

## СИНТЕЗ ГОМОЛОГИЧЕСКИХ РЯДОВ МНОГОФАЗНЫХ ОБМОТОК И ИХ ГАРМОНИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

*Показано, що багатофазні обмотки можуть утворювати гомології трьох видів. Розроблено алгоритм формування гомологій двополюсних обмоток. Доведено, що змінення електромагнітних властивостей обмоток, що утворюють гомологічний ряд, однозначно відповідає закону перетворення структури обмоток даного ряду. На основі використання вказаної відповідності розроблена підсистема автоматизованого синтезу трифазних обмоток з подальшим гармонічним аналізом.*

*Показано, что многофазные обмотки могут образовывать гомологии трех видов. Разработан алгоритм формирования гомологий двухполюсных обмоток. Доказано, что изменение электромагнитных свойств обмоток, образующих гомологический ряд, однозначно соответствует закону преобразования структуры обмоток данного ряда. На основе использования указанного соответствия разработана подсистема автоматизированного синтеза трехфазных обмоток и выполнения гармонического анализа.*

### ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Понятие гомологии широко используется в различных науках: в биологии и ботанике, в физике и химии, в математике, в кристаллографии и т.д. Использование гомологии играет важнейшую роль в систематизации и классификации множеств изучаемых объектов, позволяя свести рассмотрение огромного их числа к рассмотрению гомологических рядов (ГР).

В 1920 году Н. И. Вавиловым был открыт закон гомологических рядов (ЗГР), согласно которому изменчивость близких по происхождению родов и видов растений осуществляется общим (параллельным) путем [1]. Генетически близкие роды и виды характеризуются сходными рядами наследственной изменчивости с такой правильностью, что, зная ряд форм в пределах одного вида, можно предвидеть нахождение параллельных форм у других родственных видов и родов. ЗГР позволяет на основании знания общих закономерностей изменчивости предсказать существование в природе не известных ранее форм с ценными для селекции признаками.

Аналогичный генетико-биологический подход широко используется проф. В.Ф. Шинкаренко [2] и его последователями для синтеза новых видов электромеханических преобразователей. Использование ЗГР характеризуется тем, что процессы синтеза и оценки его результатов основаны на качественных характеристиках, что не всегда оказывается достаточным применительно к техническим наукам.

В противоположность этому, в химии гомология представляется одной из разновидностей структурного синтеза объектов и особенно привлекательным является тот факт, что определенным образом упорядоченное изменение исходной структуры приводит к закономерному изменению свойств синтезированных объектов.

Так [3], физические свойства в ГР органических соединений изменяются таким образом, что в большинстве случаев удельные веса и объемы, температуры кипения и плавления, теплоты горения и образования, эквиваленты лучепреломления и т.д. изменяются постепенно от члена к члену, по мере увеличения разницы в составе, определяемой числом  $n$  групп  $\text{CH}_2$ , называемой *гомологической разницей*.

Но в некоторых случаях указанные закономерности нарушаются:

- с увеличением числа атомов углерода бензольных углеводородов, предельных одноосновных кислот и др. наблюдается уменьшение удельных весов;
- для удельного веса предельных одноатомных спиртов или для температуры плавления нормальных предельных одноосновных кислот эти свойства изменяются так, что для первых членов ряда величина его падает, а затем вновь возрастает.

Можно предположить, что причина подобных отклонений кроется в неадекватности структурных моделей этих сложных объектов, их сущности, а при устранении этого недостатка закономерности приобретут необходимую строгость.

В определенной мере это подтверждается на примере гомологий некоторых типов многофазных обмоток [4-6] вращающихся электрических машин, формируемых на основе обобщенной структурной модели [7]. Адекватность указанной модели физической сущности обмоток позволило получить строгие закономерности изменения электромагнитных свойств указанных обмоток в зависимости от алгоритма формирования соответствующих гомологических рядов.

Это позволяет предположить, что использование гомологического подхода при исследовании свойств многофазных обмоток может быть эффективно использовано для решения таких важных задач, как совершенствование методики синтеза и анализа их свойств.

### ФОРМУЛИРОВКА ЗАДАЧИ

Понятие гомологии, впервые введенное в биологии как сходство основных структур и органов, в дальнейшем и при его использовании в других науках менялось и приобретало свою специфическую трактовку. При этом оно не являлось застывшей догмой, а изменялось в соответствие с развитием науки.

