

В.Г. Дёгтев, А.В. Бабушанов, Я.А. Чеснов

ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ В ВОЗДУШНОМ ЗАЗОРЕ СИНХРОННОГО НЕЯВНОПОЛЮСНОГО ГЕНЕРАТОРА

Проведені дослідження магнітного поля експериментального зразку неявнополюсного синхронного генератора у режимі неробочого ходу. Виконаний порівняльний аналіз кривих розподілу магнітного поля у повітряному зазорі, отриманих експериментально і із використанням методу кінцевих елементів.

Проведены исследования магнитного поля экспериментального образца неявнополюсного синхронного генератора в режиме холостого хода. Выполнен сравнительный анализ кривых распределения магнитного поля в воздушном зазоре, полученных экспериментально и с применением метода конечных элементов.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Одним из важнейших показателей синхронных генераторов является коэффициент искажения синусоидальности K , определяющий уровень содержания добавочных гармоник в кривой выходного напряжения [1].

Форма кривых напряжения на зажимах генератора в значительной степени зависит от особенностей распределения магнитного поля в воздушном зазоре. Поэтому при проектировании генераторов получение достоверной информации о характере распределения индукции в воздушном зазоре $B_{\delta}(\alpha)$ [2, 3] или потокоцепления [4, 5] является актуальной задачей.

Современные программные и аппаратные средства позволяют определить распределение магнитного поля с применением метода конечных элементов. Однако при непосредственном их применении для анализа магнитного поля следует учитывать два обстоятельства. Во-первых, несмотря на значительные возможности современных аппаратных средств необходимо рационально подходить к выбору степени дискретизации конечных элементов, сохраняя при этом приемлемое соответствие расчетной картины поля действительности. Во-вторых, в неявнополюсных генераторах при наличии двухсторонней зубчатости и взаимном перемещении ротора и статора каждому варианту их взаимного расположения в пределах половины зубцового деления якоря соответствует оригинальный характер распределения и гармонического состава магнитного поля. Поэтому необходима отработка алгоритма выбора шага взаимного перемещения статора и ротора для получения интегральной картины поля.

Оценку корректности подхода к решению поставленной выше задачи и адекватности получаемых результатов можно выполнить только при сопоставлении последних с экспериментальными данными.

Для решения этой задачи используем сравнение результатов расчетов магнитного поля возбуждения методом конечных элементов в среде FEMM (Finite Element Method Magnetics) [6, 7] и экспериментальных исследований опытного образца синхронного неявнополюсного генератора.

ОПИСАНИЕ ОПЫТНОГО ОБРАЗЦА

В 30 пазах ротора экспериментального генератора уложена специальная обмотка возбуждения, которая позволяет получить двухполюсное магнитное по-

ле и два варианта поля с числом полюсов $2p=6$.

Распределение токов каждого варианта (рис. 1) теоретически обеспечивает генерацию полей, кривые которых обладают симметрией первого рода [8]. Это должно приводить к исключению содержания в их гармоническом спектре гармоник четных порядков.

