

* * *

Система симметричных трехфазных обмоток электрических машин

ДЕГТЕВ В.Г., ЛАВРУК И.С.

Показано, что многофазные обмотки могут образовывать гомологические ряды. Разработан алгоритм формирования гомологий двухполюсных и многополюсных обмоток. Показано, что изменение электромагнитных свойств обмоток, образующих гомологический ряд, однозначно соответствует закону преобразования структуры обмоток данного ряда. На основе использования указанного соответствия разработана система автоматизированного синтеза трехфазных обмоток и анализа коэффициентов распределения синтезированных обмоток. С дидактической точки зрения системный подход позволяет наиболее эффективно реализовать принцип «от простого к сложному», что поможет повысить уровень усвоения одного из самых трудно воспринимаемых разделов курса «Электрические машины» при подготовке электромехаников в высшей школе.

Ключевые слова: электрические машины, симметричная, трехфазная обмотки, структурная модель, гомология, коэффициент распределения

Эффективность исследования свойств любых объектов в значительной мере зависит от характера наших представлений о структуре множеств, образуемых такими объектами. Это особенно важно в тех случаях, когда последние образуют бесконечно большие множества. Если такие множества представляются в виде несистематизированных собраний объектов, то это серьезно усложняет процессы создания эффективных методов их синтеза и анализа.

Поэтому проблему систематизации бесконечных множеств, в том числе множеств многофазных обмоток вращающихся электрических машин, следует считать актуальной.

Первую попытку систематизации известных на тот период трехфазных обмоток предпринял Р. Рихтер. В своем фундаментальном труде по теории обмоток [1] он не только предложил научно обоснованный алгоритм синтеза подмножеств обмоток с целыми W_{31} и дробными W_{3d} числами q пазов на полюс и фазу, но и попытался создать единый аппарат гармонического анализа объединенного множества $W_{3p} = W_{31t} W_{3d}$.

Следует отметить два важных обстоятельства, которые были использованы автором при решении поставленной задачи. Во-первых, в основу систе-

матизации было положено подразделение на подмножества основных двухполюсных W_{31} и производных многополюсных W_{3d} обмоток. Во-вторых, был определен алгоритм перехода от W_{31} к W_{3d} с применением шага R обмотки по пазам, обеспечивающий равные значения коэффициентов распределения k_{Dp} по рабочим гармоникам $n = p$.

Целью настоящей статьи является представление бесконечного множества симметричных равновитковых трехфазных обмоток в виде иерархической системы WS_3 объектов данного рода, взаимосвязи между компонентами которой должны обеспечить не только синтез любых разновидностей указанных обмоток, но и эффективный гармонический анализ их свойств.

В качестве средств достижения указанной цели выберем методику синтеза абстрактных систем, предложенную в [2], теорию обобщенной структурной модели (ОСМ) многофазных обмоток [3, 4] с использованием гомологического подхода [5] при их структурных преобразованиях.

Согласно [2] «система S – это i -е множество композиций M_i , построенное по отношениям r_j множества отношений R_j , законам композиций z_j множества законов композиций Z_i из первичных

элементов t множества $M_i^{(0)}$, выделенного по основанию $A_i^{(0)}$ из универсального множества U .

Алгоритм синтеза абстрактной системы по [2] имеет вид:

отбор из универсального множества U по единому основанию $A_i^{(0)}$ некоторой совокупности первичных элементов $M_i^{(0)}$;

наложение на «первичные» элементы определенных отношений единства $R_i^{(1)}$ и образование по закону $Z_i^{(1)}$ множества объектов-систем $M_i^{(1)}$;

формирование композиций множества $M_i^{(1)}$ при таких отношениях $R_i^{(1)}$ и законах композиции $Z_i^{(j)}$, чтобы эти композиции состояли из части или всех «первичных» элементов одного и того же множества $M_i^{(0)}$;

вывод всех возможных для данных A_i, R_i, Z_i объектов-систем множества M_i или системы объектов данного i -го рода $S_i = \{M_i\} = \{M_i^{(0)}, M_i^{(1)}, \dots, M_i^{(S)}\}$.

Согласно приведенному алгоритму выделим из универсального множества U многофазных обмоток совокупность $M_i^{(0)}$ первичных элементов. В качестве таковых выберем две симметричные элементарные трехфазные обмотки b_1 и b_9 (рис. 1). Единным основанием $A_i^{(0)}$ при этом является набор следующих признаков:

каждая из обмоток представляет собой композицию трех активных катушечных сторон (АКС), размещенных вдоль равноотстоящих друг от друга образующих цилиндра;

фазы (обозначены на рис. 1 цифровыми и буквенными индексами) и пространственное положение АКС в каждой из композиций взаимно инверсны.