Применительно к нашей тематике условимся называть *гомологическим рядом* множество  $m$ -фазных обмоток, изменение свойств которых однозначно соответствует закономерному изменению их структуры.

Задачами настоящей статьи является идентификация уже существующих гомологий многофазных

обмоток электрических машин класса ЦЛ 0,2у [2], а также разработка алгоритмов синтеза и анализа новых гомологических рядов этих объектов.

Для решения указанных задач будем опираться на сформулированное выше определение ГР с использованием обобщенной структурной модели (ОСМ) многофазных обмоток [7].

### МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Покажем сначала, что каждое из подмножеств множества  $M_{mkz}$   $m$ -фазных основных [4] обмоток с целыми числами  $q$  пазов на полюс и фазу образует гомологический ряд.

В традиционном изложении анализ изменения свойств обмоток  $M_{1mkz}$  сводится к исследованию характера приращения активных катушечных сторон (АКС) в одной из катушечных групп обмотки. При этом необходимость выполнения аналогичных изменений в остальных группах отходит на второй план.

Но именно это обстоятельство и является главным: преобразование структуры обмотки выполняется приращением не единичных АКС в отдельных катушечных группах, а комплектами определенным образом связанных между собой АКС.

Например, в трехфазных ( $m=3$ ) шестизонных ( $k_z=2$ ) основных обмотках  $M_{32}$  такой комплект образуют шесть АКС, смещенных в пространстве на  $\pi/3$  и питаемых токами с относительным фазовым сдвигом  $\pi/3$ . В ОСМ [7] ему соответствует *структурная единица* обмотки – один из ее модулей (блоков), а именно  $b_5=|012345|$ . В рамках множества  $M_{32}$  данный модуль исполняет роль *гомологической разницы*.

Процесс формирования ГР  $M_{32}$  наглядно представляется с использованием матричной модели (рис. 1).

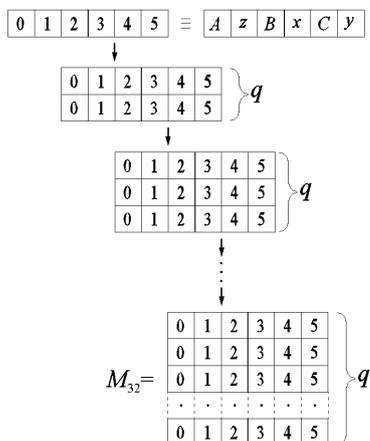


Рис. 1. Процесс формирования гомологического ряда  $M_{32}$

Если использовать символическое отображение модуля  $b_5$ , то процесс формирования ГР можно представить в следующем виде

$$M_{32} = b_5 \rightarrow b_5 \cup b_5 \rightarrow b_5 \cup b_5 \cup b_5 \rightarrow \dots,$$

где  $\cup$  – операция (сборки модулей [7], равносильная в данном случае последовательному присоединению гомологической разницы  $b_5$ ).

Аналогичным образом – применением одной и той же операции – сборки идентичных блоков могут быть сформированы ГР любых других разновидностей многофазных обмоток с целым  $q$ .

Например, ГР трехфазных трехзонных ( $k_z=1$ )  $M_{31}$  и двухфазных  $M_{22}$  ( $k_z=2$ ) обмоток образуются сборкой соответствующих модулей  $b_3=|002244|=|AABBCC|$  и  $b_1=|0123|=|ABxy|$ . Указанные процессы можно отобразить в символической форме:

$$M_{31} = b_3 \rightarrow b_3 \cup b_3 \rightarrow b_3 \cup b_3 \cup b_3 \rightarrow \dots,$$

$$M_{22} = b_1 \rightarrow b_1 \cup b_1 \rightarrow b_1 \cup b_1 \cup b_1 \rightarrow \dots,$$

или в виде матричных моделей:

$$M_{31} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 2 & 2 & 4 & 4 \\ 0 & 0 & 2 & 2 & 4 & 4 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 0 & 0 & 2 & 2 & 4 & 4 \\ 0 & 0 & 2 & 2 & 4 & 4 \end{bmatrix} q; \quad M_{22} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 2 & 3 \\ 0 & 1 & 2 & 3 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 0 & 1 & 2 & 3 \\ 0 & 1 & 2 & 3 \end{bmatrix} q.$$

Идентичный алгоритм преобразований в каждом из рассмотренных ГР вызывает сходный характер закономерностей изменения электромагнитных свойств обмоток. По мере возрастания числа  $q$  значения коэффициентов распределения  $k_{Dv}$  для гармоник произвольного порядка  $v$  монотонно уменьшаются.

