

ВЫБОР ОБМОТКИ ЯКОРЯ БЕСКОНТАКТНОГО СОВМЕЩЁННОГО СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

Розглянуті переваги безконтактних суміщених синхронних генераторів. Виконано гармонічний аналіз розглянутих варіантів обмоток якоря генератора і гармонійний аналіз обмотки збудження генератора. Визначені коефіцієнти не-синусоїдальності вихідної генератора в залежності від використаної обмотки. Обґрунтовано вибір обмотки експериментального зразка безконтактного суміщеного синхронного генератора.

Рассмотрены преимущества бесконтактных совмещенных синхронных генераторов. Выполнен гармонический анализ рассмотренных вариантов обмоток якоря. Определены коэффициенты несинусоидальности выходного напряжения в зависимости от использованной обмотки. Обоснован выбор обмотки экспериментального образца бесконтактного совмещенного синхронного генератора.

Бесконтактные синхронные генераторы с совмещенной магнитной системой (БССГ) благодаря своей высокой надежности находят широкое применение в системах автономного питания.

При проектировании таких машин наиболее сложной задачей является выбор существующих или синтез новых типов обмоток предназначенных для реализации функций возбудителя и генератора. Применение совмещенных обмоток, например, на роторе [1], позволяет улучшить использование дорогостоящих проводниковых и изоляционных материалов и упростить технологию обмоточно-изолировочных работ. Но даже в этом случае вопросы рационального проектирования и выбора обмоток являются актуальными. Так в общих пазах статора БССГ, предложенного Караваемым В.Т. [1], расположены две двухслойные обмотки: обмотка возбуждения возбудителя (ОВВ) с числом полюсов $2p = 4$ и двухполюсная обмотка якоря генератора (ОЯГ). Подобное решение значительно усложняет технологию, резко снижает удельные показатели и вызывает неоправданный расход активных материалов.

В настоящей работе рассматривается задача сравнительного анализа вариантов и последующего обоснованного выбора обмотки якоря экспериментального образца неявнополюсного БССГ с совмещенной обмоткой ротора.

Соотношение чисел пар полюсов генератора p_G и возбудителя p_B выбрано равным $p_G:p_B=1:3$.

Совмещенная обмотка ротора, разработанная на кафедре электрических машин [2], выполнена в 36 пазах таким образом, что обеспечивает распределение выпрямленных токов и кривую МДС с числом полюсов $2p = 2$, характерные для традиционных неявнополюсных трехфазных синхронных генераторов (рис. 1).

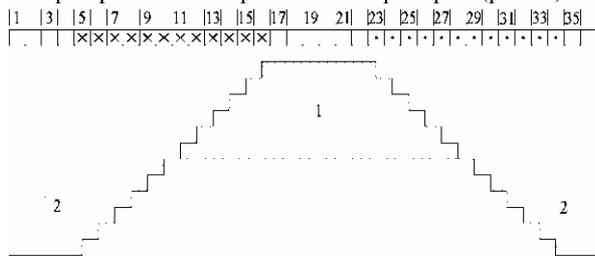


Рис. 1. Распределение токов и кривая МДС обмотки возбуждения генератора

В табл. 1 приведены данные детального гармонического анализа МДС обмотки возбуждения генератора (ОВГ), выполненного для гармоник с порядком v от 1 до $Z/2=18$.

Таблица 1

Результаты гармонического анализа ОВГ

v	1	5	7	11	13	17
$k_{\text{WOBG}v}$	0,828	0,171	0,126	0,088	0,080	0,072
$H_{\text{OBG}v}$	1,000	0,041	0,021	0,009	0,007	0,005

Здесь $k_{\text{WOBG}v}$ – обмоточный коэффициент ОВГ по v -ой гармонике;

$$H_{\text{OBG}v} = \frac{k_{\text{WOBG}v} P}{k_{\text{WOBG}v}} - \text{относительная амплитуда}$$

v -ой гармоники ОВГ;

$k_{\text{WOBG}p}$ – обмоточный коэффициент ОВГ по рабочей гармонике порядка $v=p=1$;

Число пазов статора экспериментального образца равно 30. В указанном числе пазов необходимо уложить две обмотки: обмотку якоря генератора (ОЯГ) и обмотку возбуждения возбудителя (ОВВ).

