

УДК 621.31.004.18

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ МНОГОФАЗНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ НАПРЯЖЕНИЯ С КОРОТКОЗАМКНУТОЙ ОБМОТКОЙ И ПАРАЛЛЕЛЬНЫМ СОЕДИНЕНИЕМ ПЕРВИЧНЫХ ОБМОТК БЕЗ УЧЕТА ИХ АКТИВНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ



IDENTIFICATION OF PARAMETERS OF A MULTI-PHASE VOLTAGE CONVERTER WITH A SHORT-CIRCUITED WINDING AND PARALLEL CONNECTION OF THE PRIMARY WINDINGS WITHOUT ACCOUNTING THEIR ACTIVE RESISTANCE

Коробейников Борис Андреевич

доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры электроснабжения
промышленных предприятий,
Кубанский государственный технологический университет

Печенкин Андрей Геннадьевич

старший преподаватель
кафедры электроснабжения промышленных предприятий,
Кубанский государственный технологический университет
andrph_66@mail.ru

Печёнкин Олег Андреевич

студент,
Кубанский государственный технологический университет
pchn257@mail.ru

Дауров Аслан Хизирович

студент,
Кубанский государственный технологический университет
daurov_001@icloud.com

Аннотация. В статье выполнена идентификация параметров обмоток многофазного преобразователя напряжения (МПН) с целью получения заданного сдвига магнитодвижущих сил (МДС) в сердечниках трансформаторов. Получено уравнение целевой функции для оптимизации параметров обмоток МПН по МДС. Проведен анализ погрешностей МДС по амплитуде и фазе в зависимости от заданного угла сдвига с учетом полученных коэффициентов оптимизации. Найдены параметры обмоток МПН без учета их активного сопротивления.

Ключевые слова: многофазный преобразователь напряжения, магнитодвижущая сила, короткозамкнутая обмотка, оптимизация, целевая функция.

Korobeinikov Boris Andreevich

Doctor of Technical Sciences, Professor,
Professor of Department
of Power Supply Industrial Enterprises,
Kuban State Technological University

Pechenkin Andrey Gennadievich

Senior Lecturer of the Department
of Power Supply Industrial Enterprises,
Kuban State Technological University
andrph_66@mail.ru

Pechonkin Oleg Andreevich

Student,
Kuban State Technological University
pchn257@mail.ru

Daurov Aslan Khizirovich

Student,
Kuban State Technological University
daurov_001@icloud.com

Annotation. The article identifies the parameters of the windings of a multiphase voltage converter (MPN) in order to obtain a given shift of magnetomotive forces (MDF) in the cores of transformers. Objective function equation for optimization of parameters of MPN windings according to MDS is obtained. The analysis of the errors of the MDS in terms of amplitude and phase is carried out depending on the specified shear angle, taking into account the obtained optimization coefficients. The parameters of the MPN windings are found without taking into account their active resistance.

Keywords: multiphase voltage converter, magnetomotive force, short-circuited winding, optimization, objective function.

Совершенствование электротехнических устройств релейной техники на основе многофазных преобразователей напряжения (МПН) с короткозамкнутой обмоткой является актуальной задачей. Методика, изложенная в работах [1, 2] позволяет определить параметры МПН в относительных единицах. За базовое значение индуктивности L_b принимаем величину индуктивности L_1 первичной обмотки W_1 трансформатора Tr_1 , соотношения между элементами схемы будут иметь вид:

$$\left. \begin{aligned} L_1 &= L_b; \\ p_1 &= \frac{R_K}{\omega L_b}; \quad p_2 = \frac{W_2}{W_1}; \quad p_3 = \frac{W_K}{W_1}; \\ L_2 &= p_2^2 L_b; \\ L_K &= p_3^2 L_b; \\ M_{2K} &= \sqrt{L_2 \cdot L_K} = p_2 p_3 L_b. \end{aligned} \right\} . \quad (1)$$

Относительная МДС \dot{F}_2^* для МПН с короткозамкнутым витком от параметров p_1 , p_2 и p_3 , с учетом (1) определится следующим образом

$$\dot{F}_2^* = \frac{1}{p_2} + j \frac{p_3^2}{p_1 p_2}. \quad (2)$$

Заданный угол сдвига φ_F определим из (2):

$$\varphi_F = -\arctg\left(\frac{p_3}{p_2}\right). \quad (3)$$

Решением задачи идентификации параметров МПН является определение величин p_1 , p_2 и p_3 , которые позволят найти величины индуктивностей L_2 и L_K и активное сопротивление R_K короткозамкнутой обмотки W_K с учётом требуемого угла сдвига фаз φ_F [3].