Типичный пример такой зависимости для обмоток  $M_{132}$  приведен на номограмме (рис. 2).

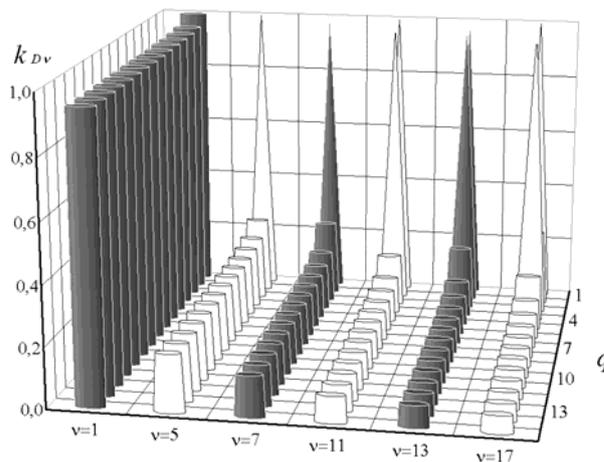


Рис. 2. Зависимость  $k_{Dv} = f(q)$  обмоток  $M_{32}$

Это позволяет получить *общее аналитическое выражение* расчета коэффициентов  $k_{Dv}$ , справедливое для любых обмоток с целыми числами пазов на полюс и фазу объединенного множества  $M_{mkz}$ ,

$$k_{Dv} = \frac{k_z \sin\left(\frac{\pi v}{mk_z}\right)}{2q \sin\left(\frac{\pi v}{mk_z q}\right)}.$$

Условимся множества *основных двухполюсных обмоток*, образующих гомологические ряды, называть далее *гомологиями первого рода*.

ГР первого рода могут быть получены при использовании более сложных закономерностей построения их структуры. Кроме сборки идентичных модулей возможно использование групп модулей различных типов и в сочетании с применением циклических перестановок. В зависимости от характера требований к проектируемым обмоткам синтез таких ГР следует выполнять с учетом уровня симметрии используемых модулей [8], т.к. это определяет электро-

магнитные свойства как самих модулей, так и образованных ими обмоток.

Если задание на проектирование предусматривает получение симметричных обмоток с высоким уровнем потягосцепления по рабочим гармоникам, то следует ограничиться использованием модулей высших групп симметрии. Применительно к двух- и трехфазным обмоткам этому требованию отвечают инвариантные пространственные блоки  $b_{02} = \text{---}$  и  $b_{03} = \text{---}$  с группами симметрии  $G_8$  и  $G_{12}$  соответственно, а также модули  $b_1$  и  $b_5$ , характеризующиеся группами цветной симметрии  $G_4^{(+1)}$  и  $G_6^{(+1)}$  соответственно.

В качестве примера рассмотрим синтез семейств ГР, образующихся присоединением гомологической разницы в виде основных модулей  $b_5$  и  $b_1$  к сборкам инвариантных пространственных блоков произвольного размера  $n$ . В символьном отображении процесс формирования каждого из ГР представляется в виде:

$$M_{10m2} = b_{0m} \rightarrow b_{0m} \cup b_{5(1)m} \cup b_{5(1)} \rightarrow \dots,$$

$$M_{20m2} = b_{0m1} \cup b_{0m2} \cup b_{5(1)} \rightarrow b_{0m} \cup b_{0m} \cup b_{5(1)} \cup b_{5(1)} \rightarrow \dots$$

$$\dots \dots \dots$$

$$M_{n0m2} = b_{0m1} b_{0m2} \dots \cup b_{0mn} \rightarrow b_{0m} \cup b_{0m} \cup \dots \cup b_{0mn} \cup b_{5(1)} \rightarrow \dots$$

$$\rightarrow b_{0m} \cup b_{0m} \cup \dots \cup b_{0mn} \cup b_{5(1)} \cup b_{5(1)} \rightarrow \dots,$$

Рассмотренные совокупности ГР применительно к трехфазным и двухфазным обмоткам адекватно отображаются соответствующими матричными моделями  $M_{032}$  и  $M_{022}$ .