Отношением единства $R_i^{(0)}$ обмоток b_1 и b_9 является соблюдение симметрии. Формально отношение $R_i^{(0)}$ характеризуется математической группой

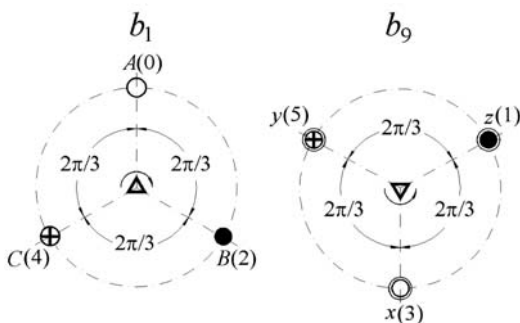


Рис. 1. Первичные элементы системы

пой $G_3^{(+2)}$ третьего порядка [6, 7]. Физическим следствием проявления отношения $R_i^{(0)}$ является способность создания этими обмотками только круговых вращающихся магнитных полей при полном отсутствии эллиптических и пульсирующих полей. Отношение $R_i^{(0)}$ определяет понятие «система объектов данного рода» и поэтому должно обеспечиваться на всех стадиях построения системы.

Сформируем объект-систему $M_i^{(1)}$ в виде множества композиций из элементов b_1 и b_9 в шести пазах, расположенных по образующим цилиндра и равномерно смещенных по его поверхности. Такой комплект 6 пазов принято называть инвариантным блоком [4] и обозначать символом b_0 либо в виде строки таблицы, содержащей 6 пустых ячеек:

$$b_0 = \begin{bmatrix} - & - & - & - & - & - \end{bmatrix},$$

или следующим образом: $b_0 = | \text{---} |$.

Тогда каждый из первичных элементов можно отображать так: $b_1 = |0- 2- 4- |$; $b_9 = |3- 5- 1- |$.

Формирование $M_i^{(1)}$ выполняется по закону $Z_i^{(1)}$, который заключается в суперпозиции первичных элементов b_1 и b_9 в ячейках инварианта b_0 при выполнении следующих ограничений $A_i^{(1)}$. В каждом из пазов должно размещаться не более одной АКС, а результирующие композиции не могут быть преобразованы одна в другую с помощью циклических перестановок.

В результате состав $M_i^{(1)}$ с учетом включения в него первичных элементов b_1 и b_9 , а также инварианта b_0 теперь можно представить в виде:

$$\begin{aligned} b_0 &= | \text{---} |; & b_1 &= |0- 2- 4- |; & b_2 &= |042 042|; \\ b_3 &= |002 244|; & b_4 &= |032 541|; & b_5 &= |012 345|; \\ b_6 &= |305214|; & b_7 &= |335511|; & b_8 &= |315315|; \\ b_9 &= |3- 5- 1- |. \end{aligned}$$

В теории ОСМ [4] указанная совокупность имеет порождающим семейством модулей и обозначается символом I , при этом: $M_i^{(0)} \dot{\cup} M_i^{(1)} = I$.

Для всех модулей семейства I сохраняется отношение единства $R_i^{(0)}$, но при этом для трех из них (b_5, b_2 и b_8) происходит симметризация, т.е. повышение уровня симметрии, определяющегося группами $G_6^{(+1)}$ и $G_6^{(+4)}$ уже 6-го порядка, но с общей подгруппой $G_3^{(+2)}$ [7].

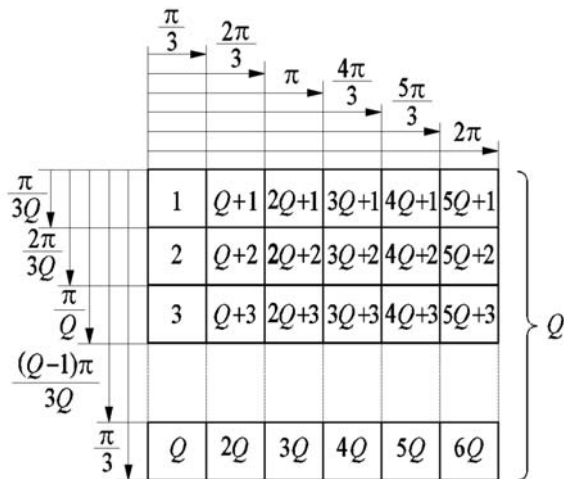


Рис. 2. Модель обмоточного пространства трехфазных обмоток

На следующих стадиях построения объект-систем $M_i^{(j)}$ в виде композиций модулей сохранение отношения единства $R_i^{(0)}$ обеспечивается благодаря принципу суперпозиции симметрий [6]. В соответствии с этим принципом группа результирующей симметрии композиций модулей является общей высшей подгруппой симметрии составных частей. Так, если композиция содержит модули b_5 и b_3 , то группа результирующей симметрии $G_3^{(+2)}$, т.е. отношение единства $R_i^{(0)}$ формируемой системы, будет сохраняться.

