

## УНИВЕРСАЛЬНАЯ МЕТОДИКА И ЕЕ МЕСТО В ПРАКТИКЕ АНАЛИЗА МНОГОФАЗНЫХ ОБМОТОК

*Розглянуті матеріали однієї з останніх публікацій, присвяченої розробці універсальної методики розрахунку обмоткових коефіцієнтів багатofазних обмоток і критичному аналізу ряду публікацій. Доведено, що алгоритм, покладений в основу методики, є широко відомий спосіб визначення геометричної суми векторів, а форма його представлення у статті характеризується рядом суттєвих недоліків.*

*Рассмотрены материалы одной из последних публикаций, посвященной разработке универсальной методики расчета обмоточных коэффициентов произвольных многофазных обмоток и критическому анализу ряда публикаций. Показано, что алгоритм, положенный в основу данной методики, представляет собой широко известный способ определения геометрической суммы векторов, а форма его представления в статье характеризуется рядом существенных недостатков.*

В [1] опубликована статья, посвященная расчету обмоточных коэффициентов многофазных обмоток и критическому обзору некоторых публикаций.

Заголовок статьи не вполне раскрывает ее содержание, поскольку не ограничивается перечнем операций, выполненных в определенной последовательности, т. е. описанием способа или алгоритма расчета обмоточных коэффициентов. Помимо алгоритма, уже неоднократно изложенного в ранее опубликованных работах автора [2, 3], статья содержит несколько принципиальных предложений, предполагающих радикальное изменение методологии исследования свойств многофазных обмоток. Это подтверждается и примерами применения указанного алгоритма к оценке ряда обмоток и заключительным выводом о его актуальности и необходимости повсеместного применения. Сам факт неоднократных публикаций на эту тему и заявление: "Розроблена універсальна методика розрахунку обмоткових коефіцієнтів для  $m$ -фазних обмоток будь якої складності..." свидетельствуют о претензиях автора на ее оригинальность.

Заявка на столь высокий уровень изложенного материала требует пристального внимания и публичного обсуждения. Поэтому в настоящей статье предпринята попытка анализа предложенных в [1] нововведений, как по существу, так и форме их представления.

Обосновывая актуальность изложенного в статье материала, автор заявляет, что при анализе обмоток с несплошными фазными зонами расчет обмоточных коэффициентов очень сложный, а "інколи взагалі неможливий з достатнім ступенем точності як, наприклад, у випадку необхідності векторного складування пазових ЕРС". Смысл последней фразы трудно уяснить, т.к. расчет обмоточных коэффициентов изначально базируется на векторном суммировании пазовых ЭДС, а это никогда и ни у кого не вызывало как затруднений, так и сомнений абсолютной точности результата выполнения этой операции.

Далее автор выступает с радикальным предложением отказаться от использования общепринятых понятий коэффициентов распределения  $k_{pv}$ , укорочения  $k_{ckv}$  и соединения  $k_{zv}$  для любых обмоток, число пазов на полюс и фазу  $q$  которых не является целым. В таких случаях, независимо от конструкции обмотки, предлагается рассчитывать обмоточный коэффи-

циент  $k_{obv}$  по распределению всех активных катушечных сторон (АКС). Как это скажется на трудоемкости процесса расчета обмоточных коэффициентов, например, при решении задачи выбора шага по пазам для двухслойных равнокатушечных обмоток автора особенно не интересует.

Автор [1] полагает, что для всесторонней оценки электромагнитных свойств любых многофазных обмоток вполне достаточно рассчитать обмоточные коэффициенты  $k_{obv}$ . Об этом свидетельствуют две незамысловатых рекомендации. "Обмотковий коефіцієнт для основної (першої)  $k_{ck1}$  1 гармоніки ... намагаються одержати максимально можливим..." и "...намагаються спроектувати обмотку з як можна меншими значеннями обмоткових коефіцієнтами для вищих гармонік". Напомним, что порядки рабочих гармоник дробных обмоток отличаются от единицы и, кроме высших гармоник, такие обмотки продуцируют субгармоники, порядки которых меньше рабочей. Заметим также, что обобщающее утверждение "Обмоткові коефіцієнти для вищих гармонік визначають амплітуди магнітних полів вищих гармонік" никак не соответствует истине, например, применительно к явнополюсным синхронным генераторам.

Отличие алгоритма, приведенного в статье [1], от ранее опубликованных автором версий заключается в том, что здесь нахождение геометрической суммы ЭДС активных катушечных сторон выполнено с использованием отображения соответствующих полярных векторов на комплексной плоскости. Выполняется такое суммирование с применением комплексных чисел. Поскольку действительная и мнимая части комплекса суть проекции этого вектора на соответствующие оси, то чем же такой подход отличается от предыдущих версий? По существу ничем, т. к. во всех случаях проекции результирующего вектора ЭДС определяются как суммы проекций векторов пазовых ЭДС на взаимно перпендикулярные оси. Каким образом (в декартовой системе координат или на комплексной плоскости) отображаются полярные векторы уже не существенно.

