

## ОСОБЕННОСТИ ГАРМОНИЧЕСКОГО АНАЛИЗА МНОГОФАЗНЫХ НЕСИММЕТРИЧНЫХ ОБМОТОК

*Розглянуті особливості несиметричних багатofазних обмоток. Запропонована методика гармонійного аналізу таких обмоток з використанням метода симетричних складових. Впроваджене поняття симетричних складових обмотувального коефіцієнта. Розроблений універсальний алгоритм гармонійного аналізу довільних багатofазних обмоток та наведені приклади його використання.*

*Рассмотрены особенности несимметричных многофазных обмоток. Предложена методика гармонического анализа таких обмоток с применением метода симметричных составляющих. Введено понятие симметричных составляющих обмоточного коэффициента. Разработан универсальный алгоритм гармонического анализа произвольных многофазных обмоток и приведены примеры его использования.*

В некоторых видах электрических машин специального назначения находят применение несимметричные многофазные обмотки. При этом проектируются они таким образом, чтобы минимизировать или вообще исключить несимметрию, хотя бы относительно рабочей гармоники. Решается указанная задача либо одним из способов симметрирования, например, изменением числового ряда обмоток с помощью циклических перестановок его повторяющейся части [1], специальными методами [2, 3], в том числе и с использованием неравновитковых катушек [4], или применением слабонесимметричных обмоток [5, 6], включающих в себя частично несимметричные модули. Как показала практика, система токов в таких симметрированных обмотках характеризуется настолько незначительной несимметрией, что этим можно пренебречь. Поэтому гармонический анализ, как ЭДС, так и МДС таких обмоток может выполняться с помощью полярных векторных диаграмм. Это справедливо и в отношении резко несимметричных обмоток, если принять допущение, что они питаются от источника тока.

Для расчета электрических машин с подобными обмотками результатов гармонического анализа, включающих только значения обмоточных коэффициентов  $k_{Wvj}$  каждой  $j$ -ой фазы по гармоникам произвольных  $v$ -ых порядков, оказывается недостаточно.

Акцентировать внимание на этом необходимо еще и потому, что в одной из последних публикаций [7] алгоритм подобного неполного анализа преподносится как образцовый и рекомендуется для повсеместного применения.

Задачей настоящей статьи является изучение особенностей гармонического анализа несимметричных многофазных обмоток применительно к двигателям переменного тока, а также определение необходимого и достаточного объема результирующей информации.

В электродвигателях с симметричными обмотками результирующее магнитное поле в рабочем воздушном зазоре может быть представлено как совокупность круговых вращающихся полей каждой из гармоник. И только одно из них, создаваемое рабочей гармоникой МДС  $F_p$ , участвует в полезном электро-механическом преобразовании энергии. Остальные круговые поля создают только потери и другие отрицательные эффекты.

При использовании несимметричных обмоток часть гармонических составляющих МДС, в числе которых может оказаться и рабочая гармоника, создают уже не одно, а два встречно вращающихся магнитных поля разной интенсивности, что существенно усложняет гармонический спектр результирующего поля.

В обоих случаях целью гармонического анализа является получение такого объема информации, которое обеспечивает в последующих электромагнитных расчетах конкретных электрических машин учет проявления полезных и вредных эффектов.

При использовании симметричных обмоток результаты гармонического анализа обычно включают в себя наборы обмоточных коэффициентов  $k_{Wv}$ , относительных величин МДС  $H_v$  и коэффициент дифференциального рассеяния  $\tau_d$  [8]. Обмоточный коэффициент  $k_{Wp}$  по рабочей гармонике позволяет при заданных величинах напряжения и магнитных нагрузок рассчитать обмоточные данные конкретного двигателя. Коэффициент  $\tau_d$  определяет соотношение полезной и вредных составляющих электромагнитной мощности в зазоре. Относительные амплитуды  $H_v$  гармоник МДС рассчитываются с использованием коэффициентов  $k_{Wv}$

$$H_v = \frac{p \cdot k_{Wv}}{v \cdot k_{Wp}}$$

что, в свою очередь, обеспечивает расчеты механической характеристики и добавочных потерь, а также виброакустических параметров двигателя.

В случае применения несимметричных обмоток совокупности коэффициенты  $k_{Wvj}$  каждой из  $m$  фаз в их традиционном понимании не позволяют определить даже соотношения амплитуд основного и обратно вращающегося полей, создаваемых этими МДС. Получить подобную информацию можно, только разложив МДС фаз на симметричные составляющие.

