторичной обмотки, показанной на рис. 1, был использован в качестве трехфазно-двухфазного и в дальнейшем как трехфазно-многофазный ТПФ [1, 11].

Многофазная вторичная обмотка ТПФ является простой и технологичной: для увеличения числа фаз этой обмотки необходимо добавить на каждый

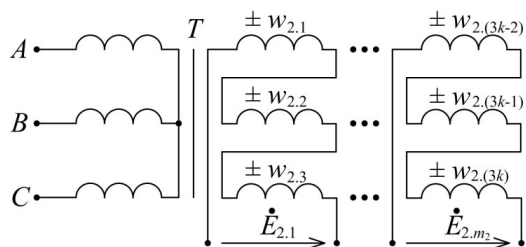


Рис. 1. Схема соединения обмоток трехфазно-многофазного ТПФ

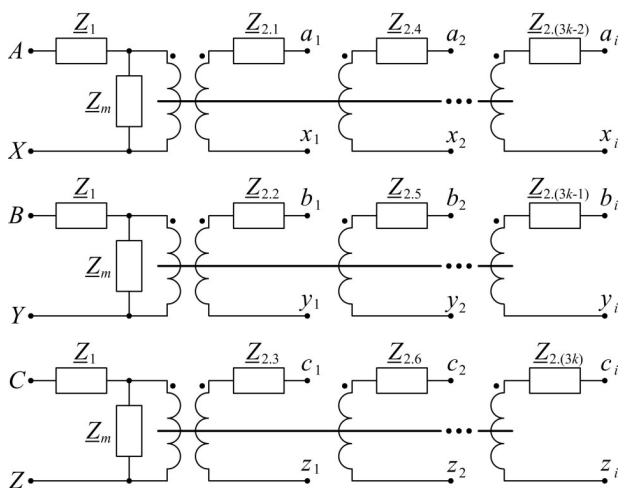


Рис. 2. Схема замещения трехфазно-многофазного ТПФ

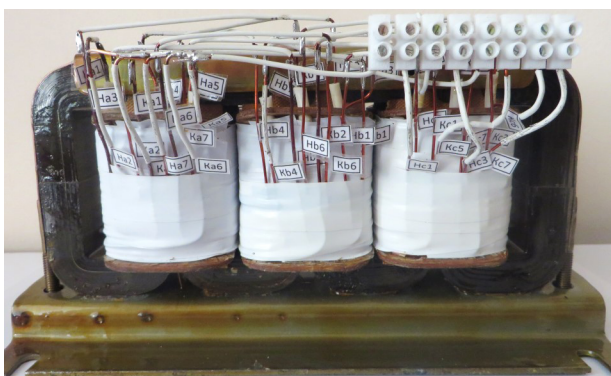


Рис. 3. Опытный образец трехфазно-семифазного ТПФ

из трех стержней магнитопровода по одной катушке с заданным количеством витков; все катушки многофазной обмотки должны быть изготовлены из провода одинакового сечения.

Для анализа работы ТПФ используем подход, основанный на схемах замещения устройства. Схема замещения трехфазно-многофазного ТПФ со схемой соединения обмоток (рис. 1) приведена на рис. 2.

Катушки каждой фазы в зависимости от количества фаз вторичной обмотки могут быть соединены согласно или встречно между собой, поэтому на схеме с m -фазной вторичной обмоткой (рис. 2) не показаны соединения катушек, обеспечивающих формирование многофазной системы напряжений.

Комплексные сопротивления схемы замещения позволяют учитывать потери мощности в магнитопроводе и обмотках, ЭДС, наведенные основным

магнитным потоком и полями рассеивания ТПФ [17, 18].

Допущения, принятые при моделировании ТПФ: устройство подключается к сети с симметричным трехфазным напряжением, характеристики магнитной цепи и обмоток трансформатора линейные, магнитная связь между катушками, размещенными на разных стержнях сердечника, отсутствует.

