

УДК 621.314.25

DOI: 10.24160/1993-6982-2023-1-17-24

Оптимизация схемы соединения и количества витков катушек вторичной обмотки трехфазно-многофазного трансформаторного преобразователя числа фаз

Ю.В. Москалев

Рассмотрен подход к определению оптимальной схемы соединения и количества витков катушек вторичной обмотки трехфазно-многофазного трансформаторного преобразователя числа фаз. Каждая фаза многофазной обмотки устройства состоит из трех катушек, расположенных на разных стержнях сердечника и включенных последовательно между собой. Для определения схемы соединения и количества витков катушек многофазной обмотки следует решить оптимизационную задачу с учетом нескольких ограничений, позволяющих обеспечить одинаковое количество витков последовательно соединенных катушек каждой фазы вторичной обмотки, симметричную систему многофазной ЭДС и равномерное распределение симметричной многофазной нагрузки по трем фазам первичной обмотки. Решение оптимизационной задачи с ограничениями выполнено численным методом внутренней точки. В качестве примера использования предложенного подхода взят расчет минимального количества витков трехфазно-семифазного преобразователя числа фаз, представлена схема соединения обмоток данного преобразователя. Приведены расчетные значения полной мощности катушек вторичной обмотки при симметричной активно-индуктивной нагрузке для преобразователя с различным количеством витков катушек, рассчитанных при решении оптимизационной задачи с различными ограничениями.

На базе трехфазного трансформатора стандартной серии изготовлен опытный образец трехфазно-семифазного преобразователя числа фаз. В результате экспериментальных исследований образца получены временные диаграммы напряжений семифазной обмотки, действующие значения токов, напряжений, а также мощность первичной обмотки на холостом ходу и с симметричной нагрузкой. Результаты экспериментальных исследований подтвердили корректность результатов расчета. При использовании предложенного подхода можно спроектировать трехфазно-многофазный преобразователь с числом фаз многофазной вторичной обмотки более двух. При этом количество витков катушек вторичной обмотки будет минимальным, что позволит изготовить устройство с меньшими массогабаритными показателями и снизить расход дорогостоящих электро-технических материалов.

Ключевые слова: преобразователь числа фаз, трансформатор, многофазная обмотка, схема соединения, оптимизация.

Для цитирования: Москалев Ю.В. Оптимизация схемы соединения и количества витков катушек вторичной обмотки трехфазно-многофазного трансформаторного преобразователя числа фаз // Вестник МЭИ. 2023. № 1. С. 17—24. DOI: 10.24160/1993-6982-2023-1-17-24.

Optimization Scheme Connection and Coils Turns Number of the Secondary Winding of the Three-Phase-Multiphase Transformer Converter

Yu.V. Moskaev

The article considers an approach to determining the optimal connection scheme and the number of turns of the coils of the secondary winding of a three-phase-multiphase transformer converter of the number of phases.

Each phase of the multiphase winding of the device consists of three coils located on different core rods and connected in series with each other. In order to determine the connection scheme and the number of turns of the coils of the multiphase winding, it is necessary to solve an optimization problem taking into account several limitations that allow for the same number of turns of the coils of each phase of the secondary winding connected in series, a symmetrical multiphase EMF system and uniform distribution of the symmetrical multiphase load across the three phases of the primary winding. The solution of the optimization problem with constraints is performed by the numerical method of the inner point. As an example of using the proposed approach, the calculation of the minimum number of turns of a three-phase-seven-phase converter of the number of phases is carried out, the connection diagram of the windings of such a converter is given. The calculated values of the total power of the secondary winding coils with a symmetrical active-inductive load for a converter with a different number of coils turns calculated when solving an optimization problem with various constraints are given. On the basis of a three-phase transformer of the standard series, a prototype of a three-phase-seven-phase converter of the number of phases was made. As a result of experimental studies of the prototype, time diagrams of the seven-phase winding voltages, the effective values of currents, voltages, as well as the power of the primary winding at idle and with a symmetrical load were obtained. The results of experimental studies allowed us to confirm the correctness of the calculation results. When using the proposed approach, it is possible to design a three-phase-multiphase

converter with more than two phases of the multiphase secondary winding. At the same time, the number of turns of the secondary winding coils will be minimal, which will make it possible to manufacture a device with smaller weight and size indicators and reduce the consumption of expensive electrical materials.

Key words: phase number converter, transformer, optimization, multiphase winding, connection diagram.

For citation: Moskaev Yu.V. Optimization Scheme Connection and Coils Turns Number of the Secondary Winding of the Three-Phase-Multiphase Transformer Converter. Bulletin of MPEI. 2023;1:17—24. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2023-1-17-24.

