

КОМПОНОВКА СТАТОРНЫХ ОБМОТОК СОВМЕЩЕННОГО СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

Виконано проектування обмоток статора експериментального зразка суміщеного синхронного генератора: якірної обмотки генератора і обмотки збудження збудника. Наведено порівняльний аналіз варіантів компоновки статорних обмоток, який забезпечив його виготовлення з мінімальними витратами.

Выполнено проектирование обмоток статора экспериментального образца совмещенного синхронного генератора: якорной обмотки генератора и обмотки возбуждения возбуждителя. Приведен сравнительный анализ вариантов компоновки статорных обмоток, обеспечивший его изготовление с минимальными затратами.

Combined synchronous generator experimental pattern stators windings such as generators anchor winding and exciters excitation winding were designed. The comparative analysis of stator windings combination that gave an opportunity to build a pattern for a minimal cost was carried out.

При проектировании электрических машин с совмещенной магнитной системой приходится решать ряд специфических задач электромагнитного и технологического характера. В синхронных генераторах данного типа необходимо выполнить электромагнитную развязку электрических цепей генератора и возбuditеля, оценить влияние двух магнитных потоков различной полюсности на уровень потерь в сердечниках и т.д. Во многом технические характеристики таких агрегатов зависят от проектирования выбора обмоток и их компоновки. Например, использование в качестве статорных обмоток возбuditеля и генератора двухслойных модификаций [4, 5, 6] настолько усложняет технологию изготовления и укладки, что сразу же ограничивает изготовление только единичным производством. Поэтому рациональная компоновка обмоток является актуальной проблемой.

В настоящей статье решается задача компоновки обмоток статора экспериментального образца неявнополюсного синхронного генератора с совмещенными магнитной системой и обмоткой ротора.

При выборе базовой геометрии в первую очередь принималось во внимание возможность выполнения в пазах ротора совмещен-

ной обмотки, для чего число пазов в нем должно было быть кратным 18. Для исследования влияния совмещения магнитных полей на насыщение магнитной системы экспериментальный образец должен был содержать контактные кольца. В результате поисков был выбран серийный двигатель МТФ-011-6, имеющий 45 пазов статора и 36 пазов ротора.

Совмещенная обмотка (СО) ротора в 36 пазах обеспечивает распределение выпрямленных токов и кривую МДС, характерные для традиционных неявнополюсных трехфазных синхронных генераторов и симметрию трехфазной якорной обмотки возбuditеля с числом полюсов $2 p_B = 6$ [2].

Принятое соотношение чисел пар полюсов генератора и возбuditеля $p_G : p_B = 1 : 3$ при 45 пазах статора позволяет выполнить двухполюсную якорную обмотку генератора (ЯОГ) только с дробным числом пазов на полюс и фазу $q = 15/2 = 7\frac{1}{2}$.

Следует отметить, что нечетное число пазов сердечника резко снижает вероятность вариантного решения задачи.

Дело в том, что обмотки, изготавливаемые в таких сердечниках, образуют особую группу симметричных трехфазных обмоток с четными знаменателями дробности, выполненных в нечетном числе пазов Z , кратном трем. Обмотки данной группы характеризуются своеобразным сочетанием свойств

как шестизонных, так трехзонных обмоток. Такие обмотки генерируют нечетные и четные гармоники, что свойственно трехзонным обмоткам, но значения коэффициентов, характеризующие эти гармоники, полностью соответствуют аналогичным значениям шестизонных обмоток общего гомологического ряда [2].

В технологическом отношении такие обмотки не могут быть выполнены однослойными из-за неравенства числа взаимно инверсных активных катушечных сторон в каждой фазе. Ввиду нечетности числа пазов статора исключается возможность устранения указанного недостатка путем симметрирования числового ряда обмотки. Так, при $q=3/2$ замена ряда $|2, 1, 2, 1|$ на $|2, 1, 1, 2|$ при нечетном числе пазов к эффекту выравнивания взаимно инверсных АКС не приводит.