Формирование композиций выполняется по определенным законам $Z_i^{(j)}$ в регламентированном обмоточном пространстве, которое отображается в виде таблицы M_x , состоящей из Q инвариантов b_0 . Нумерация ячеек таблицы осуществляется согласно рис. 2, соответствуя нумерации Z_0 пазов, равномерно распределенных по образующим цилиндра [4].

Структурные модели MB , полученные замещением строк таблицы M_x модулями семейства I , позволяют отображать любые обмотки подмножества $W\bar{B} \setminus W\bar{S}_3$, называемые далее основными обмотками.

Модели MB формируются в таблицах M_x с произвольным числом Q строк применением следующих операций:

- выбор комбинации типов j модулей;
- выбор в каждом из модулей числа k_j циклических перестановок, обозначаемых далее c^k ;
- замещение соответствующих строк матрицы M_x , сформированной комбинацией модулей.

Совокупность указанных операций называется сборкой и обозначается символом t . Модели отображаются в цифровой (ЦМ), символической (СМ) или матричной (ММ) формах. Примеры перечис-

ленных разновидностей отображения для одного из вариантов обмотки M приведены ниже.

Цифровая модель представляет собой последовательность Q двузначных цифровых кодов jk , первая цифра которого соответствует индексу j модуля b_j семейства I , а вторая – числу циклических перестановок k в этом модуле: $M = 50, 74, \dots, 43, 31 \text{ @ ЦМ}$.

В СМ символическое обозначение модуля b_j семейства I сочетается с малой латинской литерой c , числитель при которой определяет число циклических перестановок k в этом модуле:

$$M = b_5 c^0 t b_7 c^4 t \dots t b_4 c^3 t b_3 c^1 \text{ @ СМ}$$

Соответствующая ММ имеет вид:

$$M = \begin{matrix} \begin{matrix} 0 & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 \\ 5 & 5 & 1 & 1 & 3 & 3 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 5 & 4 & 1 & 0 & 3 & 2 \\ 4 & 0 & 0 & 2 & 2 & 4 \end{matrix} \end{matrix} \Bigg\} \Bigg\} \rightarrow \text{ММ}$$

Подмножество моделей основных обмоток MB подразделяем на включенные в него группы AM , MP и MQ в зависимости от выбранного метода $Z_i^{(3)}$ синтеза.

Простейшим из них является метод полного синтеза $Z_1^{(3)}$ [3]. Сущность его заключается в переборе вариантов композиций модулей в матрице $M_{Q \times p}$ с заданными числами пазов $Z_0 = 6Q$ и пар полюсов $2p$. В результате перебора с оперативным исключением заранее неприемлемых результатов формируется объект-система $M_1^{(3)}$, эквивалентная подсемейству моделей MQ . Эффективность метода $Z_1^{(3)}$ невысока, поэтому применение его ограничено.

Более эффективным является использование методов направленного синтеза $Z_2^{(3)}$ [8], что позволяет формировать либо единственную модель обмотки с максимальным уровнем потокосцепления, либо набор моделей обмоток с заданным уровнем потокосцепления по рабочей гармонике $n = p = 1$, выполняемых в заданном числе пазов. Совокупность таких моделей образует подсемейство моделей $MP^0 M_2^{(3)}$. Отметим, что формирование моделей объект-систем $M_1^{(3)}$ и $M_2^{(3)}$ рекомендуется выполнять при условии $2p > 2$.

Последнее обусловлено тем, что резко повысить эффективность синтеза двухполюсных обмоток позволяет структурный множественный синтез [9]. В отличие от $Z_1^{(3)}$ и $Z_2^{(3)}$, имеющих целью проектирование отдельных обмоток с заданными числами

пазов и полюсов, задачей множественного синтеза является проектирование двухполюсных обмоток, выполняемых при любом числе пазов, кратном 6. Достигается это синтезом моделей *am*, получаемых групповой сборкой модулей b_j разных типов в матрице M_{Qx} произвольного размера ($Q = \text{var}$) по определенным закономерностям $Z_3^{(3)}$. Алгоритмы $Z_3^{(3)}$ регламентируют тип и число циклических перестановок модулей в каждой из групп и соотношение чисел входящих в эти группы модулей. Совокупность моделей *am* образует подсемейство $AM \circ M_3^{(3)}$.

Теория ОСМ позволяет получить для любой из алгоритмических моделей *AM* формулы определения коэффициентов распределения k_{Dn} по гармоникам произвольных порядков n . Кроме того, любая модель подсемейства *AM* представляет собой либо гомологию *G1* первого рода, либо спектр *SG* таких гомологий [10].