Введение

В состав различных электротехнических и электро-механических систем входят преобразователи числа фаз [1 — 22]. За счет роста количества фаз можно значительно улучшить показатели работы таких систем, например:

- уменьшить содержание высших гармоник в сетевом токе и постоянного напряжения выпрямителей и инверторов, что также позволит отказаться от использования входных и выходных фильтров, упростить схемы для выравнивания токов и напряжений при групповом соединении полупроводниковых вентилей, устранить несимметрию токовых нагрузок вентильных мостов эквивалентных многофазных схем выпрямления [9 — 12].

- увеличить пропускную способность и снизить потери многофазных линий электропередач при одинаковом напряжении и сечении проводов, свести к минимуму электромагнитные и акустические поля, негативно воздействующие на окружающую среду [13 — 15].

- повысить эффективность работы электро-механических преобразователей.

Электрические машины с многофазной обмоткой на статоре обладают следующими преимуществами перед трехфазными: увеличение вращающего момента и снижение его пульсаций, уменьшение потерь мощности, уровня шума и вибрации машины, а также улучшение массогабаритных показателей [16 — 20]. Следует отметить, что для управления многофазными двигателями часто используют полупроводниковые преобразователи, реализующие многофазную систему напряжений [21, 22].

В настоящее время широко распространены трансформаторные преобразователи числа фаз (ТПФ), являющиеся более простыми и надежными по сравнению с электро-механическими преобразователями фаз или преобразователями, реализованными с использованием электронных схем [1 — 8]. Известны ТПФ с разными магнитными системами и схемами соединения обмоток [4 — 13].

Разработка новых и совершенствование существующих ТПФ — актуальное направление научных исследований, поскольку позволит повысить эффективность выпрямителей, инверторов, линий электропередач, обеспечить питание многофазных электрических машин.

Рассмотрим ТПФ со схемой соединения, приведенной на рис. 1. У данного ТПФ на стержнях сердечника с одинаковой площадью сечения стержней размещены катушки первичной и вторичной обмоток. Каждая фаза

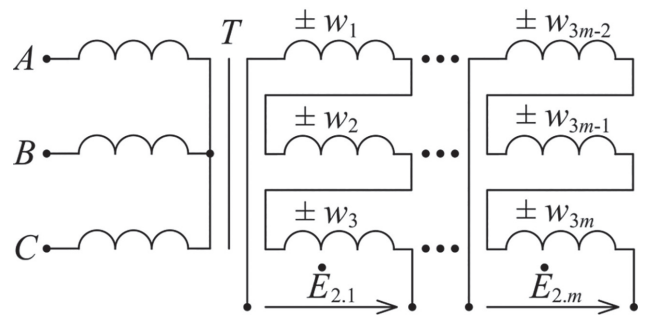


Рис. 1. Схема соединения катушек трехфазно-многофазного ТПФ

вторичной обмотки состоит из трех катушек, расположенных на разных стержнях и включенных между собой последовательно. Многофазную систему ЭДС можно обеспечить при различном числе витков катушек вторичной обмотки [13, 23].

Схема, изображенная на рис. 1, имеет несколько преимуществ перед другими ТПФ:

- 1) при изготовлении преобразователя можно использовать сердечник серийного трехфазного трансформатора (все катушки нужно разместить только на трех стержнях);

- 2) можно обеспечить формирование любого числа фаз вторичной обмотки более двух за счет размещения необходимого количества катушек с заданным количеством витков;

- 3) катушки каждой фазы соединены последовательно между собой, что позволяет изготавливать их из обмоточного провода одинакового сечения;

- 4) вторичная обмотка — проста и технологична, катушки с необходимым количеством витков просто изготовить, при этом нет необходимости соединять катушки с одной или несколькими отпайками в сложные схемы.

В [23] рассмотрена оптимизационная задача, в результате решения которой можно установить минимальное количество витков катушек вторичной обмотки ТПФ со схемой на рис. 1. При этом обеспечиваются симметричная многофазная система ЭДС и равномерное распределение мощности симметричной многофазной нагрузки по трем фазам первичной обмотки. Недостатком данного подхода является то, что суммарное количество витков каждой фазы вторичной обмотки неодинаково. В этом случае сопротивление фазных обмоток будет различным, что приведет к появлению несимметрии многофазного напряжения под нагрузкой.

Таким образом, необходимо решить задачу для определения минимального числа витков катушек и схемы соединения вторичной обмотки ТПФ (см. рис. 1) с учетом условия, которое позволит дополнительно обеспечить одинаковое число витков последовательно соединенных катушек каждой фазы.

При решении задачи количество витков катушек вторичной обмотки установлено в относительных единицах:

$$w_k = W_k / W_2, \quad (1)$$

где k — номер катушки вторичной обмотки; W_2 — число витков катушки вторичной обмотки, позволяющее обеспечить на ее выводах фазную ЭДС E_2 .

