УДК 621.313.3

В.Г.Дегтев, д-р техн. наук,
А.В. Бабушанов, И.С. Лаврук, И.А. Коваленко

ГОМОЛОГИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МНОЖЕСТВА ТРЕХФАЗНЫХ ОБМОТОК

Запропоновано структурну модель множини трифазних обмоток, яка заснована на узагальненій моделі та використанні повних гомологічних рядків. Доведено, що вказана інтерпретація обмоток дає змогу обмежити їх дослідження лише двополюсними модифікаціями.

Предложена структурная модель множества трехфазных обмоток, основанная на обобщенной модели и использовании полных гомологических рядов. Показано, что указанная интерпретация обмоток позволяет ограничить их исследования только двухполюсными модификациями.

Structural model of three-phase windings dozens, based on a common model and full homologous rows application, was suggested. It was showed that a specified winding interpretation gives an opportunity to limit their research to double-pole modifications.

Эффективность проектирования многофазных обмоток, образующих бесконечные множества $\mathbf{W}_m$, в значительной мере зависит от представления о строении таких множеств. Как показано в [1,3], одними из самых перспективных являются структуры множеств $\mathbf{W}_m$, базирующиеся на обобщенной модели многофазных обмоток [2]. Предложенное в этом случае представление $\mathbf{W}_m$ в виде совокупности бесконечных подмножеств $\mathbf{S}_m$ позволяет разработать стратегию множественного синтеза, благодаря которой можно перейти от синтеза конкретных обмоток при заданных числах полюсов p и пазов Z к множественному синтезу модификаций обмоток с заданным числом полюсов в любом числе пазов, кратном числу фаз.

Задачей настоящей статьи является модернизация структурной модели множества $\mathbf{W}_3$ трехфазных обмоток [1] и совершенствование соответствующих методик синтеза.

Применительно к множеству $\mathbf{W}_3$ симметричных трехфазных обмоток его базовая модель к настоящему времени может быть представлена в виде блок-схемы, приведенной на рис.1.

Здесь $\mathbf{T}$ и $\mathbf{X}$ – подмножества временных (фазовых) t и пространственных x структурных параметров. Объединение t и x на базе инварианта $\boldsymbol{I}$ приводит к образованию блоков-модулей b_i, образующих генерирующее подмножество $\mathbf{G}_{3S}$. Методами структурного синтеза [2] в полях матриц произвольных размеров Q выполняется сборка модулей с применением объединения определенного числа n блоков в группы и циклических перестановок c^k. В результате этого формируются подмножества $\mathbf{S}_{3p}$ структур $\mathbf{S}_{1p}\ldots\mathbf{S}_{np}$. Специфика обобщенной модели позволяет для любой структуры $\mathbf{S}_{1p}\ldots\mathbf{S}_{np}$ получить аналитическое описание свойств соответствующих обмоток в виде зависимости величин обмоточных коэффициентов $k_{W\nu}=f(Q, n, k, \nu)$. Каждая из структур $\mathbf{S}_{1p}\ldots\mathbf{S}_{np}$ при конкретном соотношении параметров Q, n и k преобразуется в матричные модели $\mathbf{s}_{kl}$ трехфазных обмоток в определенных числах пазов и с конкретными числами полюсов p. Совокупность моделей образует результирующее подмножество $\mathbf{W}_3$ трехфазных обмоток.

Необходимость включать в подмножество $\mathbf{S}_{3p}$ структуры обмоток с любыми числами полюсов его мощность резко возрастает. Это существенно усложняет процесс исследования свойств обмоток и синтез обмоток с требуемыми свойствами.

Устранить данный недостаток можно используя гомологические свойства многофазных обмоток.