Здесь и далее гомология трактуется как бесконечный ряд обмоток, алгоритмическое преобразование структуры которых приводит к закономерному изменению их электромагнитных свойств. Гомологии *G1* первого рода представляют собой ряды двухполюсных обмоток, выполняемых в последовательно возрастающем до бесконечности числе пазов.

Простейшим случаем гомологий *G1* являются модели *AM* двухполюсных обмоток, полученные сборкой идентичных модулей (трансляцией) и обозначаемых далее *AMT*. По аналогии с гомологическими рядами (ГР) органических соединений [5] транслируемый модуль может считаться и основанием g_0 , и гомологической разницей Dg формируемого ряда первого рода $g1$:

$$g_i = b_i \circ b_i t b_i \circ b_i t b_i t b_i \circ b_i t b_i t b_i t b_i \dots$$

В любых других случаях *AM* порождает, как правило, более двух ГР.

Приведем в качестве примера модель M_{35} обмоток W_{35} и соответствующую формулу (1) расчета коэффициентов k_{Dn} :

$$M_{35} = \left. \begin{matrix} \begin{matrix} 0 & 0 & 2 & 2 & 4 & 4 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \end{matrix} \\ \begin{matrix} 0 & 0 & 2 & 2 & 4 & 4 \\ 0 & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \end{matrix} \\ \begin{matrix} 0 & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 \end{matrix} \end{matrix} \right\} \begin{matrix} k \\ Q-k \end{matrix} \quad Q;$$

$$k_{D35n} = \frac{\sin \frac{\pi n(Q-k)}{6Q} \cdot \text{Rem} \frac{\pi n}{2\theta}}{Q \sin \frac{\pi n}{30\theta}} + \frac{\sin \frac{\pi nk}{6Q} \cdot \cos \frac{\pi n}{60\theta}}{Q \sin \frac{\pi n}{60\theta}}, \quad (1)$$

где Rem – остаток от деления двух целых чисел.

Покажем, что семейство M_{35} представляет собой два спектра *SG1* и *SG2* гомологий первого рода. В первом спектре *SG1* ряды $g1_j$ образуются при произвольном, но фиксированном числе $n=k$ модулей b_3 основания g_{0j} , а последовательно присоединяемой к нему гомологической разницей Dg является модуль b_5 . Каждый из рядов $g2_j$ спектра *SG2* образуется при фиксированном числе n модулей b_5 основания g_{0j} присоединением гомологической разницы $Dg=b_3$.

Понятно, что для каждого из полученных ГР справедливо выражение (1) при подстановке соответствующих значений k .

Помимо выделения группы *AMT* остальные модели подсемейства *AM* целесообразно подразделить еще на 4 группы в зависимости от уровня потокосцепления с гармониками поля, характеризуемого коэффициентами распределения k_{Dn} , приведенными в табл. 1.

Таблица 1

Тип модуля	$n=2n+1$	$n=2n$	$3n$	$6n$
b_1, b_9	1	1	1	1
b_5	1	0	1	0
b_2, b_8	0	1	1	0
b_3, b_7	0,866	0,5	0	1
b_4, b_6	0,5	0,866	1	0

Первую группу *AM1* составляют модели, использующие блоки b_0 и b_5 , что обеспечивает максимальное потокосцепление по рабочей гармонике $n=0=1$ и полное отсутствие гармоник четных порядков. Как будет показано далее, только на основе моделей этой группы могут быть изготовлены симметричные трехфазные обмотки, выполненные в нечетных числах пазов, кратных трем.

Во вторую группу *AM2* включены модели, использующие набор блоков b_0, b_1, b_5 и b_9 . Это также может обеспечить потокосцепление по $n=0=1$, достаточно близкое к максимальному, но неизбежно приведет к появлению добавочных гармоник четных порядков.

Набор модулей третьей группа *AM3* расширен добавлением в него модулей b_3 и b_7 . При этом снизится потокосцепление по рабочей гармонике и существенно возрастет содержание добавочных гармоник.

Последующее расширение набора модулей добавлением b_4 и b_6 и образование группы *AM4* приведет к еще более резкому уменьшению коэффициентов k_{D1} и к дальнейшему росту содержания добавочных гармоник.

Использование модулей b_2 и b_8 при синтезе двухполюсных обмоток вообще не имеет смысла, так как это равносильно использованию в соответствующих реальных обмотках бифилярных катушек.

На базе каждой из моделей m_i двухполюсных обмоток подмножества AM с фиксированным значением Q может быть сформирован гомологический ряд g_{2_i} моделей основных обмоток с последовательно возрастающим числом полюсов $2p$, выполняемых в одном и том же числе пазов $Z_0 = 6Q$. Совокупность рядов g_{2_i} образует гомологии второго рода $G2$ [11].

Особенность данной гомологии заключается в формировании ГР, которое выполняется не за счет добавления к основанию g_0 гомологической разницы Dg , а посредством перестройки структуры двухполюсной обмотки-основания при неизменном числе модулей подобно тому, как это осуществляется в классических обмотках с дробным числом q пазов на полюс и фазу.