Таким образом, якорная обмотка генератора (ЯОГ) может быть выполнена только двухслойной.

При выбранном соотношении $p_1:p_B=1:3$ электромагнитная развязка генератора и возбuditеля может быть реализована при выполнении этой обмотки равнокатушечной с шагом, равным $2/3$ полюсного деления ($y=2\tau/3=15$).

Покажем, что при отображении одного из слоев таких обмоток двухкратное повторение в рамках обобщенной структурной модели [1] позволяет получить два приемлемых варианта. Специфика обмоток данной группы допускает использовать при их отображении только три типа модулей:

$$b_1=|0-2-4-|, b_2=|3-5-1-| \text{ и } b_3=|-----|.$$

Здесь и далее общепринятое буквенное обозначение фаз заменяется цифровым в соответствии с соотношениями

$A \rightarrow 0; z \rightarrow 1; B \rightarrow 2; x \rightarrow 3; C \rightarrow 4; y \rightarrow 5$. Знаком « \rightarrow » обозначается отсутствие тока в пазу.

При этом матрица $M_{19и}$, содержащая инвариантный блок b_3 , и матрица M_{19} должны содержать удвоенное число строк, а нумерация ячеек, соответствующих номерам реальных пазов, в таких матрицах в отличие от принятой в [2] осуществляется через один.

Использование обобщенного представления позволило получить два приемлемых

варианта M_{19} и $M_{19и}$ матричных моделей якорной обмотки генератора:

$$M_{19} = \begin{vmatrix} 0 & -2 & -4 & - \\ -1 & -3 & -5 & \\ 0 & -2 & -4 & - \\ -1 & -3 & -5 & \\ 0 & -2 & -4 & - \\ -1 & -3 & -5 & \\ 0 & -2 & -4 & - \\ -1 & -3 & -5 & \\ 0 & -2 & -4 & - \\ -1 & -3 & -5 & \\ 0 & -2 & -4 & - \\ -1 & -3 & -5 & \\ 0 & -2 & -4 & - \\ -1 & -3 & -5 & \\ 0 & -2 & -4 & - \\ -1 & -3 & -5 & \\ 0 & -2 & -4 & - \end{vmatrix} ; M_{19и} = \begin{vmatrix} 0 & -2 & -4 & - \\ -1 & -3 & -5 & \\ 0 & -2 & -4 & - \\ -1 & -3 & -5 & \\ 0 & -2 & -4 & - \\ -1 & -3 & -5 & \\ 0 & -2 & -4 & - \\ -1 & -3 & -5 & \\ 0 & -2 & -4 & - \\ -1 & -3 & -5 & \\ 0 & -2 & -4 & - \\ -1 & -3 & -5 & \\ 0 & -2 & -4 & - \\ -1 & -3 & -5 & \\ 0 & -2 & -4 & - \\ -1 & -3 & -5 & \\ 0 & -2 & -4 & - \end{vmatrix} .$$

Таблица 1. Сравнение электромагнитных свойств полученных вариантов

v	M_{19}		$M_{19и}$	
	k_{Wv}	H_v	k_{Wv}	H_v
1	0,8272	1	0,8368	1
5	0,1662	0,0402	0,2939	0,0702
7	0,1193	0,0206	0,0096	0,0016
11	0,0771	0,0085	0,1709	0,0186
13	0,0659	0,0061	0,0569	0,0052
17	0,0516	0,0037	0,118	0,0083
19	0,0469	0,003	0,0778	0,0049
23	0,0401	0,0021	0,0785	0,0041
25	0,0377	0,0018	0,0817	0,0039
29	0,034	0,0014	0,0439	0,0018
31	0,0327	0,0013	0,0753	0,0029
35	0,0307	0,0011	0,0123	0,0004
37	0,03	0,001	0,0612	0,002
41	0,0292	0,0009	0,0163	0,0005
43	0,0289	0,0008	0,0411	0,0011
τ_d	0,004307		0,008153	

В табл.1. приняты следующие обозначения: k_{Wv} – обмоточный коэффициент по v-ой гармонике, H_v – относительная амплитуда гармоники, τ_d – коэффициент дифференциального рассеяния обмотки.