Математическая модель трехфазно-многофазного ТПФ с последовательным соединением катушек каждой фазы вторичной обмотки для любого числа фаз вторичной обмотки (m_2) состоит из следующих уравнений:

$$-\dot{E}_{1,(A,B,C)} + (R_1 + jX_1)\dot{I}_{1,(A,B,C)} = \dot{U}_{1,(A,B,C)}; \quad (1)$$

$$\dot{I}_{1,A}W_1 + \sum_{k=1}^m \dot{I}_{2,(3k-2)}W_{2,(3k-2)} = \frac{-\dot{E}_{1,A}}{R_m + jX_m}W_1; \quad (2)$$

$$\dot{I}_{1,B}W_1 + \sum_{k=1}^m \dot{I}_{2,(3k-1)}W_{2,(3k-1)} = \frac{-\dot{E}_{1,B}}{R_m + jX_m}W_1; \quad (3)$$

$$\dot{I}_{1,C}W_1 + \sum_{k=1}^m \dot{I}_{2,(3k)}W_{2,(3k)} = \frac{-\dot{E}_{1,C}}{R_m + jX_m}W_1; \quad (4)$$

$$\dot{E}_{2,k} = \dot{E}_{1,A} \frac{W_{2,(3k-2)}}{W_1} + \dot{E}_{1,B} \frac{W_{2,(3k-1)}}{W_1} + \dot{E}_{1,C} \frac{W_{2,(3k)}}{W_1}; \quad (5)$$

$$\dot{U}_{2,k} = \dot{E}_{2,k} - \dot{I}_{2,k}(R_{2,k} + jX_{2,k}) = 0; \quad (6)$$

$$R_{2,k} = r_{2,(3k-2)} + r_{2,(3k-1)} + r_{2,(3k)} + R_{2,n}; \quad (7)$$

$$X_{2,k} = x_{2,(3k-2)} + x_{2,(3k-1)} + x_{2,(3k)} + X_{2,n}. \quad (8)$$

где $E_{1,(A,B,C)}$ — действующие значения ЭДС, наводимые основным магнитным потоком в фазах A, B и C первичной обмотки, В;

$I_{1,(A,B,C)}$ — действующие значения фазных токов первичной обмотки, А;

$U_{1,(A,B,C)}$ — действующие значения фазных напряжений сети, приложенных к первичной обмотке, В;

W_1 и $W_{2,i}$ — число витков катушек первичной трехфазной обмотки и i -й катушки вторичной многофазной обмотки;

R_1 и X_1 — сопротивления, учитывающие потери мощности и ЭДС, наводимые потоками рассеивания в первичной обмотке ($Z_1 = R_1 + jX_1$), Ом;

R_m и X_m — сопротивления, учитывающие магнитные потери ТПФ и ЭДС от основного магнитного потока в первичной обмотке ($Z_m = R_m + jX_m$), Ом;

$E_{2,k}$ и $I_{2,k}$ — действующие значения фазных ЭДС и токов вторичной обмотки;

$r_{2,i}$ и $x_{2,i}$ — сопротивления, учитывающие потери мощности и ЭДС от потоков рассеивания в катушках вторичной обмотки ($Z_{2,i} = r_{2,i} + jx_{2,i}$), Ом;

$R_{2,n}$ и $X_{2,n}$ — сопротивления нагрузки вторичной многофазной обмотки, Ом.

С использованием серийного трехфазного трансформатора изготовлен опытный образец трехфазно-семифазного ТПФ (рис. 3). Схема соединения и число витков катушек устройства приведены в [16].

На каждом из трех стержней сердечника размещено 77 ± 2 витка вторичной обмотки, каждая фаза содержит 33 ± 1 виток. При намотке катушек рассмотрены значения витков округлены до целых