Последняя выбрана однослойной, что позволяет существенно упростить технологию операций обмоточно-изолировочного цикла.

В состав исходного набора анализируемых ОЯГ включены следующие варианты серийно применяемых обмоток:

А – однослойная шестизонная обмотка с целым числом пазов на полюс и фазу $q=5$, выполняемая вразвалку с целью экономии обмоточного провода.

Б – двухслойная модификация этой же обмотки с шагом по пазам $y_1=12$.

В – модификация предыдущей обмотки с шагом $y_2=10$.

Кроме того, в рассмотрение включены два варианта обмоток, разработанных на кафедре электрических машин на базе обобщенной структурной модели многофазных обмоток [3].

Г – однослойная обмотка, полученная на основе преобразования матричной модели варианта А применением циклической перестановки во втором модуле:



Распределение фазных зон и схема-развертка варианта Г приведены на рис. 2 а и б соответственно.

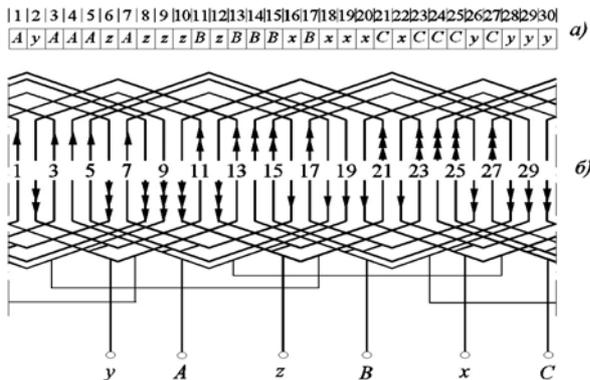


Рис. 2. Распределение фазных зон и схема-развертка обмотки (вариант Г)

Д – однослойная обмотка, полученная на основе преобразования матричной модели варианта А заменой первого модуля инвариантным блоком:



В этом случае возможна чередующаяся компоновка ОЯГ и ОВВ. Из рис. 3 видно, что ОЯГ, катушки которой изображены тонкими линиями, не занимают пазы с номерами 4, 9, 14, 19, 24 и 29. Это позволяет разместить в указанных пазах 3 катушки сосредоточенной шестиполусной ОВВ, отображенные утолщенными линиями.

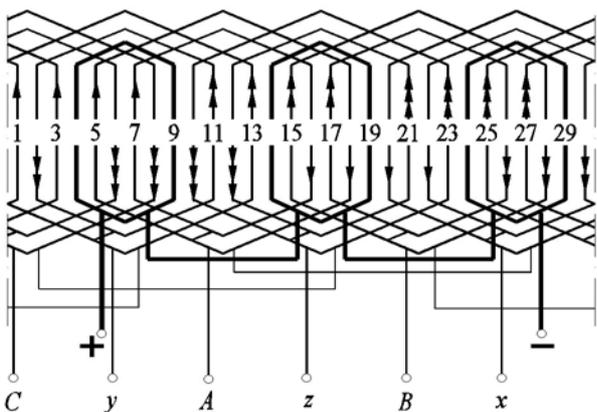


Рис. 3. Компоновка обмоток варианта Д

Сопоставительный анализ выполним с учетом технологических и электромагнитных факторов.

К технологическим факторам относятся: общее число слоев обмоток статора $N_{СТСЛ}$, число слоев ОЯГ $N_{СЛ}$, число катушек ОЯГ N_K , число катушечных групп ОЯГ $N_{КГР}$, число типов катушечных групп ОЯГ $N_{ТКГР}$. Следует отметить, что среди этих показателей наиболее весомыми являются $N_{СТСЛ}$ и $N_{СЛ}$, т.к. увеличения числа слоев резко увеличивает трудоемкость обмоточно-изоляционных работ и расход изоляции.

Относительный расход медного провода оценивается величиной среднего шага $y_{ср}$ обмотки по пазам

$$y_{ср} = \frac{\sum_{i=1}^{N_K} y_i}{N_K},$$

где y_i – шаг по пазам i -ой катушки фазы.