Для этого сначала необходимо определить модули  $F_{vj}$  и аргументы  $\varphi_{vj}$  соответствующих векторов на полярной векторной диаграмме, а затем рассчитать симметричные составляющие МДС прямой  $\dot{F}_{dv}$ , обратной  $\dot{F}_{rv}$  и нулевой  $\dot{F}_{0v}$  последовательностей.

Однако, как и при традиционном гармоническом анализе, где сначала также определяются результирующие векторы МДС, полученную информацию следует преобразовать к виду, удобному для после-

дующих расчетов. Это приводит к необходимости введения понятия симметричных составляющих обмоточных коэффициентов и, в первую очередь, составляющих прямой  $k_{Ddv}$ , обратной  $k_{Drv}$  и нулевой  $k_{D0v}$  последовательностей коэффициентов распределения.

Пусть  $m$ -фазная обмотка выполнена неравноитковой, т.е. произвольная  $k$ -я активная катушечная сторона (АКС) содержит относительное число  $w_k^*$  элементарных проводников

$$w_k^* = \frac{w_k}{w_{\max}},$$

где  $w_{\max}$  – максимальное число проводников в АКС;  $w_k$  – число проводников в  $k$ -ой АКС.

Тогда симметричные составляющие коэффициента распределения прямой  $k_{Ddv}$ , обратной  $k_{Drv}$  и нулевой  $k_{D0v}$  последовательностей обмотки, выполненной в числе пазов  $Z$  можно определить по выражению

$$k_{D(d,r,0)v} = \frac{m \cdot \dot{F}_{(d,r,0)v}}{\sum_{i=1}^Z |w_k^*|}.$$

Следует отметить, что метод симметричных составляющих вполне применим и для случая симметричных обмоток, т.к. при этом составляющие нулевой последовательности и одна из составляющих прямой или обратной последовательности автоматически примут нулевое значение. Поэтому рассмотренный подход позволяет разработать универсальный алгоритм гармонического анализа произвольных многофазных обмоток.

Рассмотрим один из возможных вариантов такого алгоритма.

Пусть реальная  $2p$ -полюсная обмотка уложена в числе пазов  $Z$  и состоит из  $T$  периодов (повторяющихся частей). Тогда для выполнения гармонического анализа достаточно задать исходные данные на одном из этих периодов.

Исходные данные  $2p$ -полюсной обмотки:

И1. Число фаз обмотки –  $m$ .

И2. Число повторений –  $T$ .

И3. Число пазов на периоде –  $Z_0 \forall Z$ .

И4. Число пар полюсов на периоде –  $p_0 = p/T$ .

И5. Шаг обмотки по пазам –  $y$ .

И6. Массивы номеров АКС каждой из  $m$  фаз на периоде повторения обмотки в числе пазов  $Z_0$  задаются в виде знакопеременного ряда, причем в  $2m$ -фазных обмотках знак "-" соответствует номерам сопряженных АКС фаз

$$\{a_{jk}\} = \pm a_{j1}, \pm a_{j2}, \pm a_{j3}, \dots, \pm a_{jN_j}.$$

где  $N_j$  – число АКС в  $j$ -ой фазе периода обмотки.

И7. Массивы относительных чисел витков в АКС каждой из фаз

$$\{w_{jk}^*\} = w_{j1}^*, w_{j2}^*, w_{j3}^*, \dots, w_{jN_j}^*.$$

Расчетный алгоритм.

Р1. Расчет угла  $\alpha_Z$  минимального сдвига в магнитном поле

$$\alpha_Z = \frac{2\pi}{Z_0}.$$

Р2. Массивы  $\{\alpha_{jkv}\}$  угловых координат элемен-

тарных векторов, отображающих МДС каждой АКС

$$\alpha_{jkv} = \begin{cases} \alpha_Z \cdot v, & \text{если } \alpha_{jk} > 0; \\ \alpha_Z \cdot v + \pi, & \text{если } \alpha_{jk} < 0 \end{cases}$$

Р3. Определение модуля и угловой координаты  $\phi_{vj}$  результирующего полярного вектора МДС  $\dot{F}_{vj}$   $j$ -ой фазы обмотки по гармонике  $v$ -го порядка:

– проекция результирующего вектора МДС  $\dot{F}_{vj}$  на координатную ось  $x$

$$\dot{F}_{vj}|_x = \sum_{k=1}^{N_j} w_{jk}^* \cdot \sin(\alpha_{jkv}),$$

– проекция результирующего вектора МДС  $\dot{F}_{vj}$  на координатную ось  $y$ , перпендикулярную оси  $x$ ,

$$\dot{F}_{vj}|_y = \sum_{k=1}^{N_j} w_{jk}^* \cdot \cos(\alpha_{jkv}),$$

– модуль  $F_{vj}$  результирующего вектора МДС  $\dot{F}_{vj}$

$$|F_{vj}| = F_{vj} = \sqrt{\left(\dot{F}_{vj}|_x\right)^2 + \left(\dot{F}_{vj}|_y\right)^2} =$$

$$= \sqrt{\left[\sum_{k=1}^{N_j} w_{jk}^* \cdot \sin(\alpha_{jkv})\right]^2 + \left[\sum_{k=1}^{N_j} w_{jk}^* \cdot \cos(\alpha_{jkv})\right]^2},$$

– аргумент (угловая координата)  $\phi_{vj}$  результирующего вектора МДС  $\dot{F}_{vj}$

$$\phi_{vj} = \arctg \frac{\sum_{k=1}^{N_j} w_{jk}^* \cdot \sin(\alpha_{jkv})}{\sum_{k=1}^{N_j} w_{jk}^* \cdot \cos(\alpha_{jkv})}.$$

Р41. Расчет симметричных составляющих коэффициента распределения трехфазных обмоток прямой  $k_{Ddv}$ , обратной  $k_{Drv}$  и нулевой  $k_{D0v}$  последовательностей по гармонике  $v$ -го порядка:

$$k_{Ddv} = \frac{|\dot{F}_{1v} + \dot{F}_{2v} \cdot e^{-i2\pi/3} + \dot{F}_{3v} \cdot e^{-i4\pi/3}|}{\sum_{k=1}^{Z_0} w_{jk}^*} =$$

$$= \frac{|\dot{F}_{1v} \cdot e^{-i\varphi_{1v}} + \dot{F}_{2v} \cdot e^{-i(\varphi_{2v} + 2\pi/3)} + \dot{F}_{3v} \cdot e^{-i(\varphi_{3v} + 4\pi/3)}|}{\sum_{k=1}^{Z_0} w_{jk}^*};$$

$$k_{Drv} = \frac{|\dot{F}_{1v} + \dot{F}_{2v} \cdot e^{-i4\pi/3} + \dot{F}_{3v} \cdot e^{-i2\pi/3}|}{\sum_{k=1}^{Z_0} w_{jk}^*} =$$

$$= \frac{|\dot{F}_{1v} \cdot e^{-i\varphi_{1v}} + \dot{F}_{2v} \cdot e^{-i(\varphi_{2v} + 4\pi/3)} + \dot{F}_{3v} \cdot e^{-i(\varphi_{3v} + 2\pi/3)}|}{\sum_{k=1}^{Z_0} w_{jk}^*};$$

$$k_{D0v} = \frac{|\dot{F}_{1v} + \dot{F}_{2v} + \dot{F}_{3v}|}{\sum_{k=1}^{Z_0} w_{jk}^*} = \frac{|\dot{F}_{1v} \cdot e^{-i\varphi_{1v}} + \dot{F}_{2v} \cdot e^{-i\varphi_{2v}} + \dot{F}_{3v} \cdot e^{-i\varphi_{3v}}|}{\sum_{k=1}^{Z_0} w_{jk}^*}.$$

P42. Расчет симметричных составляющих коэффициента распределения двухфазных обмоток прямой  $k_{Ddv}$ , обратной  $k_{Drv}$  последовательностей по гармонике  $v$ -го порядка:

$$k_{Ddv} = \frac{|\dot{F}_{1v} \cdot e^{-i\varphi_{1v}} + \dot{F}_{2v} \cdot e^{-i(\varphi_{2v} + \pi/2)}|}{\sum_{k=1}^{Z_0} w_{jk}^*};$$

$$k_{Drv} = \frac{|\dot{F}_{1v} \cdot e^{-i\varphi_{1v}} + \dot{F}_{2v} \cdot e^{-i(\varphi_{2v} - \pi/2)}|}{\sum_{k=1}^{Z_0} w_{jk}^*}.$$

P5. Расчет коэффициента укорочения  $k_{Yv}$  обмотки по гармонике  $v$ -го порядка

$$k_{Yv} = \sin\left(\frac{y \cdot \pi \cdot v}{Z}\right).$$

P6. Расчет симметричных составляющих обмоточного коэффициента  $k_{W(d,r,0)v}$  по гармонике  $v$ -го порядка

$$k_{W(d,r,0)v} = k_{D(d,r,0)v} \cdot k_{Yv}.$$

Здесь следует заметить, что наличие второго слоя изменит угловые координаты результирующих векторов фаз МДС, их относительные сдвиги по фазе сохранятся и поэтому не скажутся на результатах применения МСС.