$$M_{032} = \begin{pmatrix} \text{---} & \text{---} & \text{---} & \text{---} & \text{---} & \text{---} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \text{---} & \text{---} & \text{---} & \text{---} & \text{---} & \text{---} \\ 0 & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 \\ 0 & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 0 & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 \\ 0 & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 \end{pmatrix} q; M_{022} = \begin{pmatrix} \text{---} & \text{---} & \text{---} & \text{---} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \text{---} & \text{---} & \text{---} & \text{---} \\ 0 & 1 & 2 & 3 \\ 0 & 1 & 2 & 3 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 0 & 1 & 2 & 3 \\ 0 & 1 & 2 & 3 \end{pmatrix}$$

Нетрудно убедиться, что при использовании неидентичных модулей первоначально можно сформировать базовую группу с произвольным фиксированным числом модулей одного из типов. Тогда сборка произвольной матрицы, отображающей ГР, будет заключаться в присоединении блока другого типа, который играет роль гомологической разницы. Любое изменение числа модулей в базовой группе послужит формированию нового ГР. К тому же эффекту приведет замена типа блоков в базовой группе.

Таким образом, структурные модели фактически отображают не единственную ГР, а спектр таких гомологий. Но это не препятствует получению в рамках ОСМ обобщенного описания физических свойств соответствующих им обмоток формулой:

$$k_{Dv} = \frac{\sin \left[ \frac{\pi v (Q - n)}{2mQ} \right]}{(Q - n) \sin \left( \frac{\pi v}{2mQ} \right)} = \frac{\sin \left[ \frac{\pi v (1 - n^*)}{2m} \right]}{Q (1 - n^*) \sin \left( \frac{\pi v}{2mQ} \right)},$$

где  $n^* = n/Q$ .

В графической форме типичный характер изменения электромагнитных свойств обмоток  $M_{032}$  иллюстрирует гистограмма на рис. 3.

Еще одним примером формирования семейства гомологий первого рода может служить использование однотипных модулей, часть из которых преобразована циклическими перестановками  $c$ . Синтез каждого из таких ГР, образующих множество  $M_{32c}$ , может быть представлен в символической форме:

$$M_{132c} = b_5 c^1 \cup b_5 c^{-1} \rightarrow b_5 c^1 \cup b_5 \cup b_5 c^{-1} \rightarrow b_5 c^1 \cup b_5 \cup b_5 \cup b_5 c^{-1} \rightarrow \dots$$

$$\rightarrow b_5 c^1 \cup b_5 \cup b_5 \cup b_5 \cup b_5 c^{-1} \rightarrow \dots$$

$$M_{232c} = b_5 c^1 \cup b_5 c^1 \cup b_5 c^1 \cup b_5 c^{-1} \rightarrow b_5 c^1 \cup b_5 c^1 \cup b_5 \cup b_5 c^{-1} \cup b_5 c^{-1} \rightarrow \dots$$

$$\rightarrow b_5 c^1 \cup b_5 c^1 \cup b_5 \cup b_5 \cup b_5 c^{-1} \cup b_5 c^{-1} \rightarrow \dots$$

$$\dots \dots \dots$$

$$M_{n32c} = b_5 c^1 \cup \dots \cup b_5 c^1 \cup b_5 c^{-1} \cup \dots \cup b_5 c^{-1} \rightarrow \dots$$

$$\rightarrow b_5 c^1 \cup \dots \cup b_5 c^1 \cup b_5 \cup b_5 c^{-1} \cup \dots \cup b_5 c^{-1} \rightarrow \dots$$

$$\rightarrow b_5 c^1 \cup \dots \cup b_5 c^1 \cup b_5 \cup b_5 \cup b_5 c^{-1} \cup \dots \cup b_5 c^{-1} \rightarrow \dots,$$

а их полная совокупность – в виде матричной модели:

$$M_{32c} = \begin{pmatrix} \begin{matrix} \xrightarrow{C=1} \\ 5 & 0 & 1 & 2 & 3 & 4 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 5 & 0 & 1 & 2 & 3 & 4 \\ 0 & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 0 & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 \\ 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 0 \\ \xleftarrow{C=-1} \end{matrix} \end{pmatrix} \left. \begin{matrix} \dots \\ \dots \end{matrix} \right\} \begin{matrix} n \\ Q \\ Q-2n \\ n \end{matrix}$$