По известным значениям количества витков в относительных единицах можно найти необходимое число витков для любого заданного значения фазной ЭДС многофазной обмотки.

При расчетах приняты следующие допущения: первичная обмотка преобразователя подключена к симметричной трехфазной системе напряжений, напряжения в сети — синусоидальные с неизменным действующим значением, ТПФ — идеальный, многофазная нагрузка является симметричной.

Для определения минимального количества витков катушек вторичной многофазной обмотки ТПФ использован критерий [23]:

$$F = \sum_{i=1}^m (|w_{3i-2}| + |w_{3i-1}| + |w_{3i}|) \rightarrow \min; \quad (2)$$

$$w_i \in R; \quad i = \overline{1, m}; \quad m \geq 3.$$

где i — номер фазы вторичной обмотки; m — количество фаз вторичной обмотки ТПФ.

Оптимизационную задачу необходимо решить с учетом нескольких ограничений. Система линейных уравнений позволяет обеспечить симметричную многофазную систему ЭДС:

$$\begin{cases} w_{3i-2} - \frac{1}{2} w_{3i-1} - \frac{1}{2} w_{3i} = \cos\left(-\frac{2\pi}{m}(i-1)\right); \\ -\frac{\sqrt{3}}{2} w_{3i-1} + \frac{\sqrt{3}}{2} w_{3i} = \sin\left(-\frac{2\pi}{m}(i-1)\right). \end{cases} \quad (3)$$

Следующая система линейных уравнений необходима для равномерного распределения мощности многофазной симметричной нагрузки по трем фазам первичной обмотки ТПФ:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^m \left[w_{3i-2} \cos\left(\frac{2\pi}{m}(i-1)\right) \right] = m/3; \\ \sum_{i=1}^m \left[w_{3i-2} \sin\left(\frac{2\pi}{m}(i-1)\right) \right] = 0. \end{cases} \quad (4)$$

Для обеспечения одинакового количества витков последовательно соединенных катушек каждой фазы многофазной обмотки при решении оптимизационной задачи к ограничениям (3), (4) необходимо добавить следующее уравнение:

$$|w_1| + |w_2| + |w_3| - (|w_{3i-2}| + |w_{3i-1}| + |w_{3i}|) = 0. \quad (5)$$

Равенство (5) при $i = 1$ станет тождественным, поэтому его можно исключить из системы уравнений, устанавливающей ограничения.

В результате решения задачи полученные значения количества витков катушек имеют положительный или отрицательный знак, что позволяет составить схему соединения вторичной обмотки.

В качестве примера определим количество витков катушек и схему соединения вторичной обмотки трехфазно-семифазного ТПФ.

Решение оптимизационной задачи с нелинейной целевой функцией (2) и ограничениями (3) — (5) выполнено численным методом внутренней точки [24, 25]. При $m = 7$ нелинейная целевая функция (2) содержит двадцать одно слагаемое, в ограничения входят четырнадцать уравнений системы (3), два уравнения (4) и шесть уравнений (5).

В таблицах 1 — 3 приведены значения витков катушек вторичной обмотки ТПФ в относительных единицах w_k , полученные в результате решения оптимизационной задачи, а также рассчитанные значения полной мощности каждой катушки S_k . Полная мощность катушек S_k вычислена при симметричной семифазной нагрузке с проводимостью $(1 - j)$ См и действующим значением фазных ЭДС равной один вольт.

Из данных табл. 1 следует, что решение задачи с ограничениями (1) не гарантирует равномерного распределения мощности по трем фазам первичной обмотки преобразователя.

При решении задачи с ограничениями (3), (4) мощность нагрузки равномерно распределяется по трем фазам первичной обмотки.

Добавление ограничения (5) позволяет рассчитать минимальное количество витков катушек вторичной обмотки трехфазно-многофазного ТПФ с учетом равномерного распределения мощности симметричной нагрузки по трем фазам первичной обмотки при одинаковом числе последовательно соединенных витков каждой фазы вторичной обмотки устройства (см. табл. 3).

Суммарные значения количества витков каждой фазы вторичной обмотки, полученные с учетом разных критериев в относительных единицах, даны в табл. 4.

Как видно из табл. 4, при учете ограничений (3), (4) фазы вторичной обмотки имеют различное количество витков. В этом случае общее количество витков катушек, необходимых для формирования вторичной обмотки преобразователя, будет меньше, чем при учете дополнительного ограничения (5).