В табл.1 из рассмотрения исключены гармоники четных порядков, поскольку в создаваемой совмещенной обмоткой ротора кривой возбуждения они не содержатся.

Данные таблицы показывают некоторое преимущество варианта M_{19} . Имея несколько меньший обмоточный коэффициент по рабо-

чей гармонике (0,827 против 0,837) и на 29 % большую относительную амплитуду по 7-й гармонике, во всем остальном обмотка M_{19} имеет лучшие показатели: на 75 % меньше амплитуда наиболее весомой 5-й гармоники и почти вдвое меньше коэффициент дифференциального рассеяния. Наиболее объективной оценкой может служить сопоставление форм кривых выходного напряжения рассматриваемых вариантов якорных обмоток. На данном этапе проектирования это сравнение выполнено с помощью программного модуля HASG САПР [3] путем расчета коэффициентов искажения синусоидальности $k_{\text{нec}}$.

$$k_{\text{нec}} = \sqrt{\sum_{v=2}^{\infty} E_v^{*2}},$$

где E_v^* – относительная амплитуда гармоник напряжения.

В результате установлено, что в варианте M_{19} коэффициент $k_{\text{нec}}$ почти в полтора раза меньше, чем для варианта $M_{19и}$.

Уровень пульсации на выходе выпрямительного устройства, питающего обмотку возбуждения генератора, определен следующим образом. В модуле HASG по заданным вариантам обмоток возбуждения и якоря возбуждателя определены соответствующие спектры его выходного напряжения в виде относительных амплитуд гармоник. Процесс выпрямления напряжения смоделирован в среде Electronics Workbench 5,12. В результате моделирования получены формы кривых напряжения на зажимах выпрямительного устройства (рис.1) и рассчитаны коэффициенты пульсаций $k_{\text{пул}} = 0,00031$ для $M_{19и}$ и 0,00035 для M_{19} . Таким образом, оба варианта характеризуются примерно одинаковым уровнем генерирования временных гармоник в кривую выходного напряжения генератора.

По итогам сравнительного анализа электромагнитных свойств определенным преимуществом обладает компоновка M_{19}

Однако для экспериментального образца более важными являются конструктивно-технологические показатели сравниваемых обмоток.

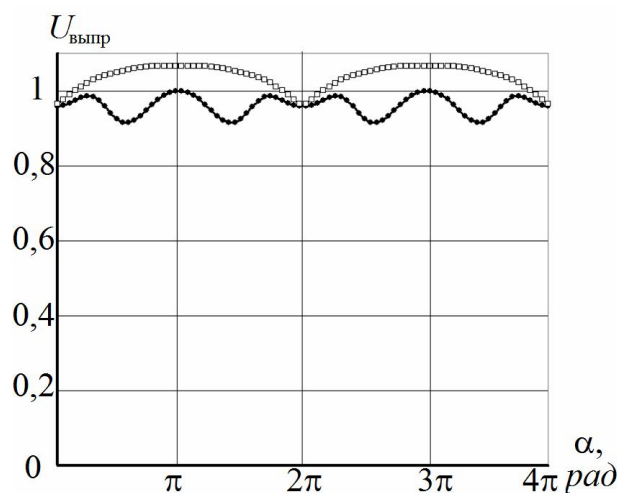


Рис.1. Пульсации напряжения на зажимах обмотки возбуждения генератора (\square – M_{19} , \bullet – $M_{19и}$)