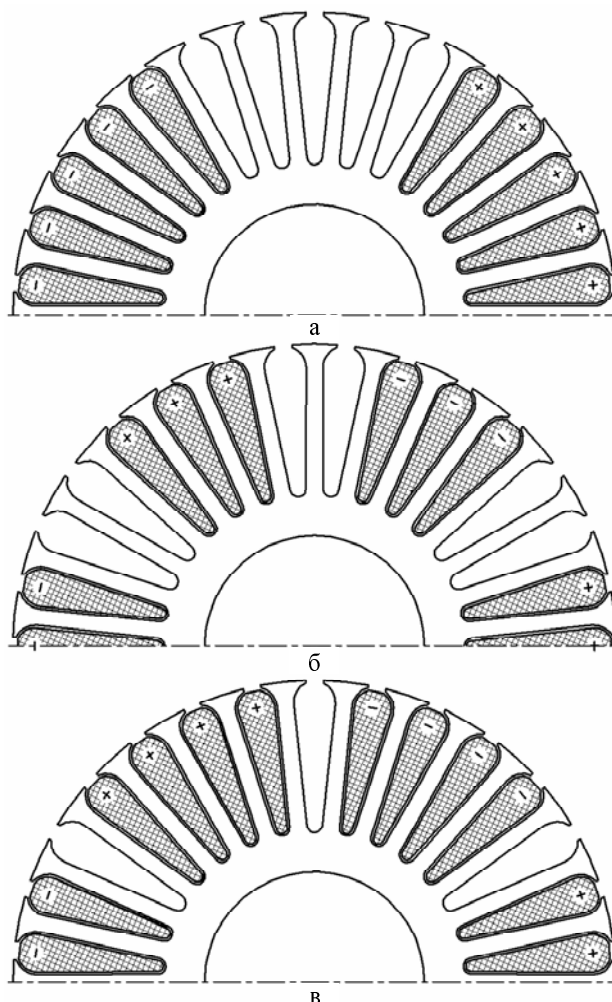


Рис. 1. Распределения токов обмотки возбуждения для двухполюсного (а) и вариантов шестиполюсного поля (б, в)

Для экспериментальной регистрации кривых ЭДС, адекватно отображающих распределение магнитного поля возбуждения, в 36 пазах статора уложена измерительная обмотка с шагом $y=18$. Размеры магнитной системы образца приведены на рис. 2.

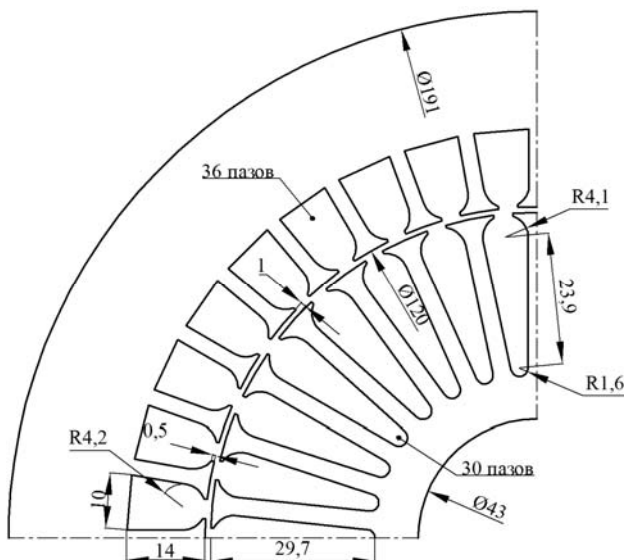


Рис. 2. Магнитная система опытного образца

Шаг измерительной обмотки является диаметрально относительно как двухполюсных, так и шестиполюсных полей, что обеспечивает одинаковое потокоцепление со всеми гармоническими нечетных порядков. Для приема и обработки сигнала указанной обмотки использован цифровой осциллограф BORDO, предназначенный для исследования формы и измерения параметров периодических и однократных электрических сигналов.

ТЕХНОЛОГИЯ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

Для кривых распределения индукции, полученных как расчетным путем, так и экспериментально, характерно наличие ряда гармоник, которыми следует пренебречь. В расчетных кривых наличие таких гармоник вызвано уровнем дискретизации конечных элементов в программе FEMM, используемой в электромагнитных расчетах электрических машин. В экспериментальных кривых причиной проявления гармоник такого рода является нестабильность щеточно-контактного взаимодействия. Кроме того, в экспериментальных кривых возможно проявление гармоник, вызванных конструктивной и технологической несимметрией, нелинейностью преобразователей, датчиков и т.д.

С учетом этих обстоятельств обработка как экспериментальных, так и расчетных кривых выполнена с помощью специально разработанной программы FOURIER, рабочее окно которой приведено на рис. 3.