Подмножество G обмоток, в котором коэффициенту распределения $k_{R\nu}$ по любой гармонике ν_F произвольной многополюсной обмотки g_i, включенной в G, соответствует

© Дёгтев В.Г., Бабушанов А.В, Лаврук И.С., Коваленко И.А., 2010

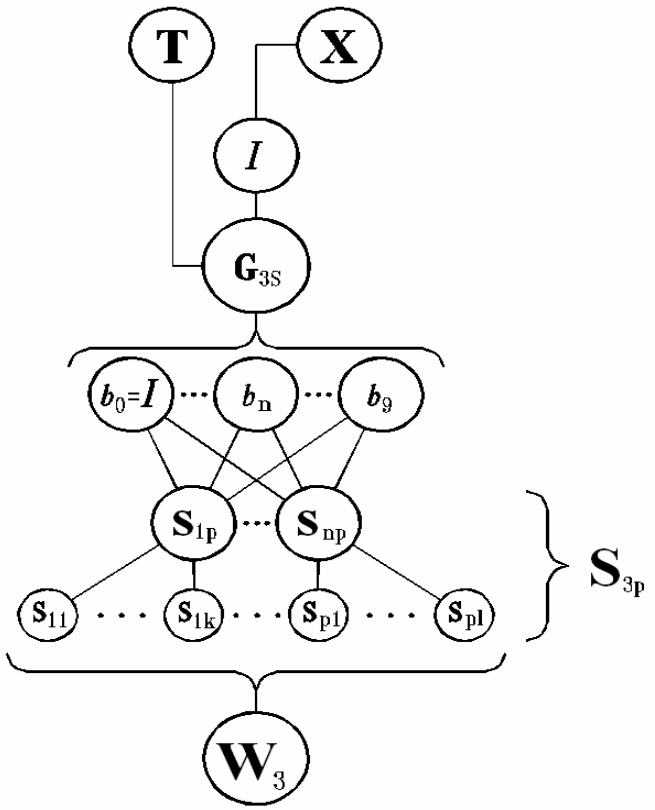


Рис.1. Исходная структурная модель множества $\mathbf{W}_3$ трехфазных обмоток

равный ему коэффициент $k_{R\nu}$ двухполюсной обмотки-основания g_0 по гармонике порядка ν_B, принято называть гомологическим рядом [1,2].

В работах [5–7] показано, что гомологические ряды G могут быть построены для произвольных симметричных двух- и трехфазных обмоток, если их представление основано на обобщенной структурной модели [2,3].

Интересно, что для гомологических рядов, открытых еще Р. Рихтером [9] и построенных на обмотках-основаниях с целыми числами пазов на полюс и фазу, свойство подобия сохраняется даже для чисел полюсов, кратных числу фаз m [5].

Несмотря на то, что при этом условии ($p=ml$) обмотки несимметричны, их включение в гомологический ряд возможно благодаря следующему представлению обмоточных коэффициентов.

При исследовании симметричных трехфазных обмоток с одинаковым числом активных катушечных сторон (АКС) в фазах значение коэффициента можно рассчитать по выражению

$$k_{R i\nu} = \frac{\left|\sum_{i=1}^{Z/3} \boldsymbol{f}_{i\nu}\right|}{\sum_{i=1}^{Z/3} \left|\boldsymbol{f}_{i\nu}\right|} = \frac{3\cdot\left|\boldsymbol{F}_{i\nu}\right|}{Z} = \frac{3\cdot F_{i\nu}}{Z}.$$

В силу равенства результирующих МДС $\boldsymbol{F}_{\nu i}$ каждой из фаз по величине оказываются равными и значения соответствующих коэффициентов распределения $k_{Ri\nu}$.

В такой постановке под коэффициентами распределения подразумеваются скалярные *множители* результирующих МДС $\boldsymbol{F}_{i\nu}$ фаз, пропорционально отображающие их величины. Соотношения между коэффициентами $k_{R1\nu}$: $k_{R2\nu}$: $k_{R3\nu}$ и соответствующими МДС $\boldsymbol{F}_{\nu 1}$: $\boldsymbol{F}_{\nu 2}$: $\boldsymbol{F}_{\nu 3}$ сохраняются одинаковыми.

Используя метод симметричных составляющих нетрудно доказать, что в случае его применения к симметричным обмоткам получим выражение структурно не отличающееся от предыдущего

$$k_{d(r,0)\nu} = \frac{3F_{d(r,0)\nu}}{Z},$$

где индексы d, r и 0 характеризуют МДС прямой, обратной и нулевой последовательности соответственно.