Таблица 1

Количество витков и полная мощность катушек вторичной обмотки трехфазно-семифазного ТПФ с учетом ограничений (3)

$k = 3i - 2$			$k = 3i - 1$			$k = 3i$		
k	w_k	S_k, BA	k	w_k	S_k, BA	k	w_k	S_k, BA
1	1,00	$1,00 + j1,00$	2	0,00	$0,00 + j0,00$	3	0,00	$0,00 + j0,00$
4	0,17	$-0,03 + j0,24$	5	0,00	$0,00 + j0,00$	6	-0,90	$1,03 + j0,76$
7	0,00	$0,00 + j0,00$	8	0,79	$0,98 + j0,52$	9	-0,34	$0,02 + j0,48$
10	-0,65	$0,87 + j0,30$	11	0,50	$0,13 + j0,70$	12	0,00	$0,00 + j0,00$
13	-0,65	$0,30 + j0,87$	14	0,00	$0,00 + j0,00$	15	0,50	$0,70 + j0,13$
16	0,00	$0,00 + j0,00$	17	-0,34	$0,48 + j0,02$	18	0,79	$0,52 + j0,98$
19	0,17	$0,24 - j0,03$	20	-0,90	$0,76 + j1,03$	21	0,00	$0,00 + j0,00$
$\Sigma S_1, \text{BA}$		$2,38 + j2,38$	$\Sigma S_2, \text{BA}$		$2,35 + j2,27$	$\Sigma S_3, \text{BA}$		$2,27 + j2,35$

Таблица 2

Количество витков и полная мощность катушек вторичной обмотки трехфазно-семифазного ТПФ с учетом ограничений (3), (4)

$k = 3i - 2$			$k = 3i - 1$			$k = 3i$		
k	w_k	S_k, BA	k	w_k	S_k, BA	k	w_k	S_k, BA
1	0,95	$0,95 + j0,95$	2	-0,05	$-0,02 + j0,06$	3	-0,05	$0,06 - j0,02$
4	0,17	$-0,03 + j0,24$	5	0,00	$0,00 + j0,00$	6	-0,90	$1,03 + j0,76$
7	0,00	$0,00 + j0,00$	8	0,79	$0,98 + j0,52$	9	-0,34	$0,02 + j0,48$
10	-0,65	$0,87 + j0,30$	11	0,50	$0,13 + j0,70$	12	0,00	$0,00 + j0,00$
13	-0,65	$0,30 + j0,87$	14	0,00	$0,00 + j0,00$	15	0,50	$0,70 + j0,13$
16	0,00	$0,00 + j0,00$	17	-0,34	$0,48 + j0,02$	18	0,79	$0,52 + j0,98$
19	0,17	$0,24 - j0,03$	20	-0,90	$0,76 + j1,03$	21	0,00	$0,00 + j0,00$
$\Sigma S_1, \text{BA}$		$2,33 + j2,33$	$\Sigma S_2, \text{BA}$		$2,33 + j2,33$	$\Sigma S_3, \text{BA}$		$2,33 + j2,33$

Таблица 3

Количество витков и полная мощность катушек вторичной обмотки трехфазно-семифазного ТПФ с учетом ограничений (3) — (5)

$k = 3i - 2$			$k = 3i - 1$			$k = 3i$		
k	w_k	S_k, BA	k	w_k	S_k, BA	k	w_k	S_k, BA
1	0,84	$0,84 + j0,84$	2	-0,16	$-0,06 + j0,22$	3	-0,16	$0,22 - j0,06$
4	0,26	$-0,04 + j0,36$	5	0,08	$0,11 - j0,05$	6	-0,82	$0,93 + j0,69$
7	-0,03	$0,04 - j0,03$	8	0,75	$0,94 + j0,50$	9	-0,37	$0,02 + j0,53$
10	-0,64	$0,86 + j0,30$	11	0,51	$0,13 + j0,70$	12	0,01	$0,01 - j0,01$
13	-0,64	$0,30 + j0,86$	14	0,01	$-0,01 + j0,01$	15	0,51	$0,70 + j0,13$
16	-0,03	$-0,03 + j0,04$	17	-0,37	$0,53 + j0,02$	18	0,75	$0,50 + j0,94$
19	0,26	$0,36 - j0,04$	20	-0,82	$0,69 + j0,93$	21	0,08	$-0,05 + j0,11$
$\Sigma S_1, \text{BA}$		$2,33 + j2,33$	$\Sigma S_2, \text{BA}$		$2,33 + j2,33$	$\Sigma S_3, \text{BA}$		$2,33 + j2,33$

Для формирования одной фазы вторичной обмотки трехфазно-семифазного ТПФ, рассчитанной с учетом ограничений (3) – (5), количество витков будет больше на 15,9%, чем на одну фазу вторичной обмотки трехфазного двухобмоточного трансформатора.

Катушки каждой фазы вторичной обмотки должны быть соединены таким образом, чтобы сумма ЭДС катушек обеспечивала формирование многофазной симметричной системы ЭДС. На рисунке 2 приведена схема соединения катушек трехфазно-семифазного ТПФ

с рассчитанными значениями количества витков в относительных единицах.