Условия получения МДС равных по величине и сдвинутых на относительно друг друга на угол фаз φ_F записываются в виде:

$$\left. \begin{aligned} |\dot{F}_1| &= |\dot{F}_{2\Sigma}|; \\ \frac{\dot{F}_{2\Sigma}}{\dot{F}_1} &= k_F \cdot e^{j\varphi_F}, \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где \dot{F}_1 и $\dot{F}_{2\Sigma}$ – магнитодвижущие силы, создаваемые обмотками W_1 и W_2 с учетом короткозамкнутой обмотки W_K соответственно.

Учитывая выражения (2), (3) и (4) можно записать систему уравнений с следующим виде:

$$\left. \begin{aligned} \left(\frac{1}{p_2}\right)^2 + \left(\frac{p_3^2}{p_1 p_2}\right)^2 - 1 &= 0; \\ \frac{1}{p_2} - \cos \varphi_F &= 0; \\ \frac{p_3^2}{p_1 p_2} - \sin \varphi_F &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Для решения нелинейной системы уравнений (5) использовали оптимизационную функцию «fmincon» [4], из библиотеки программного комплекса Matlab. Соответственно целевая функция для идентификации параметров МПН при заданном угле сдвига фаз φ_F МДС будет иметь вид:

$$Q = k_1 \left[\left(\frac{1}{p_2}\right)^2 + \left(\frac{p_3^2}{p_1 p_2}\right)^2 - 1 \right]^2 + k_2 \left[\frac{1}{p_2} - \cos \varphi_F \right]^2 + k_3 \left[\frac{p_3^2}{p_1 p_2} - \sin \varphi_F \right]^2$$

$$\rightarrow \min ; \quad n_i < p_i < m_i, \quad i = 1 \dots 3.$$

где k_1 , k_2 и k_3 – весовые коэффициенты целевой функции;
 n_i и m_i – границы поиска локального минимума целевой функции для параметров p_1 ; p_2 и p_3 .

При определении минимума целевой функции Q на параметры m_i и n_i устанавливаются ограничения по условиям физической реализуемости и в процессе решения задачи оптимизации уточняются в целях скорейшего нахождения глобального минимума [5]. В результате учета ограничений физической реализуемости МПН были выбраны нижняя и верхняя границы коэффициентов оптимизации $n_1 = 5,25e-07$, $n_2 = 1,60$, $n_3 = 6,16e-04$ и $m_1 = 1,05e-06$, $m_2 = 2,40$, $m_3 = 6,16e-04$.

Определение целевой функции оптимизации (6) применялось для расчета параметров экспериментального образца МПН с индуктивностью базовой обмотки $L_b = 72,8871$ Гн (тороидальный магнитопровод ОЛ 40/64-30 с сердечником из материа-

ла ГМ440В, магнитной проницаемостью $\mu = 11000$ и числом витков $W_b = 1624$). Активным сопротивлением базовой обмотки, как и других обмоток пренебрегаем ($R_b = 0$).

Принимая значение сдвига фаз $\varphi_F = 30^\circ$, $\varphi_F = 45^\circ$, $\varphi_F = 50^\circ$ и $\varphi_F = 60^\circ$, с целью построения многофазной системы выходных напряжений выполнена оптимизация параметров МПН для МДС при фиксированном числе витков базовой обмотки W_b . Полученные коэффициенты оптимизации p_1 , p_2 , p_3 , значение целевой функции Q , угол сдвига фаз между МДС трансформаторов φ_F и относительная погрешность определения амплитуды по абсолютной величине $\Delta F_{1,2}$ приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты оптимизации МПН