Средние шаги однослойных обмоток вариантов А, Г и Д при условии их максимально экономного выполнения вразвалку соответственно составляют:

$$y_{срА} = \frac{2(13+11)+15}{5} = 12,6,$$

$$y_{срГ} = \frac{2(13+11)+9}{5} = 11,4,$$

$$y_{срД} = \frac{9+13}{2} = 11.$$

Таблица 2
Конструктивно-технологические свойства обмоток

Варианты обмоток	$N_{СТСЛ}$	$N_{СЛ}$	N_K	$N_{КГР}$	$N_{ТКГР}$	$y_{ср}$
А	2	1	15	6	2	12,6
Б	3	2	30	6	2	12
В	3	2	30	6	2	10
Г	2	1	15	6	2	11,6
Д	1	1	12	6	1	11

С учетом данных табл. 2 наиболее приемлемым по своим конструктивно-технологическим свойствам является вариант Д, а далее по мере их ухудшения располагаются варианты Г, А, В и Б.

Для сравнения электромагнитных свойств вариантов ОЯГ необходимо выполнить детальный гармонический анализ, результаты которого должны включать в себя определение значений обмоточных коэффициентов ОЯГ по гармоникам с порядками в диапазоне, не меньшем от $1 \div 5Z$, расчет относительных значений E_v^* гармонических составляющих ЭДС в процентах от амплитуды основной гармоники в том же диапазоне порядков и определение коэффициентов несинусоидальности $k_{нсс}$.

Каждая пространственная гармоническая составляющая МДС F_v произвольного v обмотки возбуждения индуцирует соответствующую временную гармонику ЭДС E_v такого же порядка v в обмотке статора. Пренебрегая насыщением магнитной системы и зубчатой структурой воздушного зазора можно считать, что величина ЭДС E_v прямо пропорциональна произведению относительной амплитуды H_v МДС и обмоточному коэффициенту $k_{WOЯГv}$ обмотки якоря.

Тогда относительная величина ЭДС (E_v^*) может быть определена по выражению

$$E_v^* = H_{\text{ОВГ}v} \frac{k_{\text{WOОЯГ}}}{k_{\text{WOОЯГ}}}$$

Степень отклонения кривой ЭДС от синусоиды характеризуется коэффициентом несинусоидальности

$$k_{\text{нес}} = \sum_{v \neq p} E_v^{*2}$$

Указанный алгоритм положен в основу программного модуля GAE, реализованного в среде DELFI. Программа предусматривает традиционное симметричное распределение ОВГ, занимающей 2/3 обмоточного пространства и выполненной в произвольном числе пазов, кратном 6. Распределение одного слоя ОЯГ задается в виде матричной модели. В случае двухслойной модификации ОЯГ программа позволяет ввести шаг обмотки по пазам. Далее программа выполняет приведенный выше алгоритм по всем гармоникам, одновременно предоставляя возможность просмотра векторных диаграмм ЭДС по любой из гармоник. Программа рассчитывает коэффициент несинусоидальности $k_{\text{нес}}$ для спектра гармоник от 1 до 300. Кроме того, выполняется построение и вывод на экран полупериода кривой изменения результирующей ЭДС во времени. Следует отметить, что для обеспечения правильности указанного построения все значения обмоточных коэффициентов рассчитаны с учетом знаков [3]. Рабочее окно программного модуля GAE приведено на рис. 4.

Результаты расчетов в среде модуля GAE всех рассматриваемых вариантов ОЯГ при изменении порядков гармоник от 1 до 15 сведены в табл. 3.

Результаты расчетов в среде модуля GAE всех рассматриваемых вариантов ОЯГ при изменении порядков гармоник от 1 до 15 сведены в табл. 3.