P7. Расчет относительных амплитуд  $H_{(d,r,0)v}$  симметричных составляющих МДС по гармонике  $v$ -го порядка

$$H_{(d,r,0)v} = \frac{k_{W(d,r,0)v} \cdot P}{k_{Wp} \cdot v},$$

где  $k_{Wp}$  – обмоточный коэффициент по рабочей гармонике  $v=p$ , численно равный наибольшему из значений симметричных составляющих прямой  $k_{Wdp}$  и обратной  $k_{Wrp}$  последовательностей.

P8. Формирование порядков гармонических составляющих МДС обмотки.

В общем случае расчетные относительные порядки гармоник представляют собой натуральный ряд чисел в диапазоне от 1 до  $Z/2$

$$v=1, 2, 3, 4, 5, \dots, Z/2.$$

Если в пределах повторяющейся части обмотки половины обмотки взаимно инверсны по фазе, то в гармоническом спектре все четные гармонические составляющие МДС станут равными нулю. Это дает возможность задавать исходную информацию только на половине повторяющейся части обмотки, а порядки расчетных гармоник определять как ряд положительных нечетных чисел в таком же диапазоне

$$v=1, 3, 5, 7, 9, \dots, Z/2.$$

Если реальная обмотка состоит из  $T$  периодов, то абсолютные порядки гармонических составляющих МДС определяются по выражению

$$v_a = v \cdot T.$$

P9. При определении коэффициента дифференциального рассеяния в первую очередь следует принять во внимание тот факт, что системы МДС нулевой последовательности не создают вращающихся магнитных полей и поэтому не окажут влияния на работу двигателя.

Кроме того, следует использовать свойство периодичности модулей обмоточных коэффициентов

$$|k_{Wv}| = |k_{W(lZ \pm v)}|,$$

здесь и далее  $l$  – произвольное натуральное число.

Это позволяет для каждого значения порядка  $v$  считать частичные суммы  $S_{(d,r)v}$  согласно выражению

$$S_{(d,r)v} = \frac{k_{W(d,r)v}^2 \cdot P^2}{k_{Wp}^2} \cdot \sum_{l=1}^L \left[ \frac{1}{(lZ + v)^2} + \frac{1}{(lZ - v)^2} \right],$$

где  $L$  – произвольное натуральное число, соответствующее порядку высшей зубцовой гармоники. Для практических расчетов достаточно  $L=5$ .

Тогда результирующий коэффициент дифференциального рассеяния определяется следующим образом

$$\tau_d = S_{dv} + S_{rv} - 1.$$

Проиллюстрируем применение предложенного алгоритма для гармонического анализа симметрированной шестиполусной трехфазной обмотки, выполненной в 24 пазах с неодинаковыми числами витков в катушках. При выборе шага по пазам  $y \nabla 3$  распределение фазных зон показано на рис. 1.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	
A	A'	C'	B	A'	C	B'	A	C'	B	A'	C	B'	A	C'	B	A'	C	B'	A	C'	B	A'	C	B'
C'	C'	B	A'	A'	C	B'	A	C'	B	B	A'	C	C	B'	A	A	C'	B	A'	C	B'	B'	A	

Рис. 1. Распределение фазных зон трехфазной симметрированной обмотки ( $Z=24$ ,  $2p=6$ ,  $y \nabla 3$ )

Исходными данными для рассматриваемой обмотки являются:

И1. Число фаз обмотки –  $m=3$ .

И2. Число повторений –  $T=1$ .

И3. Число пазов на периоде –  $Z_0 \nabla Z=24$ .

И4. Число пар полюсов на периоде –  $p_0=3$ .

И5. Шаг обмотки по пазам –  $y=3$ .