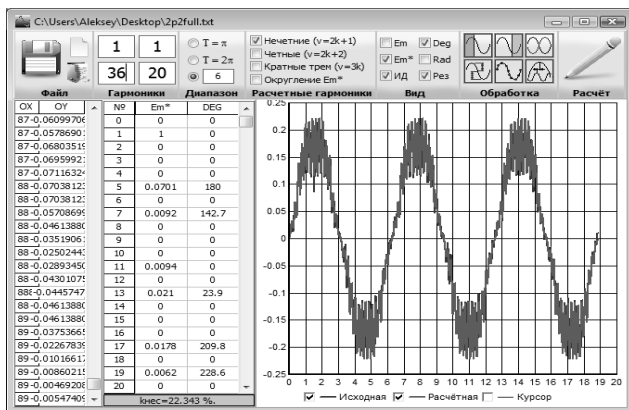


Рис. 3. Окно программы FOURIER

Программа FOURIER реализована в среде DELPHI, осуществляет разложение кривых в ряд Фурье, позволяет выполнять гармонический анализ на любом числе полупериодов. Помимо определения амплитуд и фаз гармонических составляющих с порядками в диапазоне от 0 до произвольного заданного порядка, программа выполняет расчет относительных амплитуд, расчет коэффициента K искажения синусоидальности кривых, выполняет визуализацию сопоставления исходной и построенной по результатам разложения кривых, а также предоставляет возможность передачи информации в среду Excel для последующей обработки. Кроме того, программа позволяет обрабатывать исходную кривую: удалять выбранные точки, выравнивать ординаты точек относительно оси абсцисс, исключать из результатов разложения определенные части спектра, корректировать угловые координаты гармоник для кривых с симметрией первого рода и т. д.

При анализе осциллограмм, пример одной из которых представлен на рис. 4, установлена нестабильность сигнала по периодам.

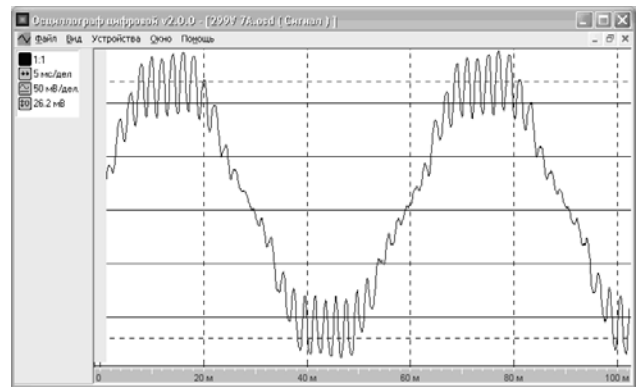


Рис. 4. Осциллограмма распределения индукции в воздушном зазоре генератора при $2p=2$

Так, результаты обработки каждого из периодов программой FOURIER, представленные в табл. 1, показали, что относительная разница амплитуд отдельных гармоник ΔB_v может достигать 120%. В то же время максимальное относительное различие в значениях коэффициентов искажения ΔK не превышает 3%.

Таблица 1

v	B_v^* по периодам, о.е.					$B_{вср}$	$\Delta B_v, \Delta K$
	B_{v1}^*	B_{v2}^*	B_{v3}^*	B_{v4}^*	B_{v5}^*		
5	0,073	0,066	0,068	0,071	0,073	0,070	0,094
7	0,009	0,012	0,011	0,008	0,008	0,010	0,477
11	0,007	0,012	0,013	0,009	0,010	0,010	0,578
13	0,023	0,022	0,020	0,019	0,018	0,020	0,236
17	0,019	0,019	0,019	0,018	0,017	0,018	0,066
25	0,021	0,020	0,020	0,017	0,017	0,019	0,209
29	0,161	0,161	0,168	0,159	0,163	0,162	0,028
31	0,126	0,127	0,128	0,130	0,127	0,128	0,034
35	0,021	0,018	0,019	0,020	0,014	0,018	0,385
37	0,013	0,014	0,017	0,018	0,011	0,015	0,457
K	0,222	0,221	0,227	0,222	0,223	0,223	0,027

Поэтому основным критерием адекватности расчетных и экспериментальных результатов были выбраны коэффициенты искажения синусоидальности и формы кривых K .

$$K = \sqrt{\sum_{v=2}^{\infty} B_{\delta v}^{*2}},$$

где $B_{\delta v}^*$ – относительная амплитуда гармоник кривой распределения индукции в воздушном зазоре экспериментального генератора.

В общем случае рациональный уровень дискретизации при моделировании в среде FEMM зависит от соотношения величин рабочего воздушного зазора δ , пазового деления t_z и полюсного деления τ и требует специальных исследований для различных конфигураций рабочей области. Применительно к конкретной геометрии экспериментального образца проведен ряд расчетных исследований, позволивших выработать некоторые рекомендации по определению этого уровня.

Гармонический анализ кривых, полученных в среде FEMM с разным числом N узлов расчетной сетки в воздушном зазоре, показал, что с ростом N происходит изменение как амплитуд, так и фаз гармоник. Поэтому предельный уровень дискретизации целесообразно связать с относительным изменением этих величин.