Более того, указанный алгоритм достаточно давно известен и широко используется специалистами. Во второй половине прошлого столетия спроектированы и внедрены в промышленное производство де-

сятки модификаций электрических машин специального назначения с нетрадиционными обмотками. И если автор полагает, что до разработки им указанного алгоритма, расчет обмоточных коэффициентов таких обмоток подобным образом и никем не выполнялся, то он глубоко заблуждается. Просто излагать столь очевидные истины в научных статьях мало кому из специалистов приходило в голову. И все-таки на одну публикацию такого рода можно сослаться – алгоритм векторного суммирования пазовых ЭДС, причем с учетом неравенства чисел витков в катушках и в достаточной детальной изложении, приведен в статье [4].

Непосредственно перед описанием алгоритма автор статьи [1] сообщает, что *"використання універсальної методики для розрахунків суміщених обмоток..."* ранее уже обнародовано, поэтому основным отличием данной публикации следует считать форму нахождения геометрической суммы векторов и особенности применения данной операции для следующих типов обмоток: *"...дробових, несиметрично-дробових, з несучільними фазними зонами, з різним числом витків в катушках"*.

Алгоритм представлен в виде последовательности из семи формул и ряда комментариев.

Расчет предлагается производить для неопределенного числа гармоник, относительные порядки  $v$  гармоник, как это с некоторым трудом обнаруживается под символом  $\dot{E}_v$  в формуле (4), формируются в соответствие с выражением  $v = 1, 2, 3, \dots$ . В сочетании с заменой угла минимального сдвига в магнитном поле  $\alpha_z$  углом сдвига в масштабе рабочей гармоники  $\alpha_1$  в формуле (2) это является *уже серьезной методологической ошибкой*, которая полностью исключает возможность корректного использования данного алгоритма при гармоническом анализе любых видов дробных обмоток.

В обозначениях пределов знаков  $\Sigma$  формулы (4) полная неразбериха. Что, например, означает предел  $n=1, 2, \dots, n$  и соответствует ли последний символ  $n$  числу  $N$  активных сторон катушек в параллельной ветви фазы непонятно. Здесь же использованы нигде далее не расшифрованные обозначения:  $y_1, y_2, \dots, y_n$ , которые никакой полезной функции не выполняют, а только вносят дополнительную путаницу.

Претендуя на использования данного алгоритма для анализа несимметричных обмоток, автор по непонятной причине старательно избегает определения угловых координат результирующих векторов ЭДС фаз. Для этого уже в формуле (5) тригонометрическая форма отображения комплексных чисел заменяется алгебраической.

Очередная методологическая ошибка порождена комментариями особенностей применения алгоритма при анализе обмоток с параллельными ветвями в фазах. *"Якщо паралельні витки якимсь чином відрізняються"* автор полагает достаточным *"визначити ЕРС кожної паралельні витки для розглядуваних гармонік"* и затем рассчитать по (7) обмоточные коэффициенты. Конечно же, при отсутствии даже напоминания о возникающих в этом случае разностных ЭДС и способа определения их значений (в первую очередь по рабо-

чей гармонике) рассматривать такую ситуацию не имело смысла.

В случае применения предлагаемого алгоритма для анализа неравновитковых обмоток утверждается, что *"в формулу вектора ЕРС фази необхідно вводити як співмножник число витків катушок  $W_n$ "*. О необходимости корректировки формулы (7), в знаменателе которой сохраняется  $N$  (*" $N$  – число активних сторін катушок паралельної вітки фази"*), автор не информирует. Это гарантирует получение заведомо неверных значений обмоточных коэффициентов.

Особенности применения предложенного алгоритма к несимметричным обмоткам автор характеризует следующим образом. *"Якщо т-фазна обмотка несиметрична, то потрібно врахувати ЕРС основної гармоніки для всіх т фаз і упевнитись, що ЕРС трифазних обмоток зсунуті між собою на кут  $120^\circ$  ел., двофазних обмоток – на кут  $90^\circ$  ел."*

Что понимается под расчетом ЭДС для каждой из фаз, не поясняется. Согласно алгоритму по формуле (6) определяются только абсолютные величины результирующих ЭДС фаз. Поскольку расчет угловых координат указанных ЭДС алгоритмом не предусмотрен, то определить угловые сдвиги между ними пользователю будет затруднительно. Особенно для специалистов со средним техническим образованием.