Алгоритм $Z_1^{(4)}$ формирования моделей обмоток

ГР второго рода детально изложен в [11] и заключается в преобразовании структуры двухполюсной обмотки-основания в производную обмотку с числом пар полюсов p_r . При этом изменение числа циклических перестановок в модулях и их перемещение по строкам матрицы определяется в зависимости от значения предложенного Р. Рихтером числа R . Замена типов модулей проводится в соответствии с табл. 2.

Таблица 2

Модули обмотки-основания		Модули производных обмоток	
		p_r – нечетное число	p_r – четное число
b_5	«	b_5	b_2 или b_8
b_3 или b_7	«	b_3 или b_7	b_4 или b_6
b_4 или b_6	«	b_3 или b_7	b_4 или b_6
b_1 или b_9	«	b_1 или b_9	b_1 или b_9
b_0	«	b_0	b_0

Характерной особенностью обмоток гомологических рядов $G2$ является неизменность набора коэффициентов распределения k_{Dn0} , перераспределяемых по гармоникам различных порядков по определенному закону. Суть его заключается в равенстве коэффициентов распределения k_{Dn0} обмотки-основания и k_{Dnr} производной обмотки при выполнении простого соотношения:

$$n_0 = \frac{6Qn + n_r}{p},$$

где n – такое натуральное число, при котором n_0 – целое число.

При определении порядков расчетных гармоник n_0 для производных обмоток ГР с нечетными числами пар полюсов p четным значениям n_r должны соответствовать четные n_0 , а нечетным – нечетные. Для производных обмоток с четными числами пар полюсов нечетному порядку гармоники n_r производной обмотки соответствует четный порядок n_0 обмотки-основания и наоборот.

В качестве примера рассмотрим ГР второго рода $G2$, цифровая модель двухполюсной обмотки-основания которого имеет вид: ЦМ₂=30,73,50,50,50. Тогда согласно [11] модели двух последующих четырех- и восьмиполюсных обмоток ряда $G2$ имеют вид: ЦМ₄=40,84,64,25,22; ЦМ₈=40,20,82,21,60.

В табл. 3 приведены соответствующие ММ и коэффициенты распределения k_{Dn} трех первых обмоток рассматриваемого ряда. Для производных обмоток в знаменателе дроби жирным шрифтом проставлены значения расчетных гармоник n_0 .

Таблица 3

Порядок гармоники ν	MM_2	MM_4	MM_8
	0 0 2 2 4 4	0 3 2 5 4 1	0 3 2 5 4 1
1 5 5 3 3 1	5 3 1 5 3 1	0 4 2 0 4 2	0 4 2 0 4 2
0 1 2 3 4 5	5 2 1 4 3 0	1 5 3 1 5 3	1 5 3 1 5 3
0 1 2 3 4 5	4 2 0 4 2 0	2 0 4 2 0 4	2 0 4 2 0 4
0 1 2 3 4 5	4 2 0 4 2 0	3 0 5 2 1 4	3 0 5 2 1 4
	$p=1$	$p=2$	$p=4$
1	0,9358	0,1486/8	0,0813/4
2	0,0416	0,9358/1	0,0156/2
3	0,5236	0,2351/6	0,3804/12
4	0,0813	0,0934/13	0,9358/1
5	0,1	0,1732/10	0,1732/10
6	0,2351	0,5236/3	0,0764/9
7	0,0156	0,0813/4	0,0416/2
8	0,1486	0,0732/11	0,0934/13
9	0,0764	0,3804/12	0,2351/6
10	0,1732	0,1/5	0,1/5
11	0,0732	0,0416/2	0,1989/14
12	0,3804	0,0764/9	0,5236/3
13	0,0934	0,1989/14	0,1486/8
14	0,1989	0,0156/7	0,0732/11
15	0,2	0/30	0/30

Гомологию третьего рода $G3$ представляют ряды обмоток, образующиеся при последовательном увеличении числа T повторений основных обмоток WB и пропорциональном изменении чисел