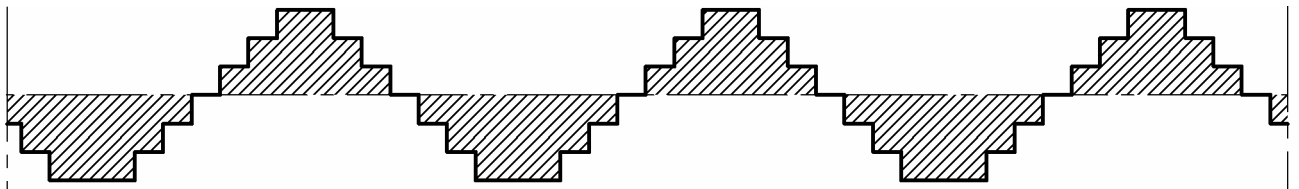
Для варианта M_{19} , распределение токов в пазах которого приведено на рис. 2, а, один из слоев занимает обмотка возбуждения возбуждателя (ОВВ), кривая МДС и схема-развертка которой приведены на рис.2, б, г. Схема-развертка ЯОГ показана на рис. 2, в. Помимо этого данный вариант не обеспечивает равномерного заполнения пазов – 20 % объема этого слоя в пазах с номерами 3, 4, 11, 18, 19, 26, 33, 34, 41 не заняты ОВВ. Указанные особенности не только значительно усложняют изготовление генератора, но не позволяют полностью использовать обмоточное пространство.

Второй вариант $M_{19и}$ представляет собой сочетание двухслойной ЯОГ, распределение фазных зон и схема-развертка которой показаны на рис. 3, а,в. Наличие незаполненных проводниками двухслойной ЯОГ пазов статора позволяет расположить в них сосредоточенную обмотку возбуждения возбуждателя, кривая МДС и схема-развертка которой изображены на рис. 3,б,г. Указанная компоновка наиболее предпочтительна экономически и технологически, так как позволяет резко сократить затраты.

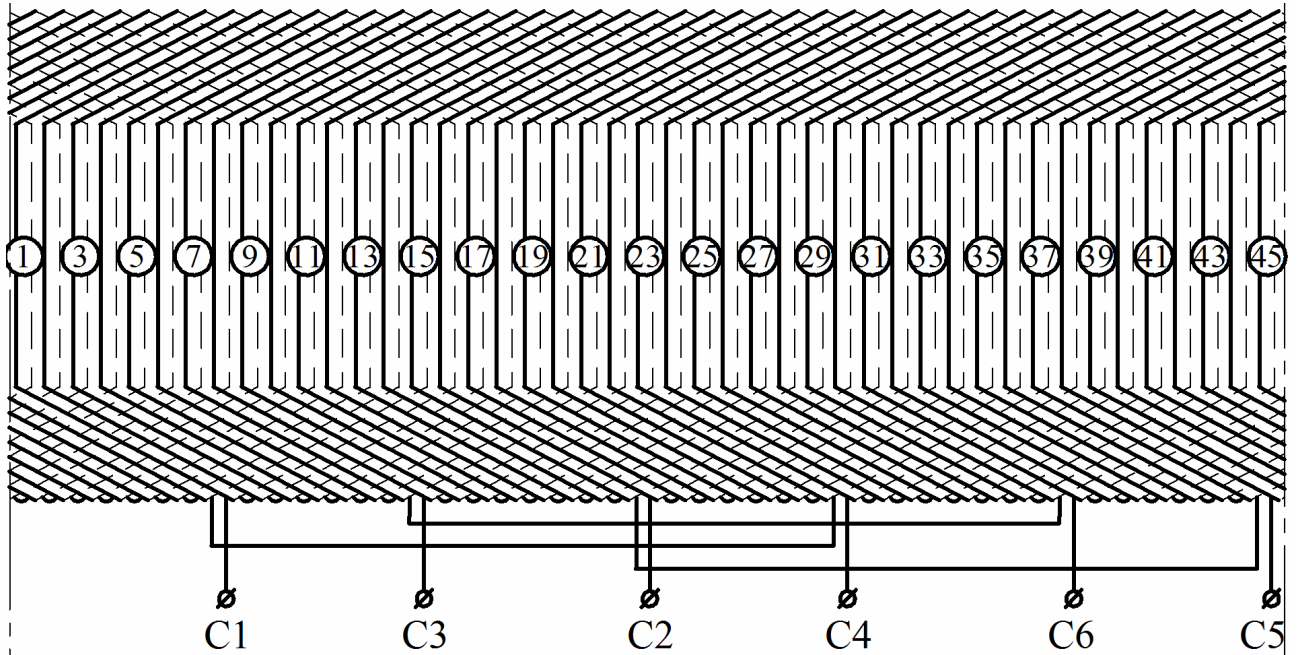
Поскольку, исследование экспериментального образца ставит своей главной целью не достижение наилучших технико-экономических показателей автономного генератора, а уточнение его математической модели, вариант $M_{19и}$ принят в качестве основного.