Если же эта задача будет решена способом, выходящим за рамки рассматриваемого алгоритма, то в большинстве случаев убедиться в соответствии полученных результатов и рекомендованных цитируемым указанием значений не удастся, т. к. чаще всего амплитудная и угловая несимметрия проявляются совместно. Но автор, видимо, искренне полагает, что проявляться может только амплитудная несимметрия. Это подтверждается как описанием алгоритма, так и примерами его применения к несимметричным обмоткам, в каждом из которых указанное требование попросту игнорируется.

Заметим, что о необходимости определения угловых сдвигов ЭДС (МДС) несимметричных обмоток известно еще со времен цитируемой автором монографии [5], где приведены рекомендации по допустимому уровню ограничения несимметрии трехфазных обмоток, как по амплитудному ( $2 \div 3\%$ ), так и по угловому ( $2^\circ \div 3^\circ$ ) рассогласованию векторов МДС (ЭДС) в масштабе рабочей гармоники.

Ничем не аргументированным является указание ограничить расчеты ЭДС фаз только рабочей гармоникой, т. к. существуют обмотки, несимметрия которых проявляется только в определенной части гармонического спектра и исключена в другой его части, содержащей и рабочую гармонику [6, 7].

Иллюстрируются предлагаемые нововведения двумя примерами гармонического анализа несимметричных обмоток.

В первом из них выполнен анализ несимметричной обмотки, схема которой приведена на рис. 1.

Описанная в данном примере технология подготовки исходных данных отличается повышенной трудоемкостью по причине отказа от использования коэффициентов  $k_{CKV}$  и  $k_{3V}$ . С учетом высокого быстродей-

ствия современной вычислительной техники, особенно при использовании относительно простых алгоритмов, время рабочего цикла определяется не столько собственно счетом, сколько подготовкой и вводом исходных данных.

Собственно анализ ограничен расчетом обмоточных коэффициентов по рабочей гармонике, причем ни расчет ЭДС фаз, ни рекомендованная проверка угловых сдвигов между ними не выполнены. Последовательность действий в соответствии с алгоритмом не иллюстрирована. Неожиданно возникло загадочное выражение, позволившее, по мнению автора, определить числа активных сторон катушек в каждой из фаз

$$N = \sum n + \sum k \approx 16$$

только приблизительно, что не может вызывать ничего, кроме недоумения. Формальное применение указанной формулы при подстановке ранее приведенных значений  $n$  и  $k$  для каждой из фаз, приведет к совершенно другим результатам. Поскольку для фазы  $A$  имеем:  $n = 1, 2, 8, 9, 16, 17, 17, 24$ ;  $k = 6, 5, 5, 12, 13, 14, 21$ , то

$$N = \sum n + \sum k = 94 + 76 = 170.$$

Воспользоваться данной формулой для остальных фаз рекомендуется самому автору.

Особенности обмотки рассматриваемого примера наиболее убедительно раскрывают недостатки предложенного алгоритма в отношении формирования относительных порядков гармоник. Строго по предложенному алгоритму расчет обмоточных коэффициентов необходимо выполнять при следующих значениях относительных порядков гармоник:  $v = 1, 2, 3, \dots$ . Этому соответствует последовательность абсолютных порядков:  $v = 3, 6, 9, \dots$ . Возможно, именно это обстоятельство не позволило автору выполнить и привести в данном примере результаты расчета обмоточных коэффициентов по другим гармоникам. Как будет показано ниже, это не соответствует истине.

В принципе непонятно, какие достоинства "универсальной методики" автор хотел продемонстрировать данным примером. Что, кроме констатации факта несимметрии обмотки, можно утверждать на основе полученной информации?

В качестве альтернативы ниже приведен анализ указанной обмотки, предназначенной для использования в асинхронном короткозамкнутом двигателе и выполненной с шагом по пазам  $y = 3$ . Распределение АКС представлено 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	№ пазов	
A	C'	B	A'	C	B'	A	C'	B	A'	C	B'	A	C'	B	A'	C	B'	A	C'	B	A'	C	B'	A	Фазы АКС верхнего слоя
C'	B	A'	C	B'	A	C'	B	A'	C	B'	A	C'	B	A'	C	B'	A	C'	B	A'	C	B'	A	C'	Фазы АКС нижнего слоя
2	1	1	1	1	2	1	2	1	2	1	1	1	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	Числовой ряд	

Рис. 1. Распределения АКС дробной обмотки ( $q = 4/3$ )

Приведенная схема показывает, что расположенные диаметрально АКС взаимно инверсны, поэтому коэффициент соединения  $k_{3v}$  для четных гармоник равен нулю, что позволяет выполнить расчеты только по гармоникам нечетных абсолютных порядков, ограничив ввод данных распределением АКС на половине обмотки. Поскольку обмотка выполнена катушками с одинаковыми шагами ( $y = 3$ ), то при использовании известной формулы расчета коэффициента укороче-

ния  $k_{3kv}$  отпадает необходимость вводить данные распределения АКС нижнего слоя.