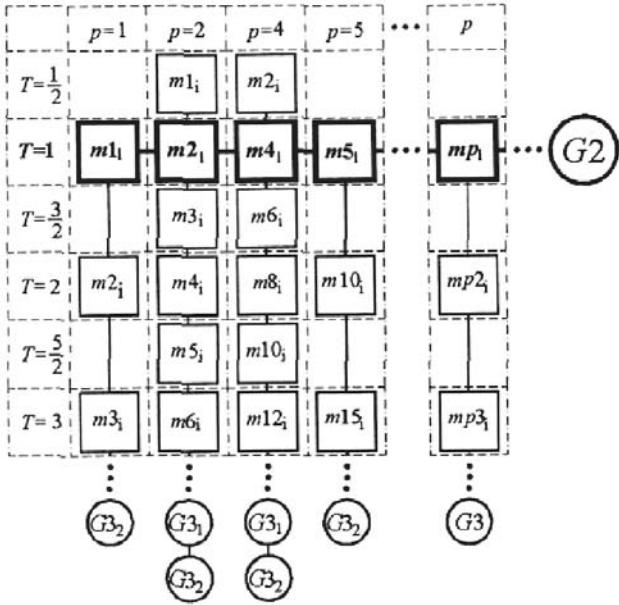


Рис. 3. Взаимосвязь гомотий G_2 и G_3

пазов Z и полюсов $2p$ [12]. Здесь понятия основания g_0 и гомотической разницы Dg ряда совпадают с понятием исходной основной обмотки.

При таком упорядоченном изменении структуры обмоток, составляющих эти ряды, закономерно изменяются и их свойства – выполняется равенство коэффициентов распределения k_{Dn0} обмотки-основания и $k_{Dn\Gamma}$ производной обмотки при выполнении условия $n_{\Gamma} = Tn_0$.

Использование гомотии G_3 зависит от состава модулей в моделях MB основных обмоток и четности либо нечетности чисел пар полюсов p .

Рассмотрим модели $m_{2j}, m_{4j}, \dots, m_{2pj}$ основных обмоток с четными числами пар полюсов p , включающими в себя только модули b_0, b_2 и b_8 (рис. 3).

Отображаемые такими моделями обмотки представляют собой двукратное повторение распределений АКС, поэтому каждая из них может быть выполнена независимо в нечетном числе пазов и за-

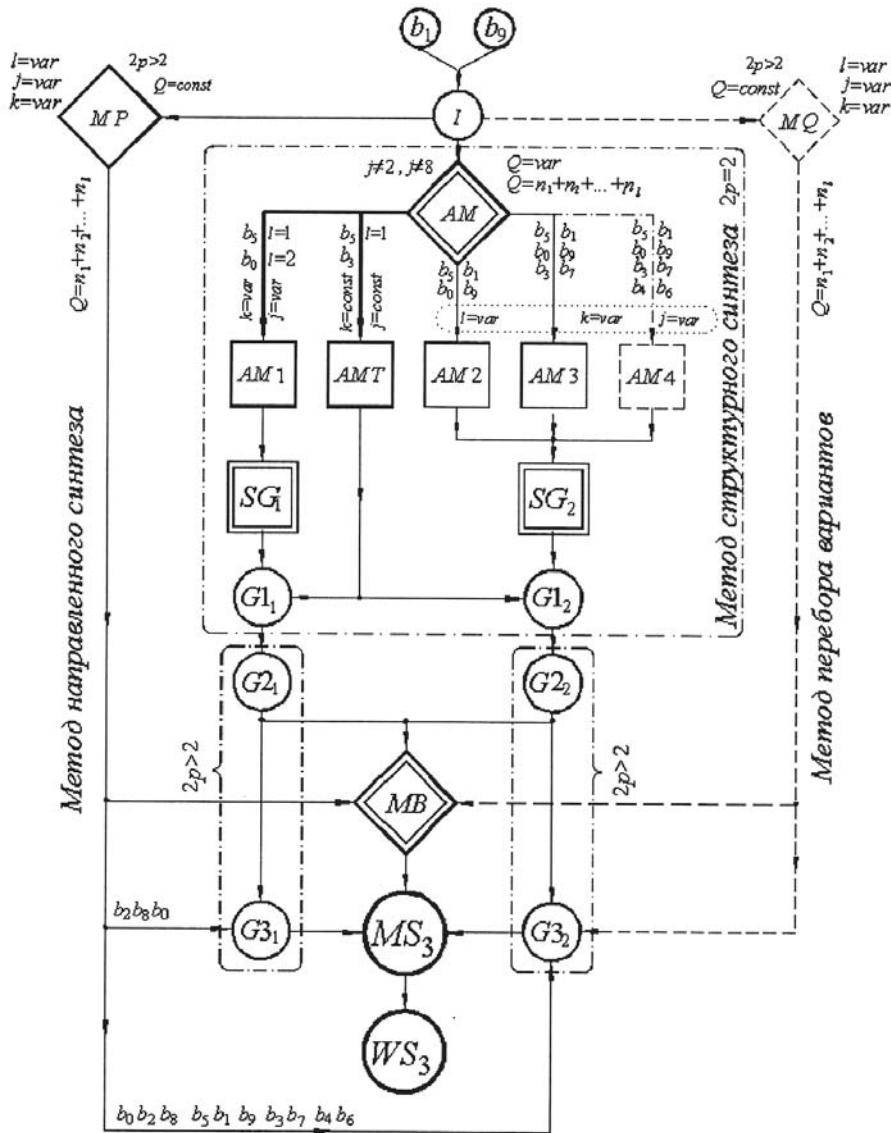


Рис. 4. Структура системы симметричных трехфазных обмоток

тем повторена нечетное число раз. Таким образом, проявляется гомология третьего рода $G3_1$, где число T повторений основной обмотки может быть целым либо дробным со знаменателем дробности d , кратным 2. Симметрия как признак единства системы $R_i^{(0)}$ в этом случае сохраняется, хотя ее уровень и понижается до третьего порядка. Условимся обозначать указанную разновидность гомологии символом $G3_1$.