С использованием серийного трехфазного трансформатора изготовлен опытный образец трехфазно-семифазного ТПФ (рис. 3). На каждом из трех стержней сердечника размещено 77 ± 2 витков вторичной обмотки, каждая фаза содержит 33 ± 1 витка. При намотке катушек рассчитанные значения витков округлены до целых значений, поэтому общее количество витков нескольких фаз отличается на один виток. При проек-

тировании ТПФ можно обеспечить одинаковое число витков фаз за счет оптимизации размеров стержней сердечника и отношения «вольт на виток» трансформатора.

Вторичная семифазная обмотка соединена звездой с нулевым выводом, выводы подключены к винтовому зажиму (см. рис. 3).

При проведении эксперимента первичную обмотку ТПФ подключали к трехфазной сети с фазным напряжением 220 В и частотой 50 Гц, ЭДС одного витка катушки — 0,23 вольт.

На холостом ходу измеренные значения ЭДС катушек вторичной обмотки составили: $E_k = \{5,5; 1,2; 1,2; 1,6; 0,5; 5,3; 0,2; 4,8; 2,5; 4,1; 3,5; 0,0; 4,1; 0,0; 3,5; 0,2; 2,5; 4,8; 1,6; 5,3; 0,5\}$ В.

С помощью цифрового осциллографа «Rigol» получены осциллограммы фазных напряжений семифазной вторичной обмотки. При измерении первый канал осциллографа был подключен к первой фазе, второй канал поочередно подключался к каждой из шести фаз. В результате обработки записанных данных получена симметричная семифазная система напряжений, продемонстрированная на рис. 4.

Действующее значение фазных ЭДС вторичной обмотки на холостом ходу — $6,6 \pm 0,1$ В. В качестве нагрузки взяты резисторы с сопротивлением 4,7 Ом. При подключении нагрузки действующее значение фазных напряжений — $6,35 \pm 0,1$ В.

Первичная обмотка ТПФ к трехфазной сети подключена через цифровой измеритель электрической

Таблица 4

Количество витков фаз вторичной обмотки трехфазно-семифазного ТПФ

Номер фазы (i)	С учетом ограничений		
	(3)	(3), (4)	(3) — (5)
1	1,000	1,053	1,159
2	1,075	1,075	1,159
3	1,126	1,126	1,159
4	1,151	1,151	1,159
5	1,151	1,151	1,159
6	1,126	1,126	1,159
7	1,075	1,075	1,159
Σ	7,704	7,758	8,116