В результате необходимо и достаточно ввести такие исходные данные:

фаза  $A - n = 1, 2, 9; k = 5$ ;

фаза  $B - n = 4, 12; k = 7, 8$ ;

фаза  $C - n = 6; k = 3, 10, 11$ ,

т.е. их число по сравнению с кардинальными предложениями автора сокращается в 4 раза.

Принимается допущение (в данном случае достаточно грубое), что питается данная обмотка симметричной системой токов. Расчеты выполнены по алгоритму автора, скорректированному в соответствие с общепринятым подходом. Кроме выше указанных наиболее существенные коррективы заключаются в следующем.

Вместо формулы (2) определяется угол минимального сдвига в магнитном поле

$$\alpha_z = 2\pi/Z,$$

где  $Z$  – число пазов.

Формирование абсолютных порядков гармоник выполняется по выражению

$$v = 1, 3, 5, 7, \dots, (Z/2-1).$$

Модули обмоточных коэффициентов по любой из оставшихся гармоник определяются по правилу периодичности

$$|k_{обv}| = |k_{об(lZ \pm v)}|,$$

где  $l$  – натуральное число.

Угловые координаты  $\varphi_v$  результирующих векторов МДС фаз определяются по выражению

$$\varphi_v = \arctg(B/A).$$

Результаты представлены в табл. 1.

Таблица 1  
Результаты гармонического анализа несимметричной дробной обмотки

$v$	$k_{обAv}$	$\varphi_{Av}$	$k_{обBv}$	$\varphi_{Bv}$	$k_{обCv}$	$\varphi_{Cv}$
1	0,096	-37,5	0,096	217,5	0,116	-90
<b>3</b>	<b>0,872</b>	<b>33,3</b>	<b>0,872</b>	<b>146,7</b>	<b>0,854</b>	<b>-90</b>
5	0,231	172,5	0,231	7,5	0,060	90
7	0,096	-82,5	0,096	262,5	0,190	-90
9	0,230	84,6	0,230	95,4	0,146	90
11	0,231	-52,5	0,231	232,5	0,366	-90

Относительные величины  $\dot{F}_3^*$  результирующих векторов МДС фаз по рабочей гармонике ( $v = 3$ ) можно представить в показательной форме:

$$\dot{F}_{3A}^* = 0,872 \cdot e^{-j33,3^\circ}; \dot{F}_{3B}^* = 0,872 \cdot e^{-j146,7^\circ};$$

$$\dot{F}_{3C}^* = 0,854 \cdot e^{-j270^\circ}.$$

Это позволяет установить, что относительная амплитудная несимметрия  $\Delta A_3$  данной обмотки

$$\Delta A_3 = (0,872 - 0,854)/0,872 = 0,0206$$

находится в допустимых пределах  $2 \div 3\%$  [5].

Рассчитав угловые сдвиги  $\varphi$  между результирующими векторами МДС

$$\varphi_{BA} = 146,7^\circ - 33,3^\circ = 113,4^\circ,$$

$$\varphi_{CB} = 270^\circ - 146,7^\circ = 123,3^\circ,$$

$$\varphi_{CA} = 90^\circ + 33,3^\circ = 123,3^\circ,$$

убеждаемся, что равные по величине векторы  $\dot{F}_{3A}^*$  и  $\dot{F}_{3B}^*$  расположены симметрично относительно меньшего по величине вектора  $\dot{F}_{3C}^*$ , но максимальное отклонение сдвига векторов МДС фаз  $F_v^*$  от  $120^\circ$  превышает допустимые пределы ( $2^\circ \div 3^\circ$ ) [5] и составляет  $6,6^\circ$ .

Но что более важно, отображение результирующих векторов МДС фаз  $\dot{F}_v^*$  в показательной форме дает возможность применить метод симметричных составляющих и определить соотношение амплитуд МДС, создающих пульсирующее, прямо и обратно вращающихся магнитных полей по рабочей гармонике. Аналогично выполняется анализ и по остальным добавочным гармоникам нечетных порядков.