Во всех остальных случаях при наличии в основных обмотках хотя бы одного модуля, отличного от трех вышеперечисленных, число T их повторений – целое, и проявление гомологии третьего рода $G3_2$ соответствует общепринятым представлениям о формировании многополюсных обмоток путем повторения основных [12].

Отметим несколько важных обстоятельств, обеспечивающих адекватность и полноту отображения бесконечного множества обмоток WS_3 в виде структурированной системы.

Во-первых, применение методов $Z_i^{(j)}$ позволяет сформировать базовое бесконечное подмножество MB моделей основных обмоток, выполняемых в числе пазов, кратном 6.

Во-вторых, на базе любой модели mp_i указанного подмножества при фиксированном значении Q использование гомологий $G2$ формирует бесконечные гомологические ряды моделей многополюсных основных обмоток (горизонтальный ряд, соответствующий $T=1$, выделенный жирными литерами и линиями на рис. 3).

В свою очередь, любая из моделей mp_i этого ряда порождает бесконечный гомологический ряд $G3$ (вертикальные ряды на рис. 3). При наличии в составе исходной модели ml_i только модулей b_0 и b_5 , а также четном числе пар полюсов p моделей mp_i ряда $G2$ обеспечивается построение бесконечных рядов $G3_1$, модели которых при дробных T отображают симметричные обмотки выполненные в нечетных числах пазов, кратных 3.

Теоретически это обеспечивает возможность отображения всех возможных вариантов симметричных трехфазных обмоток в любом числе пазов, кратном 3, и гарантию того, что ни одна из обмоток рассматриваемого множества WS_3 не будет упущена.

Структурная схема сформированной системы приведена на рис. 4.

Выводы. 1. Множество симметричных трехфазных обмоток WS_3 преобразовано в детерминированную систему, что позволило создать программ-

ное обеспечение автоматизированного направленного синтеза симметричных трехфазных обмоток и детального гармонического анализа [10].

2. С дидактической точки зрения системный подход позволяет наиболее эффективно реализовать принцип «от простого к сложному», что поможет повысить уровень усвоения одного из самых трудно воспринимаемых разделов курса «Электрические машины» при подготовке электромехаников в высшей школе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рихтер Р. Обмотки якорей машин переменного и постоянного токов. – М.: «Объединенное научно-техническое издательство», 1933, 364 с.
2. Урманцев Ю.А. Общая теория систем: состояние, приложения и перспективы развития. Система, симметрия, гармония. – М.: Мысль, 1988, 60 с.
3. Дегтев В.Г. Обобщенная структурная модель многофазных обмоток электрических машин. – Электричество, 1990, № 11, с. 40–45.
4. Дегтев В.Г. Синтез симметричных трёхфазных обмоток с заданным уровнем избирательности. – Электричество, 1993, № 4, с. 40–44.
5. Жданов Ю.А. Гомология в органической химии. – М.: Изд. Московского университета, 1950, 98 с.
6. Кюри П. О симметрии в физических явлениях; симметрия электрического и магнитного полей (Избранные труды). – М.; Л.: Наука, 1966, с. 95–113.
7. Дегтев В.Г. Симметрия и свойства многофазных обмоток. – Харьков: Электротехника и электромеханика, 2002, № 1, с. 23–27.
8. Дегтев В.Г., Лаврук И.С. Направленный синтез обмоток в заданном числе пазов. – Технічна електродинаміка, 2001, № 6, с. 39–42.
9. Дегтев В.Г., Лаврук И.С., Смирнов С.Б. Структурный синтез обмоток. – Харьков: Вісник національного технічного університету (ХПИ), 2001, № 16, с. 65–68.
10. Дегтев В.Г., Лаврук И.С. Синтез гомологических рядов многофазных обмоток и их гармонический анализ. – Харьков: Электротехника и электромеханика, 2014, № 1, с. 25–30.
11. Дегтев В.Г., Бабушанов А.В., Лаврук И.С., Самойлов Г.А. Синтез гомологических рядов трехфазных обмоток. – Харьков: Электротехника и электромеханика, 2007, № 1, с. 17–21.
12. Вольдек А.И., Попов В.В. Электрические машины. Машины переменного тока: Учебник для вузов. – СПб: Питер, 2008, 350 с.