Минимально допустимое число узлов N_{\min} сетки можно определить, используя моделирование кривых, обладающих симметрией первого рода. Если результат разложения при этих условиях кривых в ряд Фурье обеспечивает равенство аргументов произвольных гармоник нулю или ста восьмидесяти градусам, то такой уровень дискретизации можно считать минимально приемлемым.

При определении рационального уровня дискретизации число узлов N сетки конечных элементов можно определить, построив зависимость относительного изменения амплитуд ΔB_v наиболее весомых гармоник от N .

В качестве примера такие расчетные зависимости построены для трех наиболее весомых гармоник ($v=5, v=29, v=31$) индукции двухполюсного поля экспериментального образца и приведены на рис. 5.

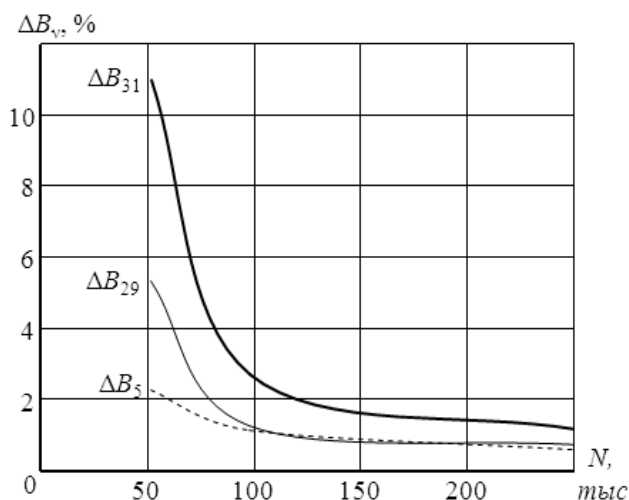


Рис. 5. Зависимость $\Delta B_v=f(N)$

Как следует из графиков этого рисунка, при увеличении числа узлов расчетной сетки относительное изменение амплитуд наиболее весомых гармоник имеет экспоненциальный характер и позволяет выбирать N в зависимости от необходимой точности расчета.

После выбора N было проведено исследование влияния взаимного положения статора и ротора двухполюсного генератора в режиме холостого хода на характер распределения индукции в воздушном зазоре.

Программа FEMM позволяет получить распределение нормальной по отношению к выбранному контуру индукции в воздушном зазоре для заданного числа точек контура. Типичный результат такого расчета для одного из произвольных взаимных положений статора и ротора приведен на рис. 6, картина распределения магнитных силовых линий для соответствующего положения приведена на рис. 7.