φ_F , град	p_1	p_2	p_3	Q	φ_F расч, град	$\Delta F_{1,2}$, %
36	5,1928e-06	1,2362	0,0019	1,8492e-08	36,0076	1,1813e-05
45	1,8983e-06	1,4201	0,0014	1,4084e-05	45,1983	6,5093e-04
50	2,6074e-06	1,5579	0,0018	1,2403e-06	50,0620	1,1848e-04
60	8,7564e-07	2,0000	0,0025	1,1901e-10	60,0002	-4,7239e-06

Исследования показали, что наибольшую чувствительность решение задачи оптимизации имеет к параметрам p_1 и p_3 . Проекция целевой функции Q на оси p_1 , p_2 и p_3 при $\varphi_F = 60^\circ$ изображены на рисунках 1 – 3.

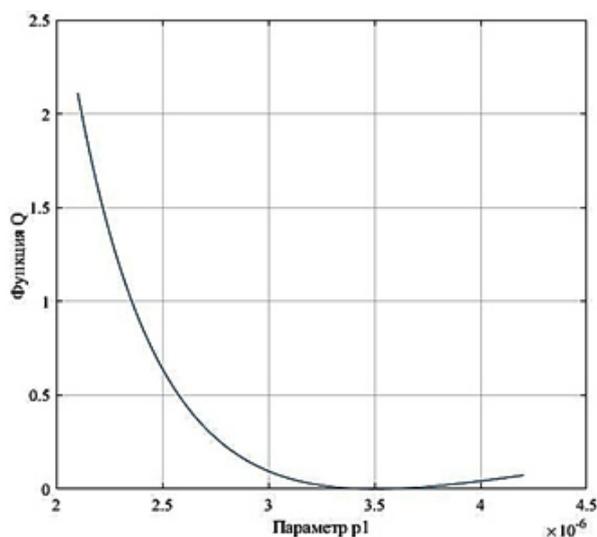


Рисунок 1 – График зависимости целевой функции Q от параметра p_1

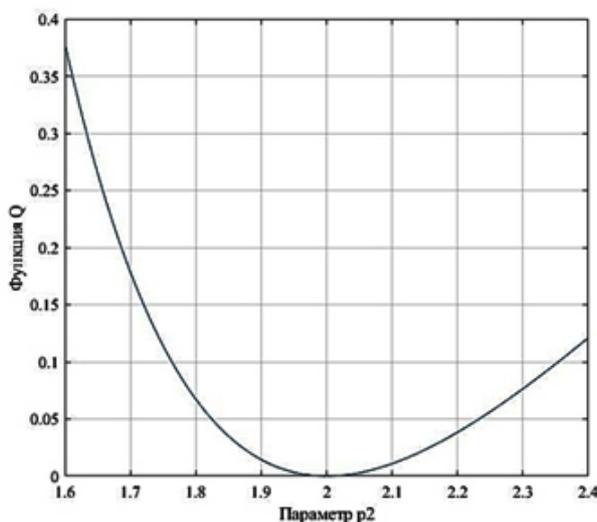


Рисунок 2 – График зависимости целевой функции Q от параметра p_2

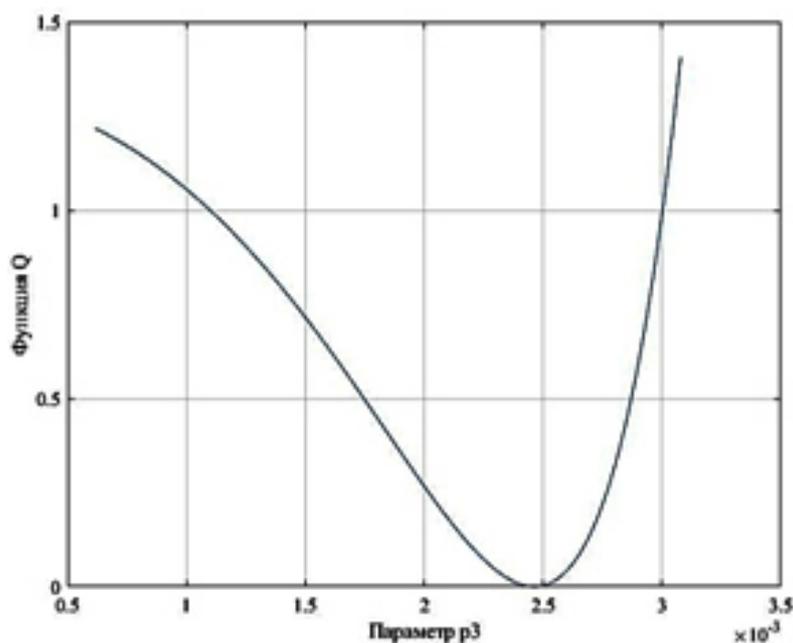


Рисунок 3 – График зависимости целевой функции Q от параметра p₃

Вывод

В результате проведенной оптимизации параметров МПН с короткозамкнутой обмоткой наиболее перспективным является формирование многофазной системы вторичных напряжений с углом сдвига фаз $\varphi_F = 60^\circ$, что подтверждают полученные результаты:

- искомые параметры оптимизации $p_1 = 8,7564e-07$; $p_2 = 2,00$; $p_3 = 0,0025$ при значении целевой функции $Q = 1,1901e-10$;

- угол сдвига фаз между МДС трансформаторов Tr_1 и Tr_2 составляет $\Delta\varphi = 60,0002$;

- относительная погрешность определения амплитуды МДС по абсолютной величине менее $4,7239e-06$.

При полученных параметрах p_1 , p_2 и p_3 рассчитаны оптимальные значения индуктивностей $L_2 = 291,5483$ Гн при числе витков $W_2 = 3248$ и $L_k = 4,4218e-04$ Гн и активное сопротивление $R_k = 0,0802$ Ом короткозамкнутой обмотки с числом витков $W_k = 4$ с учётом заданного угла сдвига фаз $\varphi_F = 60^\circ$.

Выявлено незначительное влияние дискретности витков первичных обмоток, и в связи с их малым воздействием на величину угла сдвига фаз МДС МПН.

Литература

1. Коробейников Б.А. Преобразователи с вращающимся магнитным полем в релейной защите электрических сетей: монография // ФГБОУ ВПО «КубГТУ». – Краснодар : Издательский Дом – Юг, 2013. – 272 с.