[25.09.14]

Авторы: Дегтев Владимир Григорьевич окончил Одесский политехнический институт в 1966 г. Докторскую диссертацию «Структурные модели и методы синтеза многофазных обмоток электрических машин» защитил в 2000 г. Профессор кафедры электрических машин Одесского национального политехнического университета (ОНПУ).

Лаврук Игорь Семенович окончил ОНПУ в 2000 г. Ассистент кафедры теоретической и общей электротехники ОНПУ.

Elektrichestvo (Electricity), 2015, No. 3, pp. 41–48.

The System of Symmetrical Three-Phase Windings of Electrical Machines

V.G. DEGTEV and I.S. LAVRUK

It is shown that multiphase windings can form homologous series. An algorithm for forming homologies of two-pole and multipole windings is developed. It is shown that a change in the electromagnetic properties of windings forming a homologous series unequivocally corresponds to the law of transforming the winding structure of the given series. A system for computer-aided synthesis of three-phase windings and for analyzing the synthesized windings distribution coefficients is developed on the basis of this correspondence. From a didactic point of view, the use of a systems approach makes it possible to implement the principle “from simple to complex” in the most efficient manner, which will help to enhance the level of learning one of the most difficultly apprehended sections in the course “Electrical Machines” in training specialists on electromechanics at higher schools.

REFERENCES

1. Rikhter R. *Obmotki yakorei mashin peremennogo i postoyannogo tokov* (Armature windings of AC and DC machines). Moscow, Publ. United Scientific and Technical Publishing House, 1933, 364 p.
2. Urmantsev Yu.A. *Obshchaya teoriya sistem: sostoyaniye, prilozheniya i perspektivy razvitiya. Sistema, simmetriya, harmoniya* (General systems theory: state, application and development prospects. System, symmetry, harmony). Moscow, Publ. Mysl', 1988, 60 p.
3. Degtev V.G. *Elektrichestvo (Electricity)*, 1990, No. 11, pp. 40–45.
4. Degtev V.G. *Elektrichestvo (Electricity)*, 1993, No. 4, pp. 40–44.
5. Zhdanov Yu.A. *Gomologiya v organicheskoi khimii* (Homology in organic chemistry). Moscow, Publ. of Moscow University, 1950, 98 p.
6. Kyuri P. *O simmetrii v fizicheskikh yavleniyakh; simmetriya elektricheskogo i magnitnogo polei (Izbrannye Trudy)* (About Symmetry in Physical Phenomena, Symmetry of Electric and Magnetic Fields (Selected Works). Moscow, Leningrad, Publ. Nauka, 1996, pp. 95–113.
7. Degtev V.G. *Elektrotehnika i elektromekhanika (Power Engineering and Electromechanics)*, 2002, No. 1, pp. 23–27.
8. Degtev V.G., Lavruk I.S. *Tekhnichna elektrodinamika (Technical Electrodynamics)*, 2001, No. 6, pp. 39–42.
9. Degtev V.G., Lavruk I.S., Smirnov S.B. *Visnik natsional'nogo tekhnichnogo universitetu «KhPI» (Bulletin of the National Technical University «KhPI»*, 2001, No. 16, pp. 65–68.
10. Degtev V.G., Lavruk I.S. *Elektrotehnika i elektromekhanika (Power Engineering and Electromechanics)*, 2014, No. 1, pp. 25–30.
11. Degtev V.G., Babushanov A.V., Lavruk I.S., Samoilov G.A. *Elektrotehnika i elektromekhanika (Power Engineering and Electromechanics)*, 2007, No. 1, pp. 17–21.
12. Vol'dek A.I., Popov V.V. *Elektricheskiye mashiny. Mashiny peremennogo toka* (Electrical machines. AC machines). St. Petersburg, Publ. Piter, 2008, 350 p.

Authors: Degtev Vladimir Grigor'yevich (Odessa, Ukraine) – Doctor Techn. Sci., Professor, Odessa National Polytechnic University (ONPU).

Lavruk Igor' Semenovich (Odessa, Ukraine) – Assistant of the Department, ONPU.

* * *

Вниманию предприятий, организаций, НИИ, вузов России и зарубежных фирм!

Журнал «Электричество» предоставляет свои страницы для

- РЕКЛАМЫ ИЗДЕЛИЙ отечественных предприятий и зарубежных фирм в области энергетики, электротехники, электроники, автоматики
- ПУБЛИКАЦИИ ОБЪЯВЛЕНИЙ о научных симпозиумах, конференциях, совещаниях, семинарах
- ДРУГОЙ ИНФОРМАЦИИ, соответствующей тематике журнала

Сообщаем, что журнал поступает к зарубежным подписчикам во многих странах мира.

Напоминаем наш адрес: 101000 Москва, Главпочтамт, а/я 648.

Тел./факс (495)362-7485