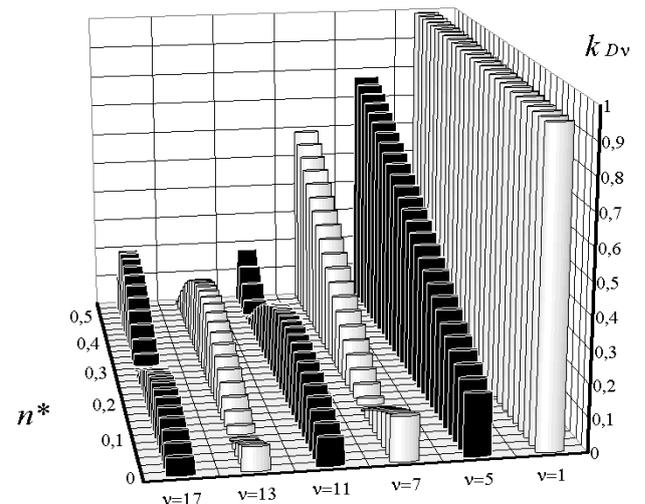


Рис. 3. Изменение коэффициентов  $k_{Dv}$  обмоток множества  $M_{032}$

Аналогично может быть построена структурная модель и для множества  $M_{22c}$  двухфазных обмоток.

Формула расчета коэффициентов распределения  $k_{Dv}$  для объединенного множества  $M_{m2c}$ , включающего в себя подмножества  $M_{22c}$  и  $M_{22c}$ , имеет вид:

$$k_{Dv} = \frac{\sin \left[ \frac{\pi v (1 - 2n^*)}{2m} \right] + 2 \sin \left[ \frac{\pi v n^*}{2m} \right] \cdot \cos \left[ \frac{\pi v (1 - n^* - 2c)}{2m} \right]}{Q \sin \left( \frac{\pi v}{2mQ} \right)}.$$

Таким образом, алгоритм формирования ГР первого рода предусматривает последовательное присоединение к исходной группе модулей гомологической разницы. Полные совокупности таких гомологий могут быть отображены в виде обобщенных матричных

моделей, с помощью которых можно аналитически определить физические свойства всех соответствующих им двухполюсных обмоток, выполняемых в отличающихся числах пазов.

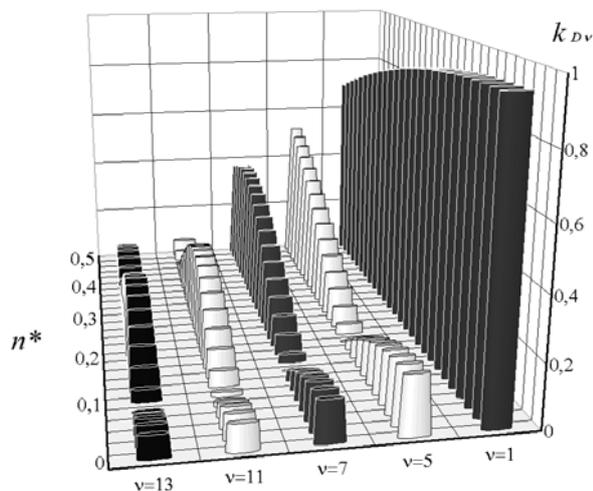


Рис. 4. Изменение коэффициентов  $k_{Dv}$  обмоток множества  $M_{32c} (c=\pm 1)$

Состав полного множества основных многофазных обмоток, конечно же, не ограничивается только двухполюсными вариантами.

Широко известны многополюсные обмотки [9], выполняемые  $p$ -кратным повторением основных двухполюсных обмоток-оснований. Множества таких обмоток также образуют гомологические ряды. Характерным свойством обмоток, составляющих эти ряды является равенство коэффициентов распределения  $k_{Dv0}$  обмотки-основания и  $k_{Dv\Gamma}$  производной обмотки при выполнении условия

$$k_{Dv\Gamma} = k_{Dv0}, \text{ если } v_{\Gamma} = pv_0.$$

Назовем множества многополюсных обмоток, образованных многократным повторением двухполюсных обмоток-оснований *гомологиями второго рода* или *гомологиями повторений*.

Кроме того, установлено [4], что дробные многополюсные классические обмотки, выполняемые в одном и том же числе пазов, образуют гомологические ряды, базирующиеся на двухполюсных обмотках-основаниях множества  $M_{1mkz}$ . Установлены также закономерности построения подобных гомологических рядов на основе преобразования структур производных основных двухполюсных обмоток [5, 6].