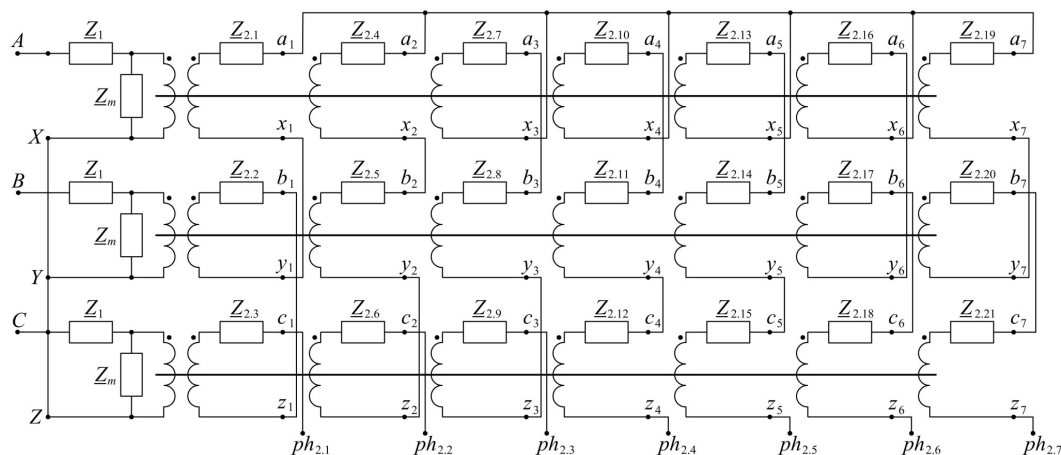


Рис. 4. Схема замещения трехфазно-семифазного ТПФ

Таблица 1

Результаты измерений (опыт холостого хода)

Фаза	$U_{\text{ф.ном}}$ В	$I_{\text{ф.х.х.}}$ А	$P_{\text{х.х.}}$ Вт	$Q_{\text{х.х.}}$ вар
A	222,3	0,064	2,1	14,1
B	223,2	0,065	2,3	14,3
C	224,1	0,069	2,2	15,1
Среднее	223,2	0,066	2,2	14,5

Таблица 2

Результаты измерений (опыт короткого замыкания)

Фаза	$U_{\text{к.з.}}$ В	$I_{\text{ф.ном}}$ А	$P_{\text{к.з.}}$ Вт	$Q_{\text{к.з.}}$ вар
A	28,1	0,226	6,18	0,91
B	28,2	0,228	6,12	0,90
C	28,0	0,225	6,19	0,89
Среднее	28,1	0,226	6,16	0,90

значений, поэтому общее количество витков нескольких фаз отличается на один виток. Вторичная семифазная обмотка соединена звездой с нулевым выводом, выводы подключены к винтовому зажиму.

Номинальные параметры ТПФ (рис. 3): полная мощность — 100 ВА; напряжение первичной и вторичной обмотки — 220 и 5,86 В соответственно; ток первичной и вторичной обмотки — 0,226 и 2,44 А соответственно, коэффициент мощности симметричной многофазной нагрузки 0,8, частота — 50 Гц.

Схема замещения трехфазно-семифазного ТПФ приведена на рис. 4.

Сопротивления элементов ТПФ определены в результате электромагнитных испытаний. При экспериментальном исследовании ТПФ выполнены следующие опыты и измерения [19]:

1. Опыт холостого хода. При проведении опыта определены действующее значение напряжения катушек первичной и вторичной обмоток; ток холостого хода; активная и реактивная мощность, потребляемая из сети (табл. 1).

Напряжения катушек вторичной обмотки в режиме холостого хода равны: $U_{2,x,x_i} = \{5,5; 1,2; 1,2; 1,6; 0,5; 5,3; 0,2; 4,8; 2,5; 4,1; 3,5; 0,0; 4,1; 0,0; 3,5; 0,2; 2,5; 4,8; 1,6; 5,3; 0,5\}$ В, значения фазных ЭДС вторичной обмотки: $6,6 \pm 0,1$ В.

2. Опыт короткого замыкания. При проведении опыта определены действующее значение напряжения короткого замыкания; активная и реактивная мощность, потребляемая из трехфазной сети (табл. 2).

Действующее значение фазных токов вторичной обмотки при проведении опыта короткого замыкания равно $2,44 \pm 0,1$ А.