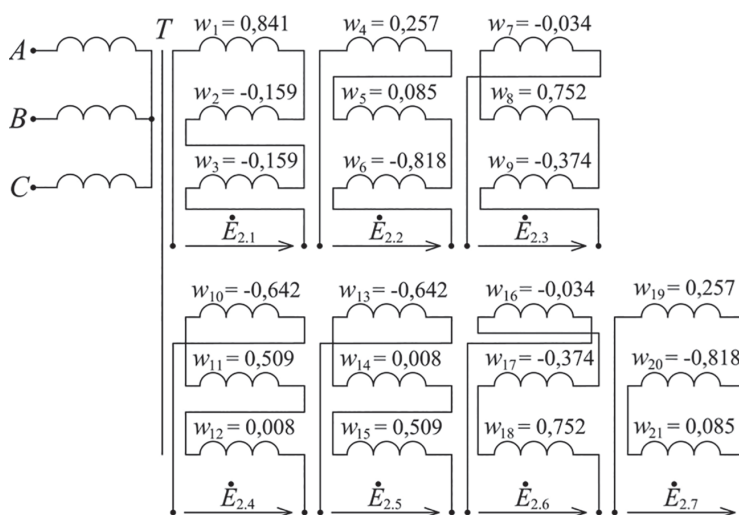


Рис. 2. Схема соединения катушек трехфазно-семифазного ТПФ

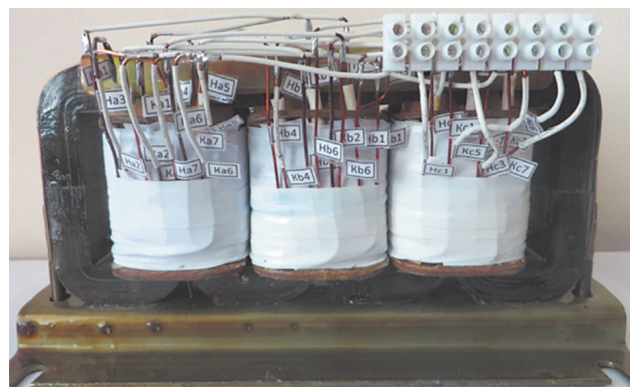


Рис. 3. Опытный образец трехфазно-семифазного ТПФ

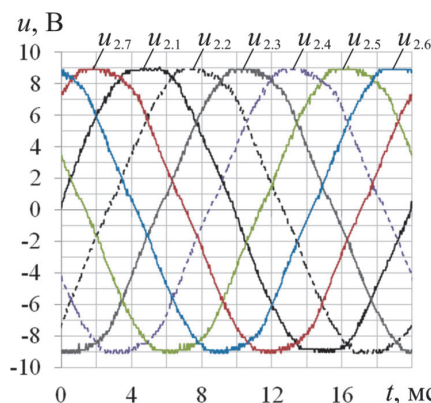


Рис. 4. Осциллограммы фазных напряжений семифазной обмотки ТПФ

мощности DM 2436AB. Полученные значения фазных напряжений, токов и мощности на холостом ходу и под нагрузкой приведены в табл. 5.

Как можно видеть из данных табл. 5, активная мощность семифазной нагрузки равномерно распределена по трем фазам первичной обмотки. При этом есть небольшие отличия фазных токов из-за незначительной несимметрии напряжений сети и магнитной цепи трансформатора.

Заключение

Усовершенствован подход к определению минимального числа витков и схемы соединения катушек вторичной обмотки трехфазно-многофазного ТПФ, вторичная многофазная обмотка которого состоит из трех катушек, расположенных на разных стержнях и включенных последовательно между собой. Рассмотренный подход позволяет определить оптимальную схему соединения и количество витков катушек вторичной обмотки ТПФ с числом фаз многофазной вторичной обмотки больше двух. При этом будет обеспечена многофазная симметричная система ЭДС, мощность симметричной многофазной нагрузки станет равномерно распределена по трем фазам первичной обмотки, количество витков каждой фазы вторичной обмотки одинаково, что позволит обеспечить симметричную систему напряжений при работе устройства под нагрузкой.

С помощью рассмотренного подхода выполнен расчет минимального количества витков и определена необходимая схема соединения катушек вторичной обмотки трехфазно-семифазного ТПФ.

Для экспериментальной проверки теоретических результатов изготовлен опытный образец трехфазно-

Литература

1. Копылов И.П. Электрические машины. М.: Юрайт, 2014.
2. Yusoff N., Karim K., Ghani S., Sutikno T., Jidin A. Multiphase Transformer Modeling Using Finite Element Method // Intern. J. Power Electronics and Drive System. 2015. V. 6. No. 1. Pp. 56—64.
3. Singh A., Marti J., Srivastava K. Circuit Reduction Techniques in Multiphase Modeling of Power Transformers // IEEE Trans. Power Delivery. 2010. V. 25. Iss. 3. Pp. 1573—1579.
4. Karekar S. Modeling and Simulation of Three Phases to Seven Phases Transformer Connection // Intern. J. Research in Appl. Sci. and Eng. Technol. 2016. V. 4. No. 3. Pp. 273—280.
5. Kamarposhti M., Hosseini A. Modified Approach for Harmonic Reduction in Three-phase to Seven-phase Using Transformer Winding Connections // Intern. J. Electrical and Computer Eng. 2019. V. 9. No. 4. Pp. 1496—1505.
6. Tabrez M., Sadhu P., Iqbal A. A Novel Three Phase to Seven Phase Conversion Technique Using Transformer

Таблица 5

Результаты измерений напряжения, тока и мощности первичной обмотки ТПФ

Величина (фазы A, B, C)	Режим работы	
	холостой ход	под нагрузкой
Фазное напряжение, В	222,3; 223,2; 224,1	221,8; 223,0; 223,5
Фазный ток, А	0,064; 0,065; 0,069	0,114; 0,114; 0,115
Активная мощность, Вт	2,1; 2,0; 2,1	21,5; 22,1; 21,9
Реактивная мощность, вар	14,1; 14,3; 15,1	13,5; 12,7; 13,3

семифазного ТПФ со схемой соединения и количеством витков вторичной обмотки, установленных в результате расчетов.

При экспериментальных исследованиях опытного образца получены временные диаграммы напряжений семифазной обмотки, измерены действующие значения токов, напряжений, мощность первичной обмотки на холостом ходу и с симметричной нагрузкой. Полученные данные позволили подтвердить, что ТПФ со схемой и количеством витков обмоток, определенных с использованием рассмотренного подхода, обеспечивает симметричную систему ЭДС и напряжений вторичной обмотки, равномерное распределение симметричной многофазной нагрузки по трем фазам первичной обмотки.