1	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21	23	25	27	29	31	33	35	37	39	41	43	45																				
A	A	A	A	A	A	z	z	z	z	z	z	B	B	B	B	B	B	x	x	x	x	x	x	C	C	C	C	C	C	y	y	y	y	y	y	y	A	A	A	A	A	A
•	•		×	×	×	×	×	×	×		•	•	•	•	•		×	×	×	×	×	×		•	•	•	•	•		×	×	×	×	×	×		•	•	•	•	•	•

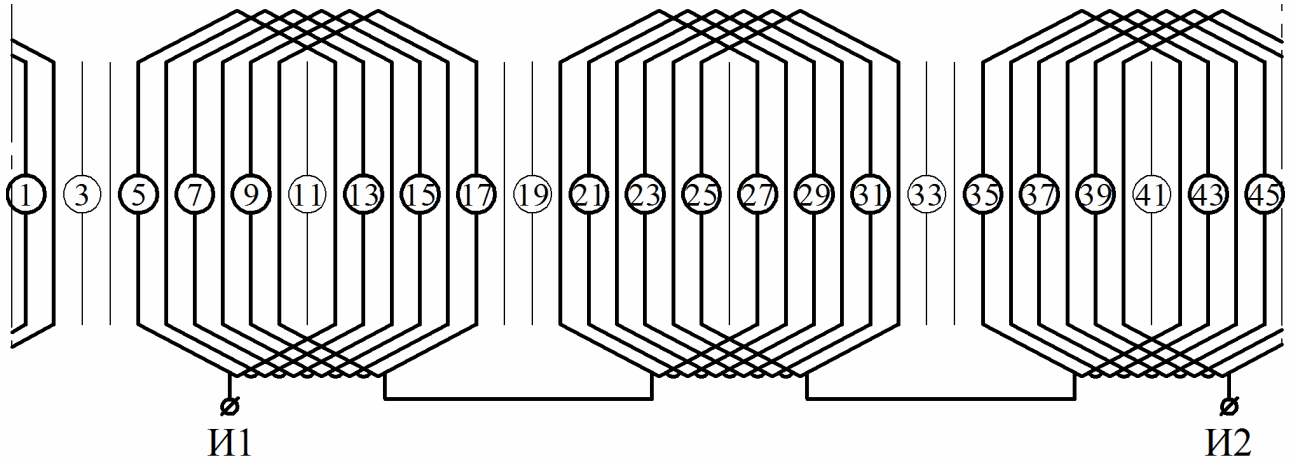
а



б



в

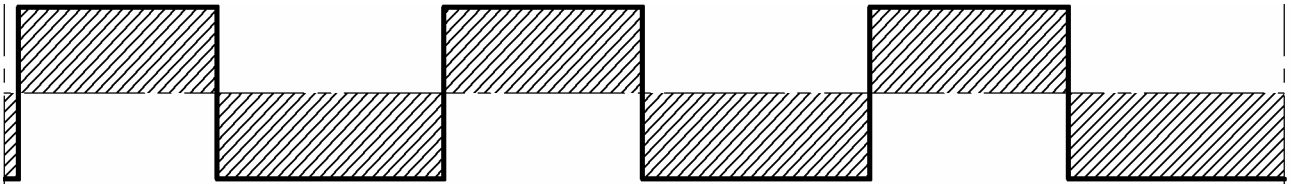


г

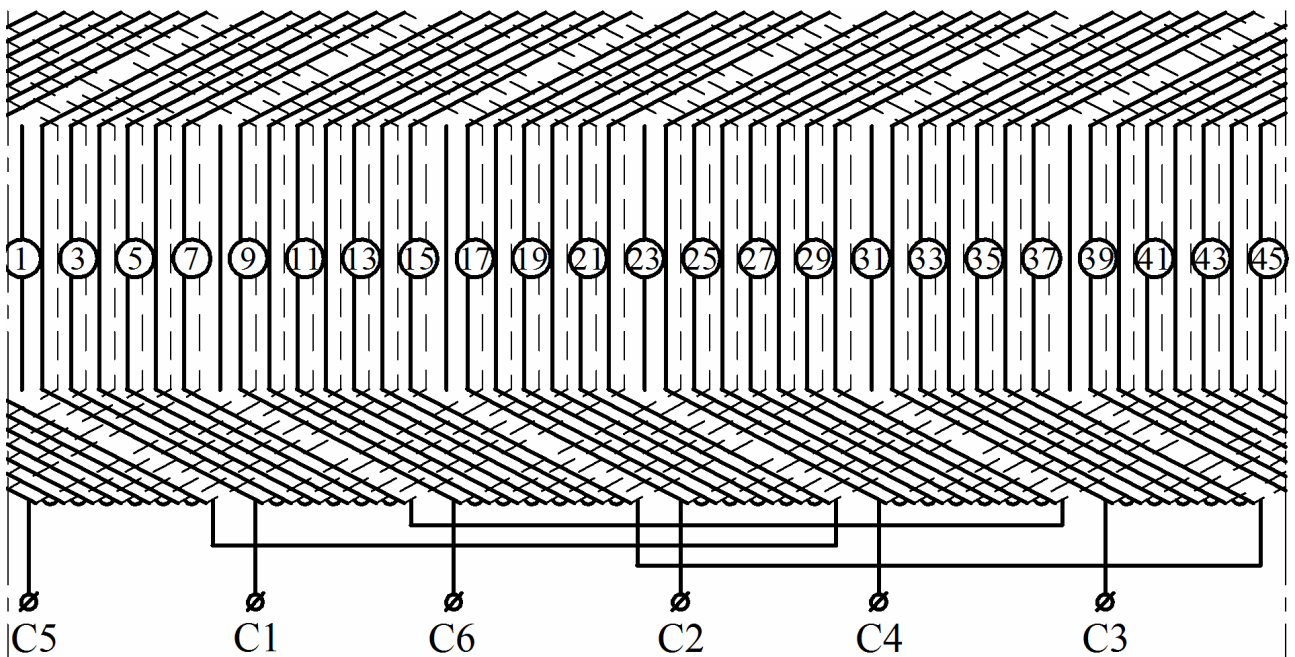
Рис.2. Компоновка обмоток по варианту M_{19} :
а – таблица чередования фаз ОЯГ и распределения постоянного тока ОВВ;
б – кривая МДС ОВВ; в – схема-развертка ОЯГ; г) схема-развертка ОВВ

1	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21	23	25	27	29	31	33	35	37	39	41	43	45											
A	A	A	A	A	z	z	z	z	z	z	B	B	B	B	B	x	x	x	x	x	x	C	C	C	C	C	y	y	y	y	y	y	
z	z	z	z	z	B	B	B	B	B	B	x	x	x	x	x	x	C	C	C	C	C	C	y	y	y	y	y	A	A	A	A	A	A