Как и в предыдущем случае, общим свойством обмоток этого типа является сохранение набора коэффициентов распределения  $k_{Dv}$  в обмотках всего ряда. Но здесь каждому из значений  $k_{Dv\Gamma}$  производных обмоток по гармонике  $v_{\Gamma}$  соответствует равное значение  $k_{Dv0}$  с порядками гармоник  $v_0$  обмотки-основания в зависимости от рабочего числа полюсов  $p$  уже при таких условиях:

$$k_{D0} = k_{D\Gamma},$$

если

$$v_0 \cdot p = 2k_z m Q n_3 + v_{\Gamma}, \quad v_0 = \frac{2k_z m Q n_3 + v_{\Gamma}}{p},$$

где  $n_3$  – наименьшее натуральное число, при котором для  $2m$ -зонных обмоток  $v_0$  – целое нечетное число, а в

случае  $m$ -зонных обмоток  $v_0$  – любое целое число.

Условимся ряды многополюсных обмоток, сформированные на базе преобразований структур двухполюсных обмоток в многополюсные называть *гомологиями третьего рода* или *дробными гомологиями*.

Синтез таких рядов выполняется преобразованием структур матриц неизменного размера. Перестройка структуры исходной матрицы двухполюсной обмотки-основания осуществляется путем изменения взаимного расположения модулей с возможными заменами каждого или части из них и изменениями числа циклических перестановок.

Алгоритм указанного преобразования детально разработан в [5, 6], но при его непосредственной практической реализации оказывается достаточно трудоемким.

Для устранения указанного недостатка в среде Delphi разработана подсистема, позволяющая в интерактивном режиме сначала выбрать из набора гомологий первого рода  $M_{32}$ ,  $M_{032}$ ,  $M_{32c}$  необходимую обобщенную модель, а затем выделить в автоматически синтезированном гомологическом ряду третьего рода нужные варианты многополюсных обмоток. На заключительном этапе подсистема обеспечивает выполнение интерактивного контроля уровня добавочных гармоник, для чего на рабочую панель выводятся соответствующие векторные диаграммы и величины обмоточных коэффициентов. Результаты детального гармонического анализа рассмотренных вариантов обмоток сохраняются в файлах.

Работу подсистемы поясним на примере синтеза трехфазной обмотки с числом полюсов  $2p=14$ , выполняемой в 48 пазах при условии, что коэффициент распределения по рабочей гармонике  $k_{D7} > 0,92$ .

Этапы одного из вариантов выполнения задания иллюстрируются соответствующими фрагментами панелей, приведенными на рис. 5.

В соответствующие окна верхней части рабочей панели (рис. 5,а) оператор вводит необходимое число пазов на фазную зону  $Q=Z/k_z m=48/6=8$  и число пар полюсов  $p=7$ . Заданное ограничение может быть обеспечено с использованием обмоток множества  $M_{32c}$ , поэтому следует нажать одноименную кнопку " $M_{32c}$ ".

В результате активизируются кнопки "с" и "n" для ввода соответствующих структурных параметров обобщенной модели  $M_{32c}$ . При необходимости просмотра модели  $M_{32c}$  нажимается кнопка "показать модель и формулу". В результате открывается окно, позволяющее выделить из спектра гомологий необходимый ГР с параметрами  $c=1$  и  $n=1$ , введя его в окошко с указанной маркировкой (рис. 5,б).

После нажатия кнопки "считать" в верхней части рабочей панели (рис. 5,б) открывается окно с цифровыми (ЦМ) и матричными моделями (ММ) двухполюсной обмотки-основания и искомой обмотки с  $p=7$  (рис. 5,в). В цифровых моделях цифры левого столбца соответствуют типу модуля, а цифры правого столбца – числу циклических перестановок. Одновременно ниже формируются два окна, обеспечивающие интерактивный контроль гармонического спектра как обмотки-основания (в левой части панели), так и исследуемой обмотки. Контроль выполняется путем просмотра векторных диаграмм и значений коэффициентов распре-

деления в масштабе любых гармоник (рис. 5,з) вводом номеров гармоник в соответствующих окнах.