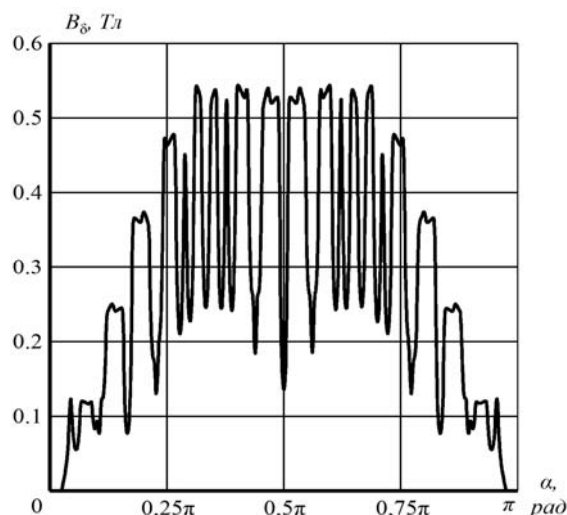


Рис. 6. Зависимость $B_{\delta}=f(\alpha)$ по расчету в среде FEMM

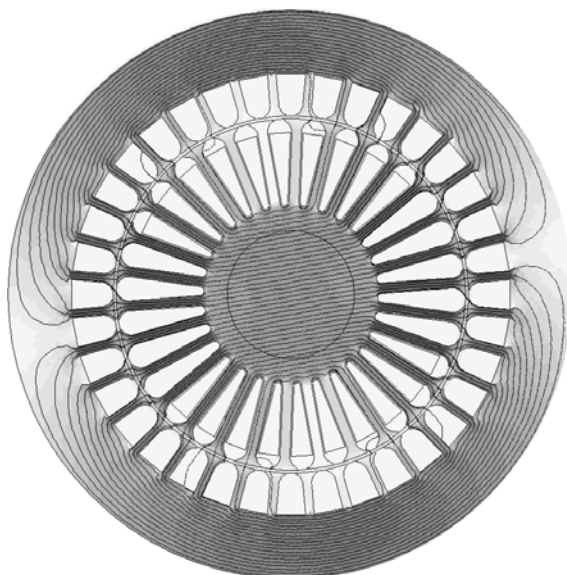


Рис. 7. Распределение двухполюсного варианта магнитного поля

Как следует из сопоставления графиков на рисунках 4 и 6 форма расчетной кривой (рис. 6) резко отличается от экспериментальной зависимости (рис. 4). Причиной указанного расхождения является разный характер кривых. Экспериментальная кривая является интегральным результатом, учитывающим

все возможные варианты взаимного расположения ротора и статора на протяжении периода. Расчетная зависимость отображает только одно выбранное из множества возможных взаимных расположений статора и ротора.

Для получения интегральной расчетной кривой пространственного распределения магнитного поля в воздушном зазоре необходимо выполнить расчёты для каждого из возможных вариантов взаимного расположения ротора и статора. Затем значения индукции интегральной кривой определяются, как среднее арифметическое от значений индукции каждого расчета в соответствующих координатах α .

Как экспериментальные, так и расчетные интегральные кривые $B_{\deltaи}^*=f(\alpha)$ генератора обработаны с помощью программы FOURIER. Обработка заключалась в исключении теоретически отсутствующих гармоник (четных и кратных 3), а также гармоник, относительные амплитуды которых составляли менее 1%. Гармоники, кратные трем отсутствуют, поскольку обмотка возбуждения занимает 2/3 пазов ротора и не генерирует их. Указанные допущения позволили ограничить максимальный порядок учитываемых гармоник первыми зубцовыми и статора ($\nu=35, \nu=37$).

Изложенная выше методика была применена при обработке расчетов в среде FEMM для вариантов взаимного расположения статора и ротора при угловом смещении $\Delta\alpha=1^\circ$.

СОПОСТАВЛЕНИЕ РАСЧЁТНЫХ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Сопоставление форм интегральных кривых $B_{\deltaи}^*=f(\alpha)$, построенных по результатам разложения экспериментальной и расчетной характеристик в относительных единицах при двухполюсном возбуждении приведено на рис. 8.

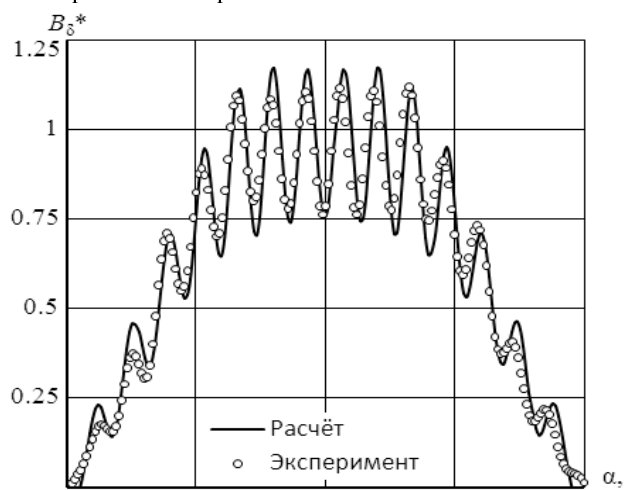


Рис. 8. Сравнение форм экспериментальной и расчетной интегральных кривых $B_{\deltaи}^*=f(\alpha)$ ($\Delta\alpha=1^\circ$)

По результатам разложения в ряд Фурье расчетной и экспериментальной кривых значения коэффициентов искажения синусоидальности K составляют $K_p=0,1783, K_3=0,1794$, соответственно. Отличие составляет 0,6%, а значит можно считать, что расчетная кривая распределения магнитного поля соответствует

действительной с допустимой погрешностью.

Установлено, что расчетные интегральные кривые $B_{\deltaи}^*=f(\alpha)$, полученные по двум произвольным взаимным положениям статора и ротора и предыдущий результат после обработки по предложенной методике полностью идентичны. Рассмотренные положения отличаются тем, что ротор одного из них смещен на половину зубцового деления статора, относительно другого. Это позволяет при последующих расчетах ограничиваться рассмотрением только двух таких характерных положений.