3. Измерение сопротивления обмоток постоянному току выполнено способом падения напряже-

ния [19]. Омическое сопротивление катушек фаз A, B и C первичной обмотки равно 60,9; 62,0 и 60,2 Ом соответственно, каждой фазы вторичной обмотки: $R_{2,k} = \{200; 192; 198; 204; 206; 198; 195\}$ мОм.

С использованием данных табл. 1 рассчитаны сопротивления, учитывающие магнитные потери и ЭДС от основного магнитного потока (рис. 4): $R_m = 495$ Ом и $X_m = 3262,7$ Ом.

Сопротивления катушек первичной и вторичной обмоток устройства определены при допущении, что активная и реактивная мощность, потребляемая из сети в опыте короткого замыкания (18,5 Вт и 2,6 вар), делятся на две равные части между трехфазной и многофазной обмотками ТПФ ($R_1 = 60,2$ Ом; $R_{2,k} = 222,5$ мОм; $X_1 = 8,58$ Ом; $X_{2,k} = 31,7$ мОм).

Как можно видеть из табл. 2, при проведении опыта короткого замыкания значение коэффициента мощности составило 0,99, это можно объяснить тем, что на каждом стержне сердечника катушки вторичной обмотки (рис. 4) включены встречно между собой, что приводит к уменьшению индуктивности.

Для расчета напряжения на различных катушках вторичной обмотки устройства нужно определить активные и индуктивные сопротивления каждой катушки $r_{2,i}$ и $x_{2,i}$. При допущении об одинаковой средней длине витков катушек многофазной обмотки сопротивление каждой катушки можно вычислить по выражениям:

$$r_{2,i} = \frac{W_{2,i}}{W_{2,(3k-2)} + W_{2,(3k-1)} + W_{2,(3k)}} R_{2,k}; \quad (9)$$

$$x_{2,i} = \frac{W_{2,i}}{W_{2,(3k-2)} + W_{2,(3k-1)} + W_{2,(3k)}} X_{2,k}. \quad (10)$$

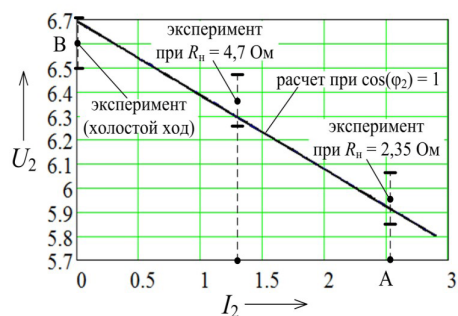


Рис. 5. Зависимость напряжения вторичной обмотки от нагрузки трехфазно-семифазного ТПФ

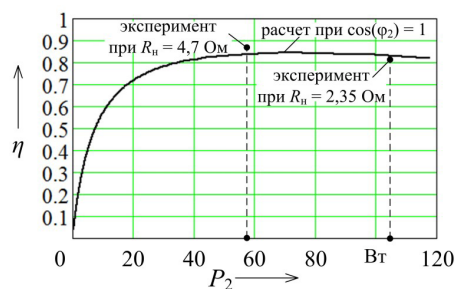


Рис. 6. КПД трехфазно-семифазного ТПФ

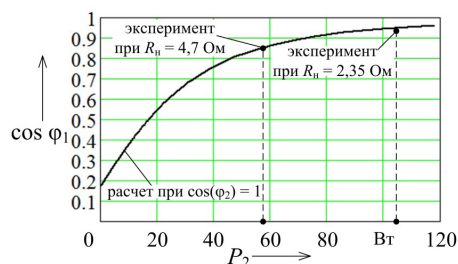


Рис. 7. Коэффициент мощности трехфазно-семифазного ТПФ

Активные сопротивления катушек $r_{2,r}$ рассчитанные по формуле (9), можно уточнить с использованием известных значений омического сопротивления соответствующей катушки и коэффициента вытеснения тока, учитывающего увеличение активных сопротивлений под влиянием поверхностного эффекта.