При этом следует обратить особое внимание на низшую гармонику с порядком  $v = 1$  и относительными амплитудами МДС фаз  $H_1$

$$H_{1A} = H_{1B} = \frac{k_{обv} p}{k_{обp} v} = \frac{0,096 \cdot 3}{0,872 \cdot 1} = 0,33,$$

$$H_{1C} = \frac{k_{обv} p}{k_{обp} v} = \frac{0,116 \cdot 3}{0,872 \cdot 1} = 0,407$$

и наиболее весомых высших гармоник с порядками  $v = 5, 7, 9, 11$ , а также гармоник первых зубцовых порядков  $v = 21, 23, 25, 27$ .

Далее автор переходит к критике ряда публикаций, целью которой, как это выясняется в выводах статьи, является доказательство необходимости "новсюдного застосування універсальної методики розрахунку обмоткових коефіцієнтів" и снятие проблемы "знаходження обмоткових коефіцієнтів, яка штучно створена і надумана за ради одержання сумнівних наукових дивідендів".

Особое возмущение автора [1] вызывает разработка аналитических выражений для расчета обмоточных коэффициентов (или коэффициентов распределения) для определенных модификаций многофазных обмоток с общей структурой распределения АКС. Для обоснования необходимости "снятия данной проблемы", по мнению автора препятствующей признания "универсальной методики", избирается любопытная тактика. Не предпринимается никаких попыток подвергнуть сомнению адекватность критикуемых выражений или сопоставить трудоемкость процессов расчета с использованием двух подходов. Вполне достаточным аргументом полагается оценка размера формулы и заявление о неумении пользоваться таковой.

Суть и стиль критики раскрывается в следующей цитате, касающейся первой статьи [8]. "...як можна здогадатись після декількокоразового прочитання, мова йде про обмотки з несущільними фазними зонами. Однак стаття присвячена тільки виводу формули для  $k_{pv}$ . Висновок надзвичайно складний і незрозумілий, не всі літерні позначення пояснені, одержана формула для  $k_{pv}$  ледь вміщується в два рядки тексту. Як формулою користуватись – незрозуміло, тоді як Жерве Г.К. [3, приклад 3.2] дає просте і зрозуміло пояснення знаходження  $k_{pv}$  для подібних обмоток."

Особенностью обмоток с "несущільними фазними зонами", т.е. отличающихся от обмоток с целыми чис-

лами пазов на полюс и фазу, является чрезвычайно разнообразный характер распределения АКС по пазам и фазам. В силу этого они образуют неструктурированное множество и поэтому действительно до недавнего времени требовали применения известного алгоритма, основанного на определении геометрической суммы векторов ЭДС (МДС), соответствующих в каждом случае конкретному распределению АКС. Использование обобщенной структурной модели [9] позволяет не только подразделить указанное множество на подмножества обмоток со идентичной структурой, но и получить формулы расчета коэффициентов распределения для любых обмоток данного подмножества.

В статье [8] исследованы особенности векторных диаграмм пазовых ЭДС (МДС), характерные для структурных моделей нестандартных обмоток. В результате выработаны рекомендации, позволяющие избежать неточностей при выводе формул расчета соответствующих коэффициентов распределения  $k_{обv}$ . Приведен и пример применения полученных рекомендаций для одного из подмножеств  $W_{5C}$  трехфазных обмоток, структура которого описывается матричной моделью  $M_{5C}$

$$M_{5C} = \begin{array}{c} \left. \begin{array}{l} 012345 \\ 501234 \\ \dots \\ 012345 \\ 501234 \\ 012345 \\ \dots \\ 012345 \end{array} \right\} k \\ \left. \begin{array}{l} 012345 \\ 501234 \\ 012345 \\ \dots \\ 012345 \end{array} \right\} Q-k \end{array}$$

Не решившись или не сумев применить для расчета "универсальную методику", автор призывает в союзники авторитетного специалиста в теории обмоток – Жерве Г.К. и противопоставляет раскритикованной формуле расчет коэффициентов  $k_{pv}$ , выполненный в монографии [10] для одной из обмоток типа  $W_{5C}$ , выполненную в 36 пазах, при следующих значениях структурных переменных:  $Q = 6, k = 2, n = 1$ . При этом выясняется, что способ, которым выполнен расчет в примере 3.2 [10], конечно же, основан на известном подходе определения геометрической суммы векторов посредством суммирования их проекций. Отличие заключается в использовании особенности векторных диаграмм данного типа обмоток, которая позволяет расположить векторы МДС фазы симметрично относительно одной из взаимно перпендикулярных осей. Это обеспечивает ограничение числа исходных данных и суммирование проекций векторов только на одну из этих осей. Это, конечно же, более рационально, чем при "универсальном" подходе автора.

Смысл такого противопоставления можно было бы понять, если бы было проведено сравнение приведенных результатов расчета коэффициентов распределения и расчетов с использованием критикуемого выражения с целью проверки корректности последнего. Несмотря на то, что подобный анализ автором критики не выполнен, такая возможность ему предоставляется с использованием вышеприведенных значений  $Q, k$  и  $n$ .