Аналогично двухполюсному полю выполнено сравнение эксперимента и расчета характеристик для двух вариантов шестиполюсного поля. Здесь следует отметить, что в этом случае меняется соотношение величин рабочего воздушного зазора δ , пазового деления t_2 и полюсного деления τ . Это обстоятельство потребовало корректировки в процессе обработки расчетных интегральных кривых $B_{\deltaи}^*=f(\alpha)$ программой FOURIER. Оказалось, что, несмотря на проявление в расчетных интегральных кривых вторых зубцовых гармоник статора и ротора ($\nu=19, 21, 23, 25$), в соответствующих экспериментальных кривых указанные гармоники не проявляются. Поэтому предельный относительный порядок в данном случае ограничен первыми зубцовыми гармониками.

Сравнение экспериментальных и расчетных кривых распределения магнитного поля в воздушном зазоре, построенных по результатам разложения в ряд Фурье приведено на рис. 9 и 10. Коэффициенты искажения синусоидальности расчетных и экспериментальных интегральных кривых, представленных на рис. 9, 10, для первого варианта составляют $K_p=0,233, K_3=0,234$ ($\Delta K=0,004$), а для второго – $K_p=0,247, K_3=0,25$ ($\Delta K=0,012$).

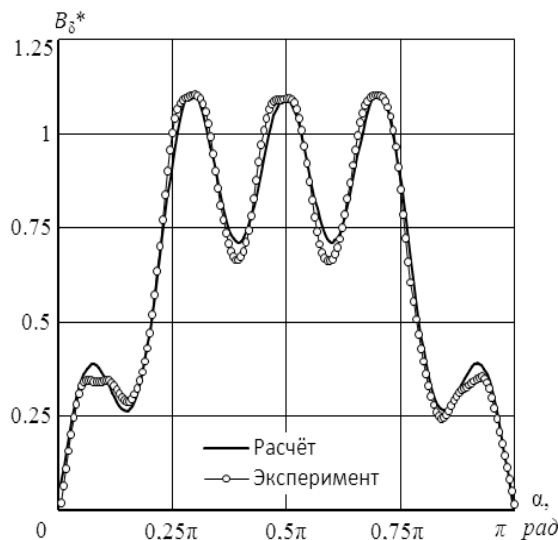


Рис. 9. Сравнение интегральных кривых $B_{\deltaи}^*=f(\alpha)$ первого варианта шестиполюсного генератора

Графическое сопоставление характеристик, приведенных на рис. 9 и 10 показывает их хорошую сходимость.

Картины распределения магнитных силовых линий для представленных вариантов шестиполюсного поля приведены на рис. 11 и 12.

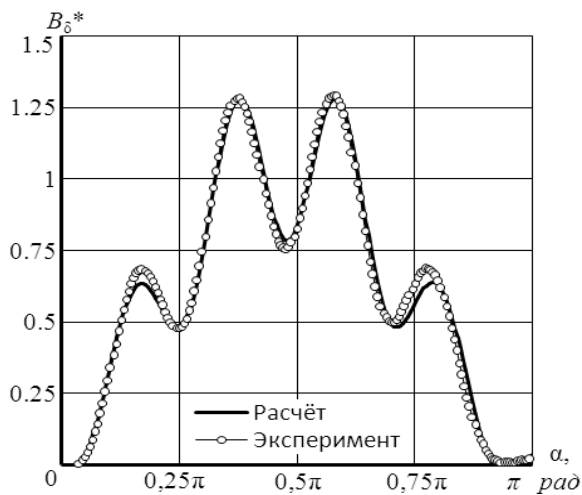


Рис. 10. Сравнение интегральных кривых $B_{\delta_i}^* = f(\alpha)$ второго варианта шестиполюсного генератора