В симметричных обмотках при разложении комплектом векторов МДС в масштабе произвольных гармоник ν только одна из трех симметричных составляющих будет отличаться от нуля. Для прямо вращающихся гармоник ν=3*n*+1 ненулевой оказывается система прямой, для обратно вращающихся ν=3*n*+1 – система обратной, а для гармоник, кратных трем – система нулевой последовательностей. Это придает полученным коэффициентам дополнительный физический смысл и обеспечивает корректное применение для расчетов коэффициентов распределения как симметричных, так и несимметричных обмоток.

При использовании предложенной расширенной трактовке коэффициента распределения оказывается возможным построить полные (т.е. включающие и числа полюсов, кратные трем) гомологические ряды, построенные на двухполюсных обмотках-основаниях подмножества $\mathbf{S}_{3p}$.

Поскольку объем статьи ограничен, а соответствие гармонических составов для гомологических рядов, включающих числа полюсов, некратные числу фаз, доказано [5-7], ограничимся иллюстрацией гомологии для дополнений к указанным рядам.

В качестве примера в таблицах 1 и 2 приведены результаты расчета коэффициентов распределения для дополнений к гомологическому ряду обмоток с числом пазов на фазную зону *Q*=5. Матричная модель M_{51} двухполюсной обмотки-основания которого имеет вид

$$M_{51}=\begin{vmatrix} 004422 \\ 012345 \\ 012345 \\ 012345 \\ 012345 \end{vmatrix}.$$

По данным приведенных таблиц нетрудно убедиться, что закон соответствия расчетных (ν_1) и ($\nu_F = \nu_3$ и $\nu_F = \nu_5$) характерный для основного гомологического ряда [5–7]

$$\nu_1 = \frac{6Qn + \nu_F}{d}.$$

1. Результаты расчетов для p = 1 и p = 3

ν	p = 1			p = 3		
	004422 012345 012345 012345 012345			020202 030303 141414 141414 252525		
	$k_{R0\nu}$	$k_{R\nu}$	$k_{Rd\nu}$	$k_{R0\nu}$	$k_{R\nu}$	$k_{Rd\nu}$
1	0	0	0,951	0	0	0
2	0	0,1	0	0	0	0
3	0,615	0	0	0,145	0,044	0,951
4	0	0	0,1	0	0	0
5	0	0,173	0	0	0	0
6	0,2	0	0	0,2	0,1	0,1
7	0	0	0,111	0	0	0
8	0	0,1	0	0	0	0
9	0,145	0	0	0,615	0,111	0,021
10	0	0	0,1	0	0	0
11	0	0,044	0	0	0	0
12	0,2	0	0	0,2	0,1	0,1
13	0	0	0,021	0	0	0
14	0	0,1	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0,173	0,173

Например, для $\nu_F=\nu_3=3$ первого дополнения (табл.1) имеем

$$\nu_1 \quad \frac{6Qn+\nu_F}{p} \quad \frac{6\cdot 5\cdot 0+3}{3} \quad 1, \rightarrow k_{R3F} = k_{R31} = 0{,}951;$$

$$\nu_1 \quad \frac{6\cdot 5\cdot 1+3}{3} \quad 11, \rightarrow k_{R3F} = k_{R31} = 0{,}044;$$

$$\nu_1 \quad \frac{6\cdot 5\cdot 2+3}{3} \quad 21(9), \rightarrow k_{R3F} = k_{R31} = 0{,}145.$$

Аналогично для $\nu_F=\nu_3=12$ второго дополнения (табл.1)

$$\nu_1 \quad \frac{6Qn+\nu_F}{p} \quad \frac{6\cdot 5\cdot 1+12}{6} \quad 7, \rightarrow k_{R3F} = k_{R31} = 0{,}111;$$

$$\nu_1 \quad \frac{6\cdot 5\cdot 3+12}{6} \quad 17(13), \rightarrow k_{R3F} = k_{R31} = 0{,}021;$$

$$\nu_1 \quad \frac{6\cdot 5\cdot 5+12}{6} \quad 27(3), \rightarrow k_{R3F} = k_{R31} = 0{,}615.$$

Здесь учтено, что при использовании в основании модулей b_3 и b_7 низшей группы симметрии все обмотки ряда $G_{7dн}$ содержат в своем спектре как четные, так и нечетные гармоники [6].