Для устранения непонимания автором [1] того, как следует использовать аналитические выражения при исследовании свойств любых соответствующих

ему объектов, ниже иллюстрируются возможности применения указанной формулы.

Действительно, данное выражение несколько сложнее, чем известная формула для расчета коэффициента  $k_{pv}$  обмоток с целым  $q$ . Но в обоих случаях при изменении числа пазов не нужно вводить информацию о распределении АКС одной из фаз, а достаточно изменить в первом случае одну ( $q$ ), а во втором – три ( $Q$ ,  $k$  и  $n$ ) структурных переменных. Более того, после преобразования путем подстановки  $k^* = k/Q$  указанная формула

$$k_{pv} = \frac{2 \sin \left[ \frac{\pi(1-k^*)v}{Q} \right] \cos \left( \frac{\pi v}{6Q} \right) + 2 \sin \left( \frac{\pi k^* v}{6} \right) \cos \left[ \frac{\pi(Qn+1)v}{6Q} \right]}{Q \sin \left( \frac{\pi v}{3Q} \right)}$$

позволяет исследовать свойства обмоток в пределах всего подмножества  $W_{5c}$ .

С учетом резкого уменьшения коэффициента  $k_{p1}$  по рабочей гармонике уже при  $n = 2$  указанная структурная переменная преобразуется в константу ( $n=1=const$ ). При этом условия строятся зависимости изменения коэффициентов  $k_{pv}$  от переменной  $k^*$ , приведенные в виде гистограммы на рис. 2.

Анализ указанных зависимостей позволяет установить основную особенность обмоток  $W_{5c}$ , заключающуюся в возможности минимизировать практически любую из гармоник, порядки которых не кратны 3. Диапазон допустимого изменения структурной переменной  $k^*$  определяется в зависимости от технического задания на проектирование. Например, в случае проектировании обмотки для асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором в диапазоне  $k^*=0,06 \div 0,26$  можно найти решение по подавлению прямо вращающихся гармоник с порядками  $v = 7$  и  $v = 13$ .

По непостижимой логике критика следующих публикаций [11, 12] свелась к попыткам дискредитации ряда обмоток, произвольно выбираемых из контекста, причем анализ их свойств, как правило, ограничивался сопоставлением обмоточных коэффициентов по рабочим гармоникам с серийными обмотками без учета сферы их применения и режимов работы. Каким образом это может способствовать популяризации "универсальной методики" – непонятно.

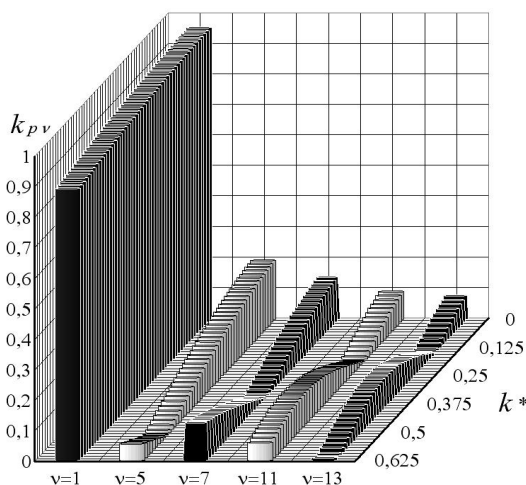


Рис. 2. Зависимости коэффициентов  $k_{pv}$  от структурной переменной  $k^*$

Отвечать на все критические заключения не позволяет ограниченный объем журнального издания, хотя это можно было сделать также детально, как в предыдущем случае.

Поэтому ниже проведен разбор второго примера применения предлагаемой "универсальной методики" и качества сравнительного анализа, представленного в [1]. Здесь в табл. 1 сопоставлены результаты расчета обмоточных коэффициентов двух двухфазных обмоток симметричной и несимметричной типа  $S_{Q02}$  [12].

Только принципиальным отрицанием аналитических методов и приверженностью политике "повсюдного застосування" универсальной методики можно объяснить необходимость применения этой затратной технологии при расчете обмоточных коэффициентов  $k_{obv}$  симметричной двухфазной обмотки с целым числом пазов на полюс и фазу вместо использования простого и широко известного выражения

$$k_{pv} = \sin \left( \frac{\pi v}{4} \right) / q \sin \left( \frac{\pi v}{4q} \right).$$

Для анализа несимметричной обмотки оказалось достаточно рассчитать величины обмоточных коэффициентов каждой из ее фаз. При этом рекомендованной в алгоритме проверки угловых сдвигов результирующих ЭДС фаз не выполнено. Конечно данных, приведенных в указанной таблице, недостаточно для оценки свойств несимметричной обмотки, но это не помешало автору вынести последней отрицательный вердикт только в результате сопоставления обмоточных коэффициентов по рабочей гармонике (0,782 против 0,901).