а

б

Обмотка-основание					Синтезируемая обмотка				
j	c				j	c			
5	1	5	0	1	2	3	4		
5	0	0	1	2	3	4	5		
5	0	0	1	2	3	4	5		
5	0	0	1	2	3	4	5		
5	0	0	1	2	3	4	5		
5	0	0	1	2	3	4	5		
5	0	0	1	2	3	4	5		
5	5	1	2	3	4	5	0		

в



г

Гармоник: 24    Шаг обмотки: 3    Сохранить    Модель: 1а    2я    обе

Коэффициент дифференциального рассеяния  
Td=0,020133    Td=0,103926     учитывать 3-и гармоники

№	Kdir	Ky	Kw	Hv	Kdir	Ky	Kw	Hv		
1	0,9393	0,1951	0,1832	1	0,0307	0,1951	0,006	0,04557		
2	0	0,3827	0	0	0	0,3827	0	0		
3	0,5432	0,5556	0,3018	0,54896	0,3629	0,5556	0,2016	0,51073		
4	0	0,7071	0	0	0	0,7071	0	0		
5	0,1141	0,8315	0,0949	0,10353	0,1048	0,8315	0,0872	0,13247		
6	0	0,9239	0	0	0	0,9239	0	0		
7	0,0307	0,9808	0,0301	0,0235	0,9393	0,9808	0,9212	1		
8	0	1	0	0	0	1	0	0		
9	0,0528	0,9808	0,0518	0,0314	0,2654	0,9808	0,2603	0,21977		
10	0	0,9239	0	0	0	0,9239	0	0		
11	0,07	0,8315	0,0582	0,02889	0,1707	0,8315	0,142	0,09806		
12	0	0,7071	0	0	0	0,7071	0	0		
13	0,1048	0,5556	0,0582	0,02445	0,1141	0,5556	0,0634	0,03705		
14	0	0,3827	0	0	0	0,3827	0	0		
15	0,2654	0,1951	0,0518	0,01884	0,0528	0,1951	0,0103	0,00522		
16	0	0	0	0	0	0	0	0		
17	0,1545	0,1951	0,0301	0,00968	0,1868	0,1951	0,0364	0,01629		

д

Рис. 5. Окна подсистемы синтеза и анализа трехфазных обмоток

После нажатия кнопки "гармонический анализ" открывается панель (рис. 5,д), позволяющая просмотреть результаты гармонического анализа, как обмотки основания, так и многополюсной обмотки. Эти результаты включают в себя значения обмоточных коэффициентов  $k_{wv}$ , коэффициентов распределения  $k_{Dv}$  и укорочения  $k_{Yv}$ , а также относительных амплитуд гармоник  $H_v$  в диапазоне порядков  $v$ , который задается в левом верхнем окне панели. Кроме того, при необходимости вводится значение шага исследуемой обмотки по пазам и в диапазоне  $1 < v < 6Z$  рассчитывается коэффициент дифференциального рассеяния  $\tau_d$

$$\tau_d = \sum_{v=1}^{5Z} H_v^2 - 1 = \sum_{v=1}^{Z/2} A_v - 1,$$

где

$$A_v = \frac{p^2 \cdot k_{wv}^2}{k_{wp}^2} \left[ \frac{1}{v^2} + \frac{1}{(Z+v)^2} + \frac{1}{(Z-v)^2} + \dots \right]$$

После нажатия кнопки "Сохранить" результаты расчетов сохраняются в отдельном файле.

При использовании модели  $M_{32}$  допускается возможность произвольной замены любого из модулей матрицы обмотки-основания и изменения числа циклических перестановок. Для этого в цифровой модели обмотки основания достаточно выделить нужную ячейку курсором и ввести необходимые значения типа модуля  $j$  или числа  $c$  циклических перестановок в соответствующих окнах ЦМ. Соответствующие изменения в ММ обмотки-основания и построения ЦМ и ММ исследуемой обмотки с заданным числом полюсов  $2p$  выполняются автоматически. Выполнение детального гармонического анализа, просмотр и запись полученных результатов выполняется так же, как и в предыдущих случаях.

Подсистема выполнена открытой и предполагает возможность ее дополнения новыми моделями обобщенных спектров гомологических рядов первого рода.

## ВЫВОДЫ

1. Предложенное определение понятия гомологии в сочетании с представлением многофазных обмоток в виде обобщенной структурной модели позволило показать, что бесконечное разнообразие структур таких обмоток не хаотично, но закономерно упорядочено тремя типами гомологических связей.

2. Использование гомологического представления обмоток позволяет существенно сократить объем исследований их свойств, ограничив его изучением свойств их двухполюсных модификаций, охватываемых гомологиями первого рода.

3. Однозначное соответствие алгоритмов преобразования структур обмоток, составляющих ГР, с характером изменения физических свойств этих обмоток, отображаемое аналитически, позволяет резко упростить процессы направленного синтеза обмоток и выполнения их гармонического анализа.