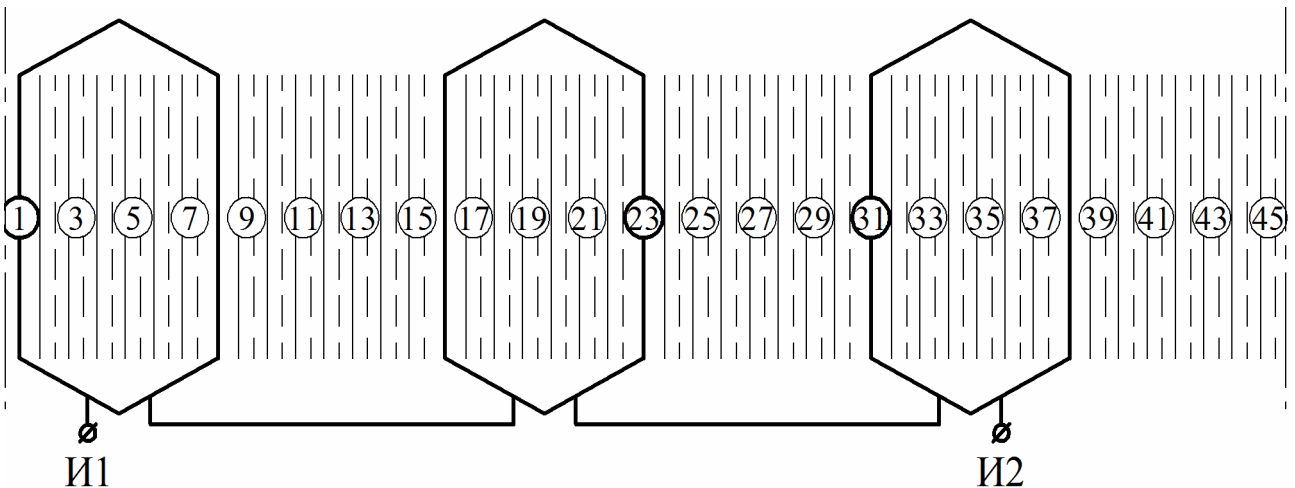
a



б



в



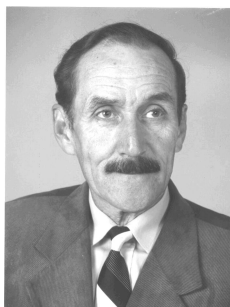
г

Рис.3. Компоновка обмоток по варианту $M_{19и}$:
 а – таблица чередования фаз ОЯГ и распределения постоянного тока ОБВ;
 б – кривая МДС ОБВ; в– схема-развертка ОЯГ; г) схема-развертка ОБВ

Список использованной литературы

1. Дегтев В.Г. Обобщенная модель многофазных обмоток /Дегтев В.Г. //Электричество. – 1990. – № 11.– С. 40-45.
2. Дегтев В.Г. Выбор обмотки якоря бесконтактного совмещённого синхронного генератора /Дегтев В.Г., Бабушанов А.В., Чеснов Я. А. //Электротехника та електромеханіка.– Нац.техн.ун-т ХПІ.– 2009. – №2.– С. 29-32.
3. Дегтев В.Г. Комп'ютерна програма «Проектирование неявнополюсных синхронных генераторов» /Дегтев В.Г. ., Бабушанов А.В., Чеснов /Свідцтво про реєстрацію авторського права на твір № 31654 від 15.01.2010.
4. Караваев В.Т. Бесконтактный совмещенный синхронный генератор / Караваев В.Т //Электричество. – № 11. – 1990. – С.17-25.
5. Клементьев А.В. Электрическая машина совмещенного типа /Клементьев А.В., Бондарев В.Н. Бюл. № 1, 10.01.2000.
6. Караваев В.Т. Бесконтактный совмещенный синхронный генератор /Караваев В.Т. //Электричество. – №11. – 1990. – С.17-25.

Получена 19.03.2010



Дегтев
Владимир Григорьевич,
д-р техн.наук, проф.
каф. электрических машин
Одесск.нац.политехн ун-та



Коваленко
Иван Александрович,
магистр каф. электрических машин
Одесск.нац.политехн ун-та



Бабушанов
Алексей Викторович,
аспирант каф. электрических машин
Одесск.нац.политехн ун-та
kem.abv@gmail.com