References

1. Kopylov I.P. Elektricheskie Mashiny. M.: Yurayt, 2014. (in Russian).
2. Yusoff N., Karim K., Ghani S., Sutikno T., Jidin A. Multiphase Transformer Modeling Using Finite Element Method. Intern. J. Power Electronics and Drive System. 2015;6;1:56—64.
3. Singh A., Marti J., Srivastava K. Circuit Reduction Techniques in Multiphase Modeling of Power Transformers. IEEE Trans. Power Delivery. 2010;25;3:1573—1579.
4. Karekar S. Modeling and Simulation of Three Phases to Seven Phases Transformer Connection. Intern. J. Research in Appl. Sci. and Eng. Technol. 2016;4;3: 273—280.
5. Kamarposhti M., Hosseini A. Modified Approach for Harmonic Reduction in Three-phase to Seven-phase Using Transformer Winding Connections. Intern. J. Electrical and Computer Eng. 2019;9;4:1496—1505.
6. Tabrez M., Sadhu P., Iqbal A. A Novel Three Phase to Seven Phase Conversion Technique Using Transformer

Winding Connections // Technol. and Appl. Sci. Research. 2017. V. 7. No. 5. Pp. 1953—1961.

7. **Jyothi B., Pandian A., Bhavana P.** Fabrication and Experimental Analysis of Multiple-winding Transformers for Multiphase Supply // Measurement and Control. 2020. V. 53. Iss. 3. Pp. 1—17.

8. **Рогинская Л.Э., Латыпов А.Р., Меднов А.А.** Выбор параметров многофункционального трансформатора // Вестник МЭИ. 2019. № 1. С. 61—68.

9. **Пат. № 2487455 РФ.** Девятифазный преобразователь числа фаз / Григорьев С.Н. и др. // Бюл. изобрет. 2013. № 19.

10. **Щуров Н.И., Мятёж С.В.** Синтез и анализ многофазных вентиляльных преобразователей. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2020.

11. **Рогинская Л.Э., Горбунов А.С., Ялалова З.И.** Улучшение электромагнитной совместимости преобразовательных устройств с сетью и нагрузкой с помощью многофазных трансформаторов // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2014. Т. 10. № 3. С. 21—29.

12. **Kant P., Singh B.** A New Three-phase to five-phase Transformer with Power Quality Improvement in Hybrid-multilevel Inverter Based VCIMD // IEEE Trans. Power Delivery. 2020. V. 35. No. 2. Pp. 871—880.

13. **Закарюкин В.П., Крюков А.В.** Моделирование многофазных линий электропередачи. Иркутск: Изд-во ИрГУПС, 2014.

14. **Гершенгорн А.И.** Многофазные линии электропередачи высокого и сверхвысокого напряжения // Электрические станции. 1994. № 8. С. 67—70.

15. **Kettner A., Paolone M.** On the Properties of the Compound Nodal Admittance Matrix of Polyphase Power Systems // IEEE Trans. Power Systems. 2019. V. 34. Iss. 1. Pp. 444—453.

16. **Levi E., Barrero F., Duran M.** Multiphase Machines and Drives – Revisited // IEEE Trans. Industrial Electronics. 2016. V. 63. Iss. 1. Pp. 429—432.

17. **Rockhill A., Lipo T.** A Generalized Transformation Methodology for Polyphase Electric Machines and Networks // Proc. IEEE Int. Electric Mach. and Drives Conf. 2015. Pp. 27—34.

18. **Nanoty A., Chudasama A.** Control of Designed Developed Six Phase Induction Motor // Intern. J. Electromagnetics and Appl. 2012. No. 2(5). Pp. 77—84.

19. **Логачева А.Г., Вафин Ш.И.** О потенциальной возможности асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором // Известия высших учебных заведений. Серия «Проблемы энергетики». 2010. № 3—4. С. 63—67.

20. **Терешкин В.М.** Теоретическое обоснование возможности снижения вибрации электромагнитного происхождения в пятифазной машине переменного тока по сравнению с трехфазной машиной // Вестник Московского авиационного института. 2018. Т. 25. № 4. С. 229—239.

Winding Connections. Technol. and Appl. Sci. Research. 2017;7;5:1953—1961.

7. **Jyothi B., Pandian A., Bhavana P.** Fabrication and Experimental Analysis of Multiple-winding Transformers for Multiphase Supply. Measurement and Control. 2020;53;3:1—17.

8. **Roginskaya L.E., Latypov A.R., Mednov A.A.** Vybor Parametrov Mnogofunktsional'nogo Transformatora. Vestnik MEI. 2019;1:61—68. (in Russian).

9. **Pat. № 2487455 RF.** Devyatifaznyy Preobrazovatel' Chisla Faz / Grigor'ev S.N. i dr. Byul. Izobret. 2013;19. (in Russian).

10. **Shchurov N.I., Myatezh S.V.** Sintez i Analiz Mnogofaznykh Ventil'nykh Preobrazovateley. Novosibirsk: Izd-vo NGTU, 2020. (in Russian).