Остальные недостатки обмотки  $S_{Q02}$  отмечены комментариями, качество и смысл которых вызывают недоумение. Каким образом установлено, "що 2-а, 6-а і 10-а гармоніки в лінійній ЕРС збільшуються в 2 рази, в той час як решта гармонік збільшується в  $\sqrt{2}$  раз" можно только догадываться. Ведь из таблицы следует, что четные гармоники в противопоставляемой симметричной обмотке вообще отсутствуют, а все обмоточные коэффициенты нечетных гармоник в обмотке  $S_{Q02}$  меньше соответствующих коэффициентов симметричной обмотки. Кроме того, полностью подавлена гармоника третьего порядка ( $v = 3$ ), относительная амплитуда МДС которой в симметричной обмотке составляет  $H_3 = 0,113$ , и для достижения аналогичного эффекта ее следует выполнить двухслойной с шагом по пазам  $y = 8$ . В свою очередь, при выполнении обмотки  $S_{Q02}$  двухслойной с диаметральной шагом она становится симметричной, т. к. все четные гармоники оказываются полностью подавленными.

Нельзя не отметить приверженность автора критики к двойным стандартам, поскольку основным критерием оценки критикуемых обмоток в указанной статье независимо от числа фаз, сферы их применения и режима их эксплуатации является недопустимо низкий уровень обмоточных коэффициентов по рабочим гармоникам. Однако уже в следующей своей статье [13], опубликованной в том же номере журнала, величина обмоточного коэффициента трехфазной обмотки, равная 0,7392, его вполне устраивает.

## ВЫВОДЫ

1. Если автор считает целью статьи [1] популяризацию "универсальной методики", то форма ее представления привела к обратному эффекту. Результаты проведенного анализа свидетельствуют о том, что в указанном виде и в связи с перечисленными выше недостатками она не соответствует определению универсальной методики и не может быть рекомендована для выполнения гармонического анализа произвольных обмоток со сложными структурами, и, тем более, для анализа несимметричных обмоток.

Не может "универсальная методика" претендовать и на оригинальность, т.к. ее основу составляет давно и всем известный алгоритм определения геометрической суммы векторов.

2. Попытки противопоставления этого алгоритма аналитическим методам расчета обмоточных коэффициентов и наделяния его функциями волшебного средства, снимающего все проблемы исследования свойств нестандартных обмоток, следует признать некорректными и непродуктивными.

В свое время применение указанного алгоритма не помешало выводу формул расчета обмоточного коэффициента и его составляющих обмоток с целыми и дробными числами пазов на полюс и фазу. И в будущем это не будет служить препятствием для продолжения исследований свойств многофазных обмоток с целью совершенствования методов их синтеза и анализа.

3. Что касается содержания и стиля критики автором чужих публикаций, то следует пожелать ему впредь не поддаваться эмоциям и уделять больше внимания таким категориям как объективная, конкретная и четкая формулировка недостатков, конкретность в выборе противопоставляемых аналогов, и, по возможности, исключение собственных неточностей в критических высказываниях.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лушчик В.Д. Универсальная методика розрахунку обмоточних коефіцієнтів. // Електротехніка і електромеханіка. – 2011. – № 1. – С. 28-30.
2. Лушчик В.Д. Расчет обмоточных коэффициентов m-фазных обмоток // Изв. вузов "Электромеханика". – 1981. – № 3. – С. 267-275.
3. Лушчик В.Д. Асинхронні двигуни з фазними роторами з каскадними властивостями при пуску // Електротехніка і електромеханіка. – 2005. – № 2. – С. 39-41.
4. Veinott C.G. Special harmonic magneto motive forces in irregular windings and special connections of polyphase-windings. "IEEE", Trans. Power Apparatus and Systems. v. 83, 1964. – P. 1246-1255.
5. Лившиц-Гарик М. Обмотки машин переменного тока. – М.: Госэнергоиздат, 1959. – 768 с.
6. Дегтев В.Г., Бабич С.В., Акиншин П.А. Слабонесимметричные двухфазные обмотки // Электромашинобудовання та електрообладнання. – № 52. – 1999. – С. 72-76.
7. Дегтев В.Г., Лаврук И.С. Алгоритм синтеза слабо несимметричных трехфазных обмоток // Электромашинобудовання та електрообладнання. – 2001. – № 57. – С. 62-66.
8. Дегтев В.Г., Шульгин Д.Н., Дмитриева Т.Н. Анализ электромагнитных свойств нетрадиционных обмоток // Електротехніка і електромеханіка. – 2005. – № 3. – С. 21-23.