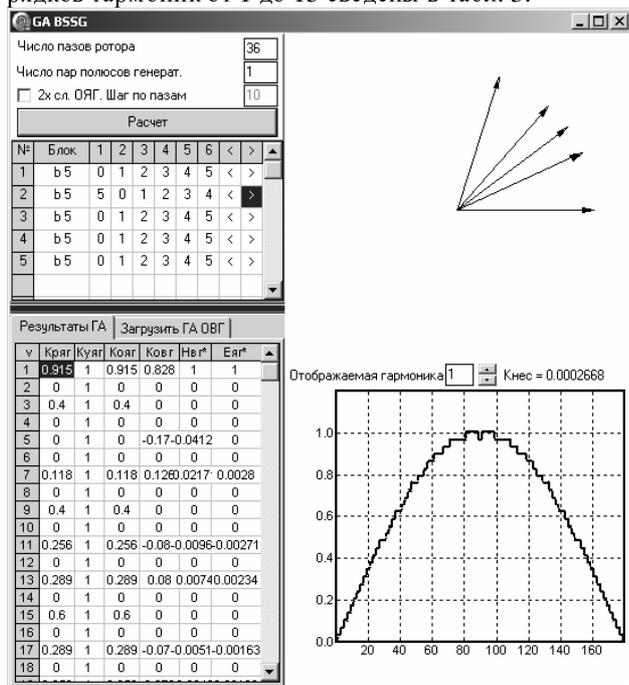


Рис.4. Окно программы GAE

Таблица. 3

Результаты гармонического анализа обмоток

	v	1	5	7	11	13	$k_{\text{нес}}$
А	$k_{\text{W}v}$	0,957	0,200	-0,149	-	0,102	0,00030504
	$E_v^*\%$	100	-0,862	-0,339	0,111	0,079	
Б	$k_{\text{R}v}$	0,957	0,200	-0,149	-	0,102	0,00016772
	$k_{\text{Y}v}$	0,951	0,000	-0,588	-	-0,588	
	$k_{\text{W}v}$	0,910	0	0,088	0,104	-0,060	
	$E_v^*\%$	100	0	0,210	-	-0,049	
В	$k_{\text{R}v}$	0,957	0,200	-0,149	-	0,102	0,00030504
	$k_{\text{Y}v}$	0,866	-0,866	-0,866	0,866	0,866	
	$k_{\text{W}v}$	0,829	-0,173	0,129	-	0,089	
	$E_v^*\%$	100	0,862	0,339	0,111	0,079	
Г	$k_{\text{W}v}$	0,915	0	0,118	0,256	-0,289	0,0002668
	$E_v^*\%$	100	0	0,280	-	-0,234	
Д	$k_{\text{W}v}$	0,973	0,433	0,078	-	-0,190	0,00072779
	$E_v^*\%$	100	-1,836	0,173	0,271	-0,144	

Примечание: здесь относительное значение ЭДС каждой из гармоник $E_v^*\%$ выражено в процентах от ЭДС по рабочей гармонике E_p^* : $E_v^*\% = E_v^* \cdot 100 / E_p^*$.

Из данных табл. 3. следует, что однослойная обмотка А превосходит все варианты серийных обмоток по уровню обмоточного коэффициента рабочей гармоники $k_{\text{W}p}$, но характеризуется наибольшим коэффициентом несинусоидальности $k_{\text{нес}}$, высокими значениями относительных амплитуд 5-ой и 7-ой гармоник и увеличенным расходом обмоточного провода, обусловленным максимальным среди рассматриваемых вариантов средним шагом $u_{\text{срА}}=12,6$. Ее двухслойные модификация Б и В по мере уменьшения шага характеризуются соответствующим монотонным уменьшением величин обмоточных коэффициентов по рабочей гармонике и расхода обмоточного провода. Однако относительное содержание высших гармоник меняется дискретно и достигает минимума для обмотки с шагом $u=12$, которая характеризуется наименьшим коэффициентом несинусоидальности $k_{\text{нес}}$ и в её кривой МДС отсутствует 5-ая гармоническая составляющая. Поэтому вариант Б является предпочтительным среди всех серийных модификаций.

Из двух нестандартных обмоток, разработанных на кафедре электрических машин, предпочтение следует отдать варианту Г. Несмотря на то, что по сравнению с вариантом Д величина обмоточного коэффициента по рабочей гармоники $k_{\text{W}pГ}$ меньше почти на 6% (0,915 против 0,973), а средний шаг $u_{\text{срГ}}$ больше на 6,6% (11,6 против 11), решающим фактором в указанном выборе являются селективные свойства сравниваемых обмоток в отношении потокосцепления с добавочными гармониками. В этом отношении обнаруживается значительное преимущество варианта Г, величина коэффициента несинусоидальности которого в 4 с лишним раза меньше, чем у обмотки по варианту Д.

Сопоставляя два лучших варианта (Б и Г) каждой из групп рассматриваемых обмоток, примем во внимание технологические и электромагнитные факторы.