Таким образом, при определении порядков ν_B расчетных гармоник для производных обмоток с ***четными*** числами пар полюсов следует придерживаться следующего правила.

2. Результаты расчетов для $p = 1$ и $p = 6$

ν	$p = 1$			$p = 6$		
	004422 012345 012345 012345 012345			030303 030303 141414 141414 454545		
	$k_{R0\nu}$	$k_{R\nu}$	$k_{Rd\nu}$	$k_{R0\nu}$	$k_{R\nu}$	$k_{Rd\nu}$
1	0	0	0,951	0	0	0
2	0	0,1	0	0	0	0
3	0,615	0	0	0,2	0,1	0,1
4	0	0	0,1	0	0	0
5	0	0,173	0	0	0	0
6	0,2	0	0	0,14	0,044	0,951
7	0	0	0,111	0	0	0
8	0	0,1	0	0	0	0
9	0,145	0	0	0,2	0,1	0,1
10	0	0	0,1	0	0	0
11	0	0,044	0	0	0	0
12	0,2	0	0	0,615	0,021	0,111
13	0	0	0,021	0	0	0
14	0	0,1	0	0	0	0
15	0	0	0	0,2	0,1	0,1

Если порядок выбранной гармоники ν_F производной обмотки – *нечетный*, то порядок искомой ν_B расчетной гармоники – целое *четное* число и наоборот.

При определении порядков ν_B расчетных гармоник для производных обмоток с ***нечетными*** числами пар полюсов *четным* значениям ν_F должны соответствовать *четные* ν_B, а *нечетным – нечетные.*

Возможность формирования полных гомологических рядов и справедливость гомологии даже для обмоток с нечетными числами пазов [4] подчеркивает фундаментальность этого свойства и позволяет построить модернизированную структурную модель подмножества $\mathbf{W}_3$, блок-схема которой приведена на рис.2.

В отличие от исходной в предложенной модели подмножество $\mathbf{S}_{3p}$, включающее в себя структуры $\mathbf{S}_{1p}\ldots\mathbf{S}_{np}$ в произвольных числах пазов Z и с разными числами полюсов p, заменено подмножеством $\mathbf{S}_{31}$, включающим только двухполюсные структуры $\mathbf{S}_{11}\ldots\mathbf{S}_{1n}$. Вариация параметров Q, n и k в каждой из них образует бесконечный ряд моделей