Точно рассчитать индуктивные сопротивления обмоток различных устройств сложно из-за того, что магнитные поля рассеивания катушек замыкаются через воздух и конструктивные элементы, сцепляются с неполными и разными числами витков катушек [17]. При этом существующие теоретические и экспериментальные методы позволяют определить эти сопротивления с достаточной для инженерной практики точностью [17, 20].

Для ТПФ (рис. 3) с использованием математической модели (1)–(8) рассчитаны рабочие характеристики (рис. 4–6). При расчете характеристик коэффициент мощности симметричной нагрузки принят равным единице.

На рис. 5 показаны интервалы, в которых находятся измеренные значения фазных напряжений при подключении к вторичной обмотке активных сопротивлений 4,7 и 2,35 Ом. На выводах вторичной обмотки ТПФ (рис. 3) формируется семифазная си-

стема напряжений с незначительной несимметрией из-за отличия числа витков катушек вторичной обмотки изготовленного ТПФ от необходимого числа витков, определенных в результате расчета [16]. При проектировании устройства можно обеспечить необходимое число витков катушек за счет оптимизации размеров катушек и магнитной цепи, а также значения отношения «вольт на виток» такого специального трансформатора.

На рис. 6 и 7 также приведены значения КПД и коэффициента мощности, определенные экспериментально. Наибольшие значения погрешностей КПД и коэффициента мощности, полученные при сравнении результатов расчета и эксперимента, составили 3,5 % и 2,2 % соответственно.

В результате изложенного можно сделать следующие выводы:

1) составлена линейная математическая модель трехфазно-многофазного ТПФ с последовательным соединением катушек каждой фазы вторичной обмотки, с использованием которой можно выполнить анализ работы ТПФ с любым количеством фаз вторичной обмотки, большим двух;

2) в результате экспериментальных исследований определены параметры схемы замещения трехфазно-семифазного ТПФ;

3) приведены расчетные выражения для определения активного и индуктивного сопротивления катушек многофазной вторичной обмотки рассмотренного ТПФ, что необходимо для расчета рабочих диапазонов изменения напряжения каждой катушки;

4) выполнен расчет рабочих характеристик трехфазно-семифазного ТПФ, наибольшие значения погрешностей КПД и коэффициента мощности, полученные при сравнении результатов расчета и эксперимента, составили 3,5 % и 2,2 % соответственно.

Библиографический список

1. Закарюкин В. П., Крюков А. В. Моделирование многофазных линий электропередачи: моногр. Иркутск: Изд-во ИргУПС, 2014. 168 с.
2. Гершенгорн А. И. Многофазные линии электропередачи высокого и сверхвысокого напряжения // Электрические станции. 1994. № 8. С. 67–70.
3. Закарюкин В. П., Крюков А. В., Тхао Лэ Ван. Комплексное моделирование мультифазных, многоцепных и компактных линий электропередачи: моногр. Иркутск: Изд-во ИргУПС, 2020. 296 с. ISBN 978-5-98710-387-6.
4. Москалев Ю. В. Повышение эффективности транспорта электроэнергии с использованием трансформаторного преобразователя числа фаз и многофазной линии электропередачи // Проблемы машиноведения: материалы VII Междунар. науч.-техн. конф. / ред. Ю. А. Бурьян. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2023. С. 13–18.
5. Щуров Н. И., Мятаж С. В. Синтез и анализ многофазных вентиляльных преобразователей: моногр. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2020. 202 с. ISBN 978-5-7782-4140-4.
6. Рогинская Л. Э., Ялалова З. И. Определение электромагнитной мощности фазообразующих трансформаторов преобразовательных установок // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2013. № 2, Т. 9. С. 18–23. EDN: RPFQVP.
7. Abdollahi R. Harmonic Reduction Using A Novel Multipulse AC-DC Converter // World Journal of Engineering. 2018. Vol. 15 (2). P. 520–530. DOI: 10.1108/WJE-11-2017-0353.
8. Москалев Ю. В. Моделирование трансформаторного преобразователя числа фаз с последовательным соединением