11. **Roginskaya L.E., Gorbunov A.S., Yalalova Z.I.** Uluchshenie Elektromagnitnoy Sovmestimosti Preobrazovatel'nykh Ustroystv s Set'yu i Nagruzkoy s Pomoshch'yu Mnogofaznykh Transformatorov. Elektrotekhnicheskie i Informatsionnye Kompleksy i Sistemy. 2014;10;3:21—29. (in Russian).

12. **Kant P., Singh B.** A New Three-phase to five-phase Transformer with Power Quality Improvement in Hybrid-multilevel Inverter Based VCIMD. IEEE Trans. Power Delivery. 2020;35;2:871—880.

13. **Zakaryukin V.P., Kryukov A.V.** Modelirovanie Mnogofaznykh Liniy Elektropredachi. Irkutsk: Izd-vo IrGUPS, 2014. (in Russian).

14. **Gershengorn A.I.** Mnogofaznye Linii Elektropredachi Vysokogo i Sverkhvysokogo Napryazheniya. Elektricheskie Stantsii. 1994;8:67—70. (in Russian).

15. **Kettner A., Paolone M.** On the Properties of the Compound Nodal Admittance Matrix of Polyphase Power Systems. IEEE Trans. Power Systems. 2019;34;1:444—453.

16. **Levi E., Barrero F., Duran M.** Multiphase Machines and Drives – Revisited. IEEE Trans. Industrial Electronics. 2016;63;1:429—432.

17. **Rockhill A., Lipo T.** A Generalized Transformation Methodology for Polyphase Electric Machines and Networks. Proc. IEEE Int. Electric Mach. and Drives Conf. 2015:27—34.

18. **Nanoty A., Chudasama A.** Control of Designed Developed Six Phase Induction Motor. Intern. J. Electromagnetics and Appl. 2012;2(5):77—84.

19. **Logacheva A.G., Vafin Sh.I.** O Potentsial'noy Vozmozhnosti Asinkhronnogo Dvigatelya s Korotkozamknutym Rotorom. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Seriya «Problemy Energetiki». 2010;3—4:63—67. (in Russian).

20. **Tereshkin V.M.** Teoreticheskoe Obosnovanie Vozmozhnosti Snizheniya Vibratsii Elektromagnitnogo Proiskhozhdeniya v Pyatifaznoy Mashine Peremennogo Toka po Sravneniyu s Trekhfaznoy Mashinoy. Vestnik Moskovskogo Aviatsionnogo Instituta. 2018;25;4:229—239. (in Russian).

21. Терешкин В.М., Гришин Д.А., Баландин С.П., Терешкин В.В. Варианты формирования симметричного семифазного выходного напряжения вентильного преобразователя // Вестник Московского энергетического института. 2022. № 1. С. 85—93.

22. Parsa L. An Advantages of Multi-phase machines // Proc. 31st Annual Conf. IEEE Industrial Electronics Soc. 2005. Pp. 1574—1579.

23. 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.

24. Rao S. Engineering Optimization Theory and Practice. Hoboken: John Wiley & Sons, 2020.

25. Borne P., Popescu D., Filip F., Stefanoiu D. Optimization in Engineering Sciences. London: John Wiley & Sons, 2013.

21. Tereshkin V.M., Grishin D.A., Balandin S.P., Tereshkin V.V. Varianty Formirovaniya Simmetrichnogo Semifaznogo Vykhdnogo Napryazheniya Ventil'nogo Preobrazovatelya. Vestnik Moskovskogo Energeticheskogo Instituta. 2022;1:85—93. (in Russian).

22. Parsa L. An Advantages of Multi-phase machines. Proc. 31st Annual Conf. IEEE Industrial Electronics Soc. 2005:1574—1579.

23. Moskalev Yu.V. Opredelenie Minimal'nogo Chisla Vitkov Katushek Vtorichnoy Obmotki Transformatornogo Trekhfazno-mnogofaznogo Preobrazovatelya Chisla Faz. Omskiy Nauchnyy Vestnik. 2022;1(181):61—66. (in Russian).

24. Rao S. Engineering Optimization Theory and Practice. Hoboken: John Wiley & Sons, 2020.

25. Borne P., Popescu D., Filip F., Stefanoiu D. Optimization in Engineering Sciences. London: John Wiley & Sons, 2013.

Сведения об авторе:

Москалев Юрий Владимирович — кандидат технических наук, доцент кафедры электрических машин и общей электротехники Омского государственного университета путей сообщения, e-mail: yuriyvm@mail.ru

Information about author:

Moskalev Yuriy V, — Ph.D. (Techn.), Assistant Professor of Electrical Machines and General Electrical Engineering Dept., Omsk State Transport University, e-mail: yuriyvm@mail.ru

Статья поступила в редакцию: 01.06.2022

The article received to the editor: 01.06.2022

Статья принята к публикации: 24.10.2022

The article has been accepted for publication: 24.10.2022