И6. Как следует из рис.1, половины обмотки взаимно инверсны по фазе. Поэтому (см P9) в гармоническом спектре будут присутствовать только гармоники нечетных порядков, а массивы номеров АКС и чисел витков каждой из 3 фаз достаточно задать на половине пазов

$$\{a_{Ak}\} = 1, 2, -5, 9;$$

$$\{a_{Bk}\} = 4, -7, -8, 12;$$

$$\{a_{Ck}\} = -3, 6, -10, -11.$$

И7. Массивы относительных чисел витков в АКС каждой из трех фаз

$$\{w_{Ak}\} = 1; 0,643; 1; 1;$$

$\{w_{Bk}\} = 1; 0,643; 1; 1;$   
 $\{w_{Ck}\} = 0,945; 0,945; 0,945; 0,945.$

Результаты гармонического анализа представлены в табл. 1.

Таблица 1

Данные гармонического анализа трехфазной симметризованной обмотки ( $Z=24, 2p=6, y=3, \text{рис. 1}$ )

$\nu$	$k_{D0\nu}$	$k_{D\nu}$	$k_{Dd\nu}$	$k_{w\nu}$	$H_{r\nu}$	$k_{wd\nu}$	$H_{d\nu}$
1	0,175	0,011	0,148	0,005	0,017	0,057	0,195
<b>3</b>	<b>0,001</b>	<b>0,001</b>	<b>0,945</b>	<b>0,001</b>	<b>0,001</b>	<b>0,873</b>	<b>1,000</b>
5	0,037	0,085	0,114	0,080	0,055	0,107	0,073
7	0,285	0,099	0,125	0,037	0,018	0,047	0,023
9	0,587	0,011	0,184	0,005	0,002	0,070	0,027
11	0,228	0,028	0,151	0,024	0,008	0,139	0,043
$\tau_d = 0,102194$							

Уровень несимметрии указанной обмотки относительно рабочей гармоники практически сведен к нулю за счет использования катушек с разными числами витков, что вполне допустимо при ремонтных работах.

Второй пример иллюстрирует применение алгоритма для гармонического анализа двухфазной двухполюсной слабо несимметричной обмотки, в которой использованы частично несимметричные модули [5], выполненной в 24 пазах. Схема-развертка однослойного варианта обмотки приведена на рис. 2.

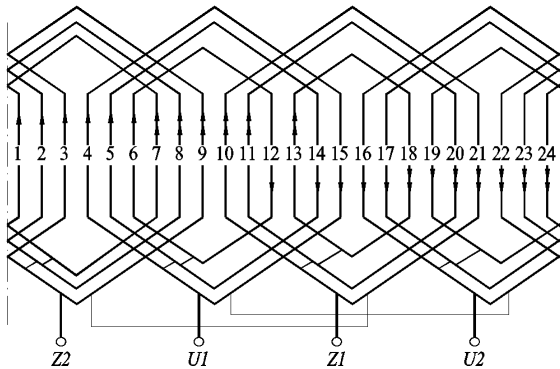


Рис. 2. Схема-развертка двухфазной однослойной несимметричной обмотки ( $Z=24, 2p=2$ )

Исходными данными для рассматриваемой обмотки являются:

- И1. Число фаз обмотки –  $m=2$ .
- И2. Число повторений –  $T=1$ .
- И3. Число пазов на периоде –  $Z_0 \forall Z=24$ .
- И4. Число пар полюсов на периоде –  $p_0=1$ .
- И5. Шаг обмотки по пазам –  $y=0(12)$ .
- И6. Массивы номеров АКС:  
 $\{a_{Ak}\} = 1, 2, 3, 4, 5, 6, -12, -14, -15, -16, -17, -19;$   
 $\{a_{Bk}\} = 7, 8, 9, 10, 11, 13, -18, -20, -21, -22, -23, -24.$
- И7. Массивы относительных чисел витков в АКС  
 $\{w_{Ak}\} = 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1,$   
 $\{w_{Bk}\} = 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1.$

Результаты гармонического анализа представлены в табл. 2.