Обмотка варианта Г характеризуется несколько большим значением обмоточного коэффициента рабочей гармоники k_{wp} (0,915 вместо 0,91), но проигрывает по удельному содержанию наиболее весомых высших гармоник в кривой ЭДС. Так, относительные величины ЭДС по гармоникам с номерами 5, 7 и 11 варианта Г составляют: $H_{5\Gamma}=0,0028$, $H_{7\Gamma}=-0,00271$, $H_{11\Gamma}=-0,00234$, а для варианта Б соответственно:

$H_{5\text{Б}}=-0,0021$, $H_{7\text{Б}}=0,00111$, $H_{11\text{Б}}=-0,00049$. Очевидно, что и интегральный показатель содержания гармоник в кривой ЭДС у варианта Г хуже 5% ($k_{\text{нecr}}=0,0002476$ на 4,78 больше $k_{\text{нecr}}=0,00016772$). Однако, визуальное сопоставление расчетных кривых ЭДС, приведенное на рис. 5, показывает незначительное отклонение их от синусоиды.

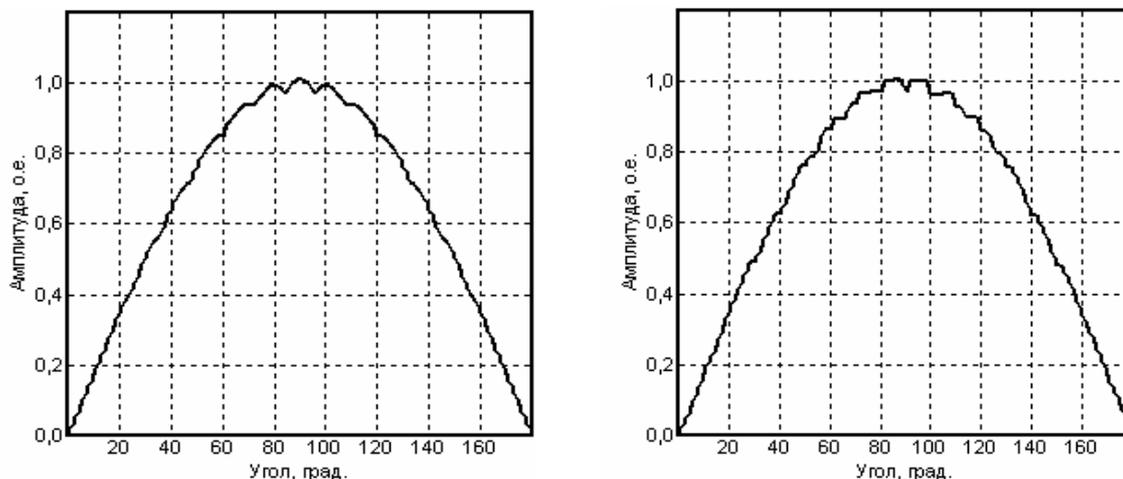


Рис. 5. Сравнение формы кривых ЭДС обмоток по вариантам В (слева) и Г (справа)

В отношении всех технологических факторов (см. табл. 2) обмотка варианта Г либо равноценна, либо превосходит обмотку варианта Б, причем основным достоинством является возможность выполнения ее однослойной. Это обстоятельство является решающим, поэтому обмотка варианта Г выбрана уложена в пазы статора экспериментального образца неявнополюсного БССГ.

Рассмотренная методика сравнительного анализа в сочетании с разработанным программным обеспечением может быть рекомендована для применения на предварительном этапе проектирования неявнополюсных генераторов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Караваев В.Т. Бесконтактный совмещенный синхронный генератор. *Электричество*, №11, 1990. – С. 17-25.
2. Дегтев В.Г., Довгий С.С. Синтез совмещенной обмотки автономного синхронного генератора // *Міжвід. наук. техн. зб., "Електромашинобудування та електрообладнання"*, Київ, Техніка. – №53, 1999. – С. 60-63.
3. Дегтев В.Г. Обобщенная модель многофазных обмоток // *Электричество*, №11, 1990. – С. 40-45.

Поступила 21.10.08

Дегтев Владимир Григорьевич, д.т.н., проф.
 Одесский национальный политехнический университет
 Украина, 65058, Одесса, пр-т Шевченко, 6/2, кв. 70,
 тел. (048) 776-29-78
Бабушанов Алексей Викторович
 тел. (048) 715-87-49
Чеснов Ярослав Александрович
 тел. (048) 8-096-55-65-291
 Украина, 65044, Одесса, пр-т Шевченко, 1, ОНПУ,
 кафедра "Электрические машины"