- катушек каждой фазы вторичной обмотки как элемента схемы выпрямления // Практическая силовая электроника. 2022. № 4 (88). С. 30–36. EDN: WNDZMR.
9. Терешкин В. М., Гришин Д. А., Макулов И. А. Перспективы применения многофазных машин переменного тока // Электроника и электрооборудование транспорта. 2017. № 1. С. 19–26. EDN: YGKHUR.
10. Levi E., Bojoi R., Profumo F. [et al.]. Multiphase induction motor drives – a technology status review // IET Electric Power Applications. 2007. Vol. 1 (4). P. 489–516. DOI: 10.1049/iet-epa:20060342.
11. Ronsin F. Transformateur diphasé-triphasé. FR Brevet 2648612 A1; date d'application 15 juin, 1989; date de publiés 21 December, 1990.
12. Paice D. Nine-Phase Step-Up/Step-Down Autotransformer. US patent 7274280; filed May 18th, 2006; published September 25th, 2007.
13. Пат. 2487455 С1 Российская Федерация, МПК Н 02 М 5/14. Девятифазный преобразователь числа фаз / С. Н. Григорьев, В. А. Сучков, Е. В. Афонина, В. В. Филатов, Ю. И. Солюянов. № 2012109621/07; заявл.14.03.12; опубл. 10.07.13. Бюл. № 19.
14. Пат. 143244 U1 Российская Федерация, МПК Н 02 М 5/14. Многофазный трансформаторный преобразователь числа фаз / Ю. В. Рахманова, Л. Э. Рогинская, А. С. Горбунов, П. В. Шилов. № 2014108411/07; заявл. 04.03.14; опубл. 20.07.14. Бюл. № 20.
15. Москалев Ю. В. Определение минимального числа витков катушек вторичной обмотки трансформаторного трехфазно-многофазного преобразователя числа фаз // Омский научный вестник. 2022. № 1 (181). С. 61–66. DOI: 10.25206/1813-8225-2022-181-61-66.
16. Москалев Ю. В. Оптимизация схемы соединения и количества витков катушек вторичной обмотки трехфазно-многофазного трансформаторного преобразователя числа фаз // Вестник Московского энергетического института. 2023. № 1. С. 17–24. DOI: 10.24160/1993-6982-2023-1-17-24.
17. Вольдек А. И., Попов В. В. Электрические машины. Введение в электромеханику. Машины постоянного тока и трансформаторы. Санкт-Петербург: Питер, 2008. 322 с. ISBN 978-5-469-01380-8.
18. Fitzgerald A. E., Kingsley C., Umans S. Electric Machinery. 6th ed. New York: McGraw-Hill, 2003. 688 p. ISBN 0-07-366009-4.
19. ГОСТ 3484.1-88. Трансформаторы силовые. Методы электромагнитных испытаний. Введ. 1990–01–01. Москва: Изд-во стандартов, 1989. 79 с.
20. Михеев Г. М., Швецов В. М., Иванова Т. Г. Методы определения индуктивности рассеяния обмоток силового трансформатора // Вестник Чувашского университета. 2009. № 2. С. 147–153.

МОСКАЛЕВ Юрий Владимирович, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Электрические машины и общая электротехника» Омского государственного университета путей сообщения, г. Омск.
SPIN-код: 1422-1951
AuthorID (РИНЦ): 657144
ORCID: 0000-0002-0970-937X
AuthorID (SCOPUS): 57200088110
Адрес для переписки: yuriyvm@mail.ru

Для цитирования

Москалев Ю. В. Математическая модель трехфазно-многофазного трансформаторного преобразователя числа фаз с последовательным соединением катушек каждой фазы вторичной обмотки // Омский научный вестник. 2024. № 1 (189). С. 79–85. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-189-79-85.

Статья поступила в редакцию 14.09.2023 г.