Таблица 2

Данные гармонического анализа двухфазной однослойной несимметричной обмотки ( $Z=24, 2p=2, y=0, \text{рис. 2}$ )

$\nu$	$k_{w\nu}$	$k_{wd\nu}$	$H_{r\nu}$	$H_{d\nu}$
1	0,000	0,872	0,000	1,000
2	0,043	0,043	0,025	0,025
3	0,218	0,000	0,083	0,000
4	0,083	0,083	0,024	0,024
5	0,000	0,050	0,000	0,011
6	0,118	0,118	0,023	0,023
7	0,038	0,000	0,006	0,000
8	0,144	0,144	0,021	0,021
9	0,000	0,090	0,000	0,011
10	0,161	0,161	0,018	0,018
11	0,115	0,000	0,012	0,000
12	0,167	0,167	0,016	0,016
$\tau_d = 0,023705$				

Как свидетельствуют данные табл. 2 в данной двухфазной обмотке несимметрия проявляется только относительно той части спектра, который содержит гармоники четных порядков. Поэтому при выполнении рассмотренной обмотки двухслойной с диаметральной шаг  $y=12$  несимметрия полностью исчезает, т.к. все коэффициенты укорочения по четным гармоникам равны нулю.

Рассмотрим применение предлагаемого алгоритма для гармонического анализа симметричной трехфазной обмотки с целым числом пазов на полюс и фазу  $q=4$ .

Исходными данными для рассматриваемой обмотки являются:

- И1. Число фаз обмотки –  $m=3$ .
- И2. Число повторений –  $T=1$ .
- И3. Число пазов на периоде –  $Z_0 \forall 24$ .
- И4. Число пар полюсов на периоде –  $p_0=1$ .
- И5. Шаг обмотки по пазам –  $y=0$ .
- И6. Массивы номеров АКС:  
 $\{a_{Ak}\} = 1, 2, 3, 4;$   
 $\{a_{Bk}\} = 9, 10, 11, 12;$   
 $\{a_{Ck}\} = -7, -8, -9, -10.$

Результаты гармонического анализа представлены в табл. 3.

Таблица 3

Данные гармонического анализа трехфазной симметричной обмотки ( $Z=24, 2p=2, q=4$ )

$\nu$	$k_{w0\nu}$	$k_{w\nu}$	$k_{wd\nu}$	$H_{0\nu}$	$H_{r\nu}$	$H_{d\nu}$
1	0,000	0,000	0,958	0,000	0,000	1,000
3	0,653	0,000	0,000	0,227	0,000	0,000
5	0,000	0,205	0,000	0,000	0,043	0,000
7	0,000	0,000	0,158	0,000	0,000	0,024
9	0,271	0,000	0,000	0,031	0,000	0,000
11	0,000	0,126	0,000	0,000	0,012	0,000
$\tau_d = 0,0082629$						

Как следует из сопоставления данных табл.3 с известными данными (см., например, таблицу приложения 5 [9]), ненулевые значения составляющих коэффициентов  $k_{D(d,r,0)v}$  распределения полностью совпадают с соответствующими величинами коэффициентов  $k_{Dv}$ , рассчитанных традиционными методами. При этом составляющие нулевой последовательности  $k_{D0v}$  соответствуют коэффициентам  $k_{Dv}$  по гармоникам, порядки которых кратны трем, составляющие обратной последовательности  $k_{Drv}$  – коэффициентам  $k_{Dv}$  по обратно вращающимся гармоникам с порядками  $v=3l-1$ , составляющие прямой последовательности  $k_{Ddv}$  – коэффициентам  $k_{Dv}$  по прямо вращающимся гармоникам с порядками  $v=3l+1$ .

### ВЫВОДЫ

1. Введение понятий симметричных составляющих коэффициента распределения не противоречат общепринятым представлениям, поскольку каждая из симметричных составляющих коэффициентов распределения представляют собой отношение геометрической суммы векторов МДС к их арифметической сумме.

2. Корректность введения понятий симметричных составляющих коэффициента распределения и обмоточного коэффициента подтверждается тем, что в симметричных обмотках значения ненулевых симметричных составляющих коэффициентов распределения и обмоточных коэффициентов полностью совпадают с соответствующими величинами, рассчитанными традиционными методами.