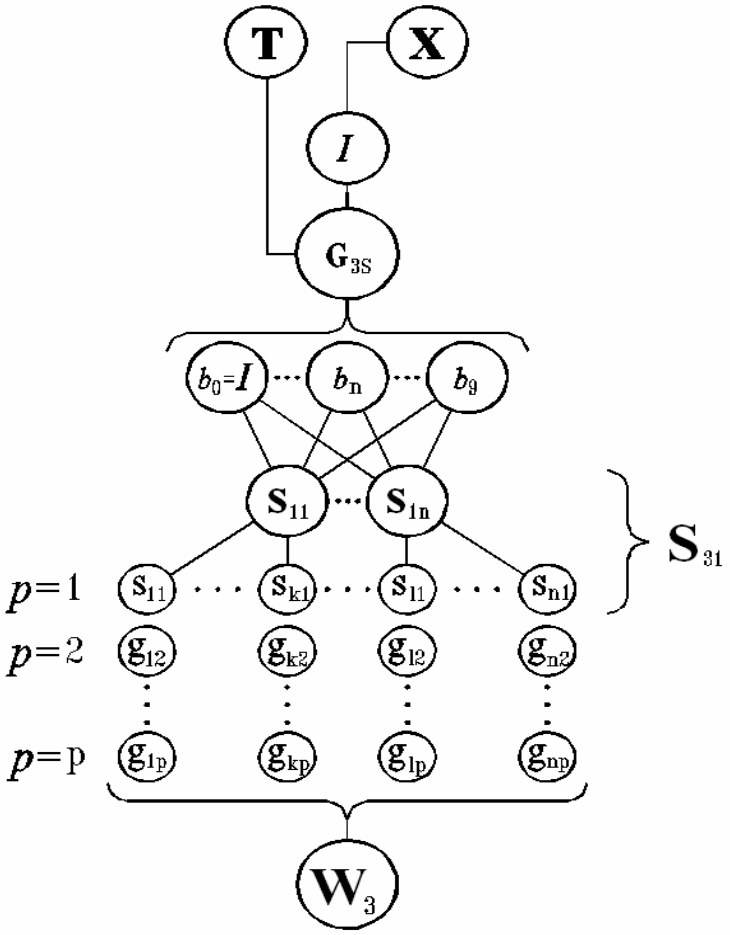


Рис.2. Модернизированная структурная модель множества $\mathbf{W}_3$ трехфазных обмоток

двухполюсных обмоток, являющихся обмотками-основаниями, порождающими вертикальные гомологические цепочки многополюсных обмоток.

Таким образом, предложенная структурная модель множества симметричных трехфазных обмоток позволяет ограничить исследование их электромагнитных свойств только двухполюсными разновидностями, так как при этом свойства остальных многополюсных обмоток однозначно определены законом гомологического соответствия.

Список использованной литературы

1. Дегтев В.Г. Структура множеств и синтез многофазных обмоток / В.Г. Дегтев //Електромаш. та електрообладнання". К.: Техніка.– № 52. 1998. –С.67-71.

2. Дегтев В.Г. Обобщенная модель многофазных обмоток /В.Г.Дегтев //Электричество.–1990. – № 11.– С. 40-45.

3. Дегтев В.Г. Структурные модели и методы синтеза многофазных обмоток электрических машин: дис. д-ра техн. наук 05.09.01/ Дегтев Владимир Григорьевич.– Одесса, 1999. – 23 с.

4. Дегтев В.Г. Компоновка статорных обмоток совмещенного синхронного генератора// В.Г. Дегтев, А.В.Бабушанов, И.А.Коваленко// Електромаш.та електрообладнання, К.: Техніка.– № 75. − 2010. – С.95-100.

5. Дегтев В.Г. Синтез полных гомологических рядов трехфазных обмоток/ В.Г.Дегтев, А.В.Бабушанов, И.А.Коваленко// Вісник Кременчуцького держ.ун-ту ім. М. Остроградського. – № 3. – Ч.1. – 2010.– С.78-81.

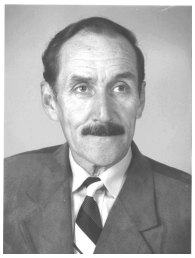
6. Дегтев В.Г. Синтез гомологических рядов трехфазных обмоток /В.Г. егтев, А. В. Бабушанов, И.С.Лаврук, Г.А.Самойлов // Електротехн. и електромех. Нац.техн.ун-т ХПІ. – № 1. – 2007. – С. 17-21.

7. Дегтев В.Г. Синтез подмножества обмоток с гомологическими структурами / В.Г. Дегтев, Г.А.Самойлов, В.А. Шкира //Вісник НТУ "ХПИ" – 2002. – №9. – С.39-42.

8. Дегтев В.Г. Гомологические ряды симметричных двухфазных обмоток / В.Г. Дегтев, С. Б.Смирнов, А. В. Бабушанов// Електромаш.та електрообладн. –К.: Техніка. – 2006. – № 67. – С. 98-104.

8. Рихтер Р. Обмотки якорей машин постоянного и переменного тока /Р. Рихтер // – М.:Госэнергоиздат, 1933. – 364 с.

Получено 19.10.2010



Дегтев Владимир Григорьевич, д.т.н., проф. каф. электрических машин Одесск. нац. политехн. ун-та

Бабушанов Алексей Викторович, аспирант той же кафедры

Лаврук Игорь Семенович, ассист. кафедры теоретич. основ и общей эл-техники Одесск. нац. политехн. ун-та

Коваленко Иван Александрович, магистр каф. электрич. машин