© Ю. В. Москалев

MATHEMATICAL MODEL OF A THREE-PHASE-MULTIPHASE TRANSFORMER PHASES CONVERTER WITH A SERIES CONNECTION OF COILS OF EACH PHASE OF SECONDARY WINDING

The article considers a three-phase-multiphase transformer converter of the number of phases with a serial connection of coils of each phase of the secondary winding, its substitution scheme and a linear mathematical model are given. As an example, the analysis of the operation of a manufactured three-phase-seven-phase transformer converter of the number of phases is performed. As a result of electromagnetic tests of the prototype, the parameters of the replacement circuit of the device are determined. Using a mathematical model, the operating characteristics are calculated and constructed. The results of theoretical calculations and experimental measurements are compared. The largest errors obtained when comparing the calculated and experimental values of efficiency and power factor are 3,5 % and 2,2 %, respectively.

Keywords: phase number converter, transformer, multiphase winding, connection diagram, substitution scheme, mathematical model.

References

1. Zakaryukin V. P., Kryukov A. V. Modelirovaniye mnogofaznykh liniy elektropredachi [Modelling of multiphase transmission lines]. Irkutsk, 2014. 168 p. (In Russ.).
2. Gershengorn A. I. Mnogofaznyye linii elektropredachi vysokogo i sverkhvysokogo napryazheniya [High and extra-high voltage multiphase transmission lines] // *Elektricheskiye stantsii. Electrical Stations*. 1994. No. 8. P. 67–70. (In Russ.).
3. Zakaryukin V. P., Kryukov A. V., Tkhaio Le Van. Kompleksnoye modelirovaniye mul'tifaznykh, mnogotsepykh i kompaktnykh liniy elektropredachi [Integrated modelling of multiphase, multi-circuit and compact transmission lines]. Irkutsk, 2020. 296 p. ISBN 978-5-98710-387-6. (In Russ.).
4. Moskaiev Yu. V. Povyseniye effektivnosti transporta elektroenergii s ispol'zovaniyem transformatornogo preobrazovatelya chisla faz i mnogofaznoy linii elektropredachi [Improving the efficiency of power transport using transformer phase number converter and multiphase transmission line] // *Problemy mashinovedeniya / Ed. by Yu. A. Buryana*. Omsk, 2023. P. 13–18. (In Russ.).
5. Shchurov N. I., Myatezh S. V. Sintez i analiz mnogofaznykh ventil'nykh preobrazovatelye [Synthesis and analysis of multiphase valve converters]. Novosibirsk, 2020. 202 p. ISBN 978-5-7782-4140-4. (In Russ.).
6. Roginskaya L. E., Yalalova Z. I. Opredeleniye elektromagnitnoy moshchnosti fazopreobrazuyushchikh transformatorov preobrazovatel'nykh ustanovok [The definition of electromagnetic power of the phase-reformative transformers of the transforming plants] // *Elektrotekhnicheskiye i informatsionnyye kompleksy i sistemy. Electrical Engineering and Information Complexes and Systems*. 2013. No. 2, vol. 9. P. 18–23. EDN: RPFQVP. (In Russ.).
7. Abdollahi R. Harmonic Reduction Using A Novel Multipulse AC-DC Converter // *World Journal of Engineering*. 2018. Vol. 15 (2). P. 520–530. DOI: 10.1108/WJE-11-2017-0353. (In Engl.).
8. Moskaiev Yu. V. Modelirovaniye transformatornogo preobrazovatelya chisla faz s posledovatel'nym soyedineniyem katushek kazhdoy fazy vtorichnoy obmotki kak elementa skhemy vypryamleniya [Simulation of a phase transformer converter with series connection of coils of each phase of the secondary winding as an element of rectifying scheme] // *Prakticheskaya silovaya elektronika. Practicheskaya Silovaya Electronica*. 2022. No. 4 (88). P. 30–36. EDN: WNDZMR. (In Russ.).
9. Tereshkin V. M., Grishin D. A., Makulov I. A. Perspektivy primeneniya mnogofaznykh mashin peremennogo toka [Perspectives of multi-phase AC machines] // *Elektronika i elektrooborudovaniye transporta. Electronics and Electrical Equipment of Transport*. 2017. No. 1. P. 19–26. EDN: YGKHUR. (In Russ.).
10. Levi E., Bojoi R., Profumo F. [et al.]. Multiphase induction motor drives – a technology status review // *IET Electric Power Applications*. 2007. Vol. 1 (4). P. 489–516. DOI: 10.1049/iet-epa:20060342. (In Engl.).
11. Ronsin F. Transformateur diphasé-triphasé [Two-phase/three-phase transformer]. FR patent 2648612 A1; filed June 15th, 1989; published December 21st, 1990. (In Fr.).
12. Paice D. Nine-Phase Step-Up/Step-Down Autotransformer. US patent 7274280; filed May 18th, 2006; published September 25th, 2007. (In Engl.).
13. Patent 2487455 C1 Russian Federation, IPC H 02 M 5/14. Devyatifaznyy preobrazovatel' chisla faz [Nine-phase converter] / S. N. Grigoryev, V. A. Suchkov, E. V. Afonina, V. V. Filatov, Yu. I. Soluyanov. No. 2012109621/07. (In Russ.).
14. Patent 143244 U1 Russian Federation, IPC H 02 M 5/14. Mnogofaznyy transformatornyy preobrazovatel' chisla