3. Предложенный алгоритм может быть положен в основу универсальной программы гармонического анализа двух- и трехфазных обмоток с любым уровнем несимметрии и произвольным числом витков в катушках.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лившиц-Гарик М. Обмотки машин переменного тока. – М.: Госэнергоиздат, 1959. – 768 с.
2. Захаров М.К., Беликова Л.Я., Билоненко Н.И. Построение схем однослойных полюсопереключаемых обмоток с сопряжением фаз YYY/YYYY // Электромеханика. – 1988. – №7. – С. 46-50.
3. Беликова Л.Я., Захаров М.К., Шахин А.Т. Автоматизированное проектирование трехфазных симметричных многоскоростных ППО, сформированных векторно-табличным способом // Электромеханика. Теория і практика. Тез. докл. науково-техн. конф. Львів-Славськ, 25-28 вересня 1996. – С. 84-86.
4. Дегтев В.Г., Билоненко Н. И., Сверщевский В. П. Методика симметрирования совмещенных обмоток // Электромеханика. – 1987. – № 9. – С. 59-64.
5. Дегтев В.Г., Смирнов С.Б. Особенности несимметричных двухфазных обмоток // Электромашинобуд. та електрообладн. наук. техн. зб. – 2001. – № 56. – С. 66-70.

6. Дегтев В. Г., Лаврук И.С. Алгоритм синтеза слабо несимметричных трехфазных обмоток // Электромашинобудовання та електрообладнання. – К.: Техніка. – 2001. – № 57. – С. 62-66.
7. Лущик В. Д. Універсальна методика розрахунку обмоткових коефіцієнтів //Електротехніка і електромеханіка. – 2011. – № 1. – С. 28-30.
8. Геллер Б., Гамата В. Дополнительные поля, моменты и потери мощности. – М.: Энергия, 1964. – 263 с.
9. Жерве Г.К. Обмотки электрических машин. – Л.: Энергоатомиздат, 1989. – 400 с.

**Bibliography (transliterated):** 1. Livshic-Garik M. Obmotki mashin peremennogo toka. - M.: Gos`energoizdat, 1959. - 768 s. 2. Zaharov M.K., Belikova L.Ya., Bilonenko N.I. Postroenie shem odnoslojnykh polyusopereklyuchaemykh obmotok s sopryazheniem faz YYY/YYYY // `Elektromekhanika. - 1988. - №7. - S. 46-50. 3. Belikova L.Ya. Zaharov M.K., Shahin A.T. Avtomatizirovannoe proektirovanie trehfaznykh simmetrichnykh mnogokorostnykh PPO, sformirovannykh vektornotablichnym sposobom// Elektromekhanika. Teoriya i praktika. Tез. dokl. naukovo-tehn. konf. L`viv-Slavsk, 25-28 veresnya 1996. - S. 84-86. 4. Degtev V.G., Bilonenko N. I., Svershevskij V. P. Metodika simmetrirovaniya sovmeshchennykh obmotok // `Elektromekhanika. - 1987. - № 9. - S. 59-64. 5. Degtev V.G., Smirnov S.B. Osobennosti nesimmetrichnykh dvuhfaznykh obmotok // Elektromashinobud. ta elektroobladn. nauk. tehn. zb. - 2001. - № 56. - S. 66-70. 6. Degtev V. G., Lavruk I.S. Algoritm sinteza slabo nesimmetrichnykh trehfaznykh obmotok// Elektromashinobudovannya ta elektroobladnannya. - K.: Tehnika. - 2001. - № 57. - S. 62-66. 7. Luschiuk V. D. Universal'na metodika rozrahunku obmotkovykh koeficientiv //Elektrotehnika i elektromekhanika. - 2011. - № 1. - S. 28-30. 8. Geller B., Gamata V. Dopolnitel'nye polya, momenty i poteri moschnosti. – M.: `Energiya, 1964. – 263 s. 9. Zherve G.K. Obmotki `elektricheskikh mashin. - L.: `Energoatomizdat, 1989. - 400 s.

Поступила 20.03.2012

*Дьогтев Володимир Григорійович, д.т.н., проф.,  
Абдулкарим Хусейн Гени,  
Бучацька Маріна Петрівна*  
Одеський національний політехнічний університет  
кафедра електричних машин  
65044, Одеса, пр. Шевченка, 1  
тел. (063) 9779569  
e-mail: kem.deg@gmail.ru

*Degtev W.G., Abdulcarim Ch.G., Buchacka M.P.*  
**Peculiarities of multiphase asymmetric windings harmonic analysis.**

Peculiarities of asymmetric multiphase windings are considered. A technique of the windings harmonic analysis with a symmetrical components method application is suggested. A winding factor symmetric components concept is introduced. A universal algorithm of arbitrary multiphase windings harmonic analysis is worked out, examples of its application given.

**Key words – multiphase windings, distribution factor, winding factor, asymmetric windings, symmetric components method, universal algorithm.**