4. Разработанная подсистема автоматизированного синтеза и анализа трехфазных обмоток может быть эффективно использована при выполнении про-

ектирования электрических машин и при подготовке специалистов-электромехаников.

5. Кроме того, предложенный подход может послужить основой для выполнения научно обоснованной систематизации многофазных обмоток.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вавилов Н.И. Закон гомологических рядов в наследственной изменчивости. – Л.: Наука, 1987. – 256 с.
2. Шинкаренко В.Ф. Основы теории эволюции электромеханических систем. – К.: Наукова думка, 2002. – 288 с.
3. Робертс Дж., Касерио М. Основы органической химии. – Том 1. – М.: Мир, 1978. – 842 с.
4. Дегтев В.Г. Гармонический анализ дробных обмоток // Электротехніка і електромеханіка. – 2013. – № 2. – С. 29-33.
5. Дегтев В.Г., Смирнов С.Б., Бабушанов А.В. Гомологические ряды симметричных двухфазных обмоток // Электромашинобудування та електрообладнання. – 2006. – № 67. – С. 98-104.
6. Дегтев В.Г., Бабушанов А.В., Лаврук И.С., Самойлов Г.А. Синтез гомологических рядов трехфазных обмоток // Электротехніка і електромеханіка. – 2007. – № 1. – С. 17-21.
7. Дегтев В.Г. Обобщенная структурная модель многофазных обмоток // Электричество. – 1990. – № 11. – С. 40-45.
8. Дегтев В. Г. Симметрия и свойства многофазных обмоток // Электротехніка і електромеханіка. – 2002. – № 1. – С. 23-27.
9. Вольдек А.И., Попов В.В. Электрические машины. Машины переменного тока. Учебник для вузов. – СПб: Питер, 2008. – 350 с.

*Поступила (received) 23.10.2013*

**Bibliography (transliterated)** 1. Vavilov N.I. *The law of homologous series in hereditary variation*. Leningrad, Nauka Publ., 1987. 256 p. 2. Shynkarenko V.F. *The basics of evolution theory of electromechanical system*. Kyiv, Naukova dumka Publ., 2002. 288 p.

3. Roberys J.D., Caserio M.C. *Basic principles organic chemistry. Vol 1*. Moscow, Mir Publ., 1978. 842 p. 4. Degtev V.G. Fractional windings harmonic analysis. *Electrical engineering & electromechanics*, 2013, no.2, pp. 29-33. 5. Degtev V.G., Smirnov S.B., Babushanov A.B. Homology series of symmetrical two-phase windings. *Electromachinobuduvannya ta elektroobladnannya*, 2006, no.67, pp. 98-104. 6. Degtev V.G., Babushanov A.B., Lavruk I.S., Samojlov G.A. Synthesis of homology series of three-phase windings. *Electrical engineering & electromechanics*, 2007, no.1, pp. 17-21. 7. Degtev V.G. The generalized structural model of multiphase windings. *Electrichestvo*, 1990, no.11, pp. 40-45. 8. Degtev V.G. Multiphase windings symmetry and properties. *Electrical engineering & electromechanics*, 2002, no.1, pp. 23-27. 9. Voldek A.I., Popov V.V. *Electric machines. Alternating current machines. High school book*. St.Petersburg, Piter Publ., 2008. 350 p.

*Дьогтев Володимир Григорович<sup>1</sup>, д.т.н., проф.,  
Лаврук Ігор Семенович<sup>1</sup>,*

<sup>1</sup> Одеський національний політехнічний університет,  
65044, Одеса, пр. Шевченка, 1,  
тел/phone +38 063 9779569, +38 067 7875279,  
e-mail: kem.deg@gmail.ru, groot@mail.ru

*V.G. Degtev<sup>1</sup>, I.S. Lavruk<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Odessa National Polytechnic University  
1, Shevchenko Avenue, Odessa, 65044, Ukraine

#### **Multiphase winding homologous series synthesis and harmonic analysis.**

Multiphase windings are shown to form three types of homology. A bipolar winding homology formation algorithm is developed. Change in electromagnetic properties of the windings forming a homologous series proves to uniquely comply with the law of the winding series structure transformation. Through application of the compliance specified, an automated three-phase winding synthesis and harmonic analysis subsystem is designed.

**Key words** – homologous series, multiphase windings, generalized structural model, subsystem of automated synthesis, harmonic analysis.