9. Дегтев В.Г. Обобщенная модель многофазных обмоток // Электричество. – 1990. – № 11. – С.40-45.
10. Жерве Г.К. Обмотки электрических машин переменного тока. – Л.: Энергоатомиздат, 1989. – 400 с.
11. Дегтев В.Г., Бабушанов А.В., Коваленко И.А. Синтез полных гомологических рядов трехфазных обмоток // Вісник Кременчуцького державного університету ім. М. Остроградського. Випуск 3/2010. Част. 1. – 2010. – С. 78-81.
12. Смирнов С.Б. Структурный синтез двофазних обмоток асинхронних електродвигунів // Автореферат на здобуття наук. ступ. канд. техн. наук. – 2008.
13. Лушчик В.Д., Іваненко В.С., Борзик В.Л. Синхронний каскадний двигун з суміщеними обмотками // Електротехніка і електромеханіка. – 2011. – № 1. – С. 31-32.

**Bibliography (transliterated):** 1. Luschnik V.D. Universal'na metodika rozrahunku obmotkovih koeficientiv. // Elektrotehnika i elektromehaniika. - 2011. - № 1. - S. 28-30. 2. Luschnik V.D. Raschet obmotocnyh ko'efficientov m-faznyh obmotok // Izv. vuzov "Elektromehaniika". - 1981. - № 3. - S. 267-275. 3. Luschnik V.D. Asinhronni dviguni z faznimi rotorami z kaskadnimi vlastivostyami pri pusku // Elektrotehnika i elektromehaniika. - 2005. - № 2. - S. 39-41. 4. Veinott C.G. Special harmonic magneto motive forces in irregular windings and special connections of polyphase-windings. "IEEE", Trans. Power Apparatus and Systems. v. 83, 1964. - R. 1246-1255. 5. Livshic-Garik M. Obmotki mashin peremennogo toka.- M.: Gos'energoizdat, 1959. - 768 s. 6. Degtev V.G., Babich S.V., Akinshin P.A. Slabonesimmetrichnye dvuhfaznye obmotki // Elektromashinobudovannya ta elektroobladnannya. - № 52. - 1999. - S. 72-76. 7. Degtev V.G., Lavruk I.S. Algoritim sinteza slabo nesimmetrichnyh trehfaznyh obmotok// Elektromashinobudovannya ta elektroobladnannya. - 2001. - № 57. - S. 62-66. 8. Degtev V.G., Shul'gin D.N., Dmitrieva T.N. Analiz `elektromagnitnyh svojstv netradicijnyh obmotok // Elektrotehnika i elektromehaniika. - 2005. - № 3. - S. 21-23. 9. Degtev V.G. Obobshchennaya model' mnogofaznyh obmotok // `Elektrichestvo. - 1990. - № 11. - S.40-45. 10. Zherve G.K. Obmotki `elektricheskikh mashin peremennogo toka. - L.: `Energoatomizdat, 1989. - 400 s. 11. Degtev V.G., Babushanov A.V., Kovalenko I.A. Sintez polnyh gomologicheskikh ryadov trehfaznyh obmotok // Visnik Kremenchuc'kogo derzhavnogo universitetu im. M. Ostrogradsk'ogo. Vipusk 3/2010. Chast. 1. - 2010. - S. 78-81. 12. Smirnov S.B. Strukturnij sintez dvofaznyh obmotok asinhronnih elektrodvignuniv // Avtoreferat na zdobuttja nauk. stup. kand. tehn. nauk. - 2008. 13. Luschnik V.D., Ivanenko V.S., Borzik V.L. Sinhronnij kaskadnij dvigun z sumischenimi obmotkami // Elektrotehnika i elektromehaniika. - 2011. - № 1. - S. 31-32.

Поступила 09.12.2011

*Дегтев Владимир Григорьевич, д.т.н., проф.*  
Одесский национальный политехнический университет  
кафедра электрических машин  
65058, Одесса, пр. Шевченко, 6/2, кв. 70  
тел. 0487762978, e-mail: kem.deg@gmail.com

*Degtev W.G.*

### **A universal method and its place in the practice of multiphase windings analysis.**

The paper analyzes one of the latest publications devoted to exploration of winding factors calculation for multiphase windings with a universal calculation method and critical analysis of a number of publications. It is shown that the algorithm on which the given method is based is one of the possible variants of a well known technique for calculating vectors geometric sum and the form of its presentation in the article considered is characterized by a number of serious disadvantages.

**Key words – multiphase windings, winding factor, harmonic analysis, algorithm of calculation, analysis.**