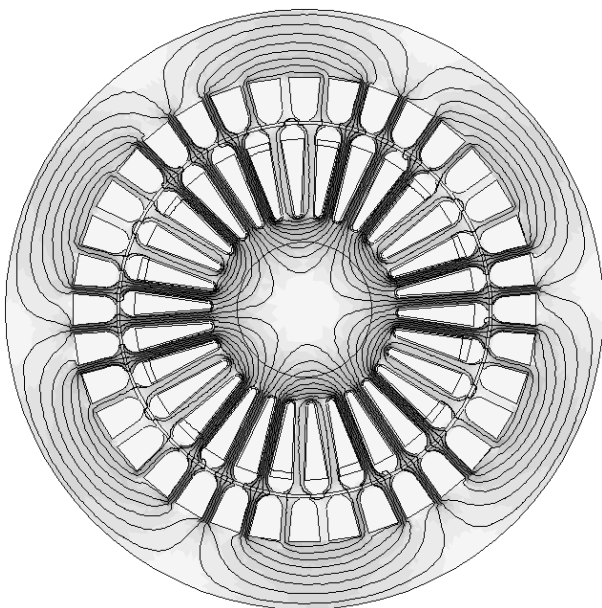


Рис. 11. Распределение магнитного поля при $2p=6$ согласно рис. 1, б

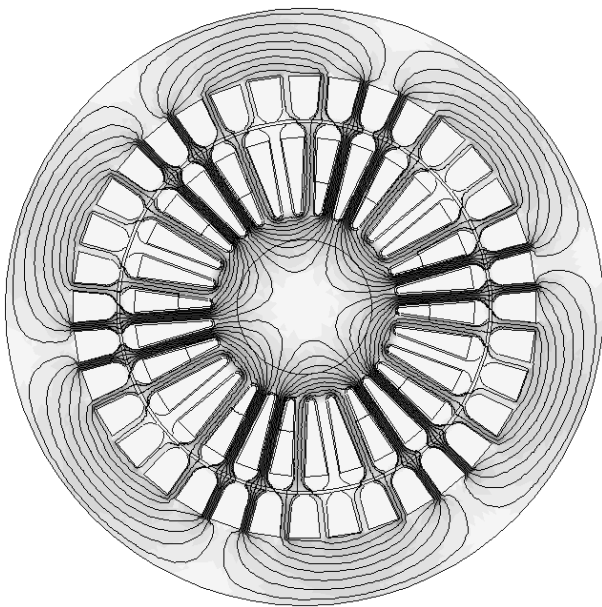


Рис. 12. Распределение магнитного поля при $2p=6$ согласно рис. 1, в

ВЫВОДЫ

Полученные результаты позволяют рекомендовать предложенную технологию обработки расчетных и экспериментальных результатов для продолжения исследований магнитных полей генераторов при различных нагрузках и уровнях насыщения, в условиях совмещения магнитных полей с разными числами полюсов и т.д.

В конечном итоге это обеспечит возможность достоверного определения форм кривых фазного и линейного напряжений и соответствующих значений коэффициентов искажения синусоидальности в процессе проектирования генераторов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 10169-77. Машины электрические трехфазные синхронные. Методы испытаний.
2. Вольдек А.И. Электрические машины. Л.: Энергия, 1978.- 832 с.
3. Костенко М.П., Пиотровский Л.М. Электрические машины. В 2-х ч. Ч.2- Машины переменного тока. Л.: Энергия, 1973. - 648 с.
4. Милых В.И., Полякова Н.В. Анализ характера ЭДС, вызываемых реакцией якоря в турбогенераторе // Вісник Національного університету "Львівська політехніка", №487, Електроенергетичні та електромеханічні системи. Львів: НУ "ЛП", 2003. - С. 10-17.
5. Милых В.И., Полякова Н.В. Гармонический анализ ЭДС в турбогенераторе на основе численных расчетов вращающихся магнитных полей в различных режимах // Електротехніка і електромеханіка. - 2004.-№4. - С. 46-51.
6. David Meeker. Finite Element Method Magnetics. <http://femm.foster-miller.net/>
7. David Meeker. Finite Element Method Magnetics. Users Manual. Version 4.2. 2006. - 155 p.
8. Жерве Г.К. Обмотки электрических машин. - Л.: Энергоатомиздат, 1989.- 400 с.

Поступила 16.07.2009

Дёгтев Владимир Григорьевич, д.т.н., проф.
тел. (048) 776-29-78, e-mail: kem.deg@gmail.com
Бабушанов Алексей Викторович
тел. 8-063-774-25-58, e-mail: kem.abv@gmail.com
Чеснов Ярослав Александрович
тел. 8-096-55-65-291, e-mail: chesnov2007@ukr