faz [Multiphase transformer phase number converter] / Yu. V. Rakhmanova, L. E. Roginskaya, A. S. Gorbunov, P. V. Shilov. No. 2014108411/07. (In Russ.).

15. Moskalev Yu. V. Opredeleniye minimal'nogo chisla vitkov katushek vtorichnoy obmotki transformatornogo trekhfazno-mnogofaznogo preobrazovatelya chisla faz [Determination of minimum secondary winding coils turns for transformer three-phase-multiphase phase number converter] // Omskiy nauchnyy vestnik. *Omsk Scientific Bulletin*. 2022. No. 1 (181). P. 61–66. DOI: 10.25206/1813-8225-2022-181-61-66. (In Russ.).

16. Moskalev Yu. V. Optimizatsiya skhemy soyedineniya i kolichestva vitkov katushek vtorichnoy obmotki trekhfazno-mnogofaznogo transformatornogo preobrazovatelya chisla faz [Optimizing the Connection Diagram and Turns Number for the Three-Phase to Multiphase Transformer Converter Secondary Winding Coils] // Vestnik Moskovskogo energeticheskogo instituta. *Bulletin of MPEI*. 2023. No. 1. P. 17–24. DOI: 10.24160/1993-6982-2023-1-17-24. (In Russ.).

17. Vol'dek A. I., Popov V. V. Elektricheskiye mashiny. Vvedeniye v elektromekhaniku. Mashiny postoyannogo toka i transformatory [Electrical machines. Introduction to electromechanics. DC machines and transformers]. Saint Petersburg, 2008. 322 p. ISBN 978-5-469-01380-8. (In Russ.).

18. Fitzgerald A. E., Kingsley C., Umans S. Electric Machinery. 6th ed. New York: McGraw-Hill, 2003. 688 p. ISBN 0-07-366009-4. (In Engl.).

19. GOST 3484.1-88. Transformatory silovyye. Metody elektromagnitnykh ispytaniy [Power transformers. Electromagnetic test methods]. Moscow, 1989. 79 p. (In Russ.).

20. Mikheyev G. M., Shvetsov V. M., Ivanova T. G. Metody opredeleniya induktivnosti rasseyaniya obmotok silovogo transformatora [Method for definition stray induction of high-voltage transformer winding] // Vestnik Chuvashskogo universiteta. *Bulletin of Chuvash University*. 2009. No. 2. P. 147–153. (In Russ.).

MOSKALEV Yury Vladimirovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Electrical Machines and General Electrical Engineering Department, Omsk State Transport University, Omsk.

SPIN-code: 1422-1951

AuthorID (RSCI): 657144

ORCID: 0000-0002-0970-937X

AuthorID (SCOPUS): 57200088110

Correspondence address: yuriyvm@mail.ru

For citations

Moskalev Yu. V. Mathematical model of a three-phase-multiphase transformer phases converter with a series connection of coils of each phase of secondary winding // Omsk Scientific Bulletin. 2024. No. 1 (189). P. 79–85. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-189-79-85.

Received September 14, 2023.

© Yu. V. Moskalev