2. Совершенствование резервной дистанционной защиты линий электропередачи за счёт применения в её составе измерительных органов на основе однофазно-многофазных преобразователей электрических сигналов / Б.А. Коробейников [и др.] // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2018. – № 5. – С. 55–60.
3. Идентификация параметров многофазного преобразователя тока для релейной защиты электрических сетей / Б.А. Коробейников [и др.] // ФГБОУ ВО «КубГТУ». – Краснодар : Электронный сетевой политематический журнал «Научные труды Кубанского государственного технологического университета». – 2019. – № 4. – С. 272. – URL : <https://ntk.kubstu.ru/tocs/64>.
4. Алексеев Е.Р., Чеснокова О.В. Решение задач вычислительной математики в пакетах Mathcad 12, Matlab 7, Maple 9. – М. : НТ Пресс, 2006. – 496 с.
5. Гилл Ф., Мюррей У., Райт М. Практическая оптимизация: Пер. с англ. – М. : Мир, 1985. – 509 с.

References

1. Korobeinikov B.A. Converters with rotating magnetic field in relay protection of electric networks: monograph // FSBEU VO «KubGTU». – Krasnodar : Publishing House – South, 2013. – 272 p.
2. Improvement of reserve remote protection of power lines due to the use of measuring bodies in its composition on the basis of single-phase multi-phase electrical signal transducers / B.A. Korobeinikov [et al.] // Proceedings of Higher Educational Institutions. Electromechanics. – 2018. – № 5. – P. 55–60.
3. Identification of parameters of multiphase current converter for relay protection of electric networks / B.A. Korobeinikov [et al.] // FGBOU VO «KubGTU». – Krasnodar : Electronic network polythematical journal «Scientific Proceedings of the Kuban State Technological University». – 2019. – № 4. – P. 272. – URL : <https://ntk.kubstu.ru/tocs/64>.
4. Alexeev E.R., Chesnokova O.V. The solution of computational mathematics problems in Machcad 12, Matlab 7, Maple 9 packages. – M. : NT Press, 2006. – 496 p.
5. Gill F., Murray W., Wright M. Practical optimization: Translated from English. – M. : World, 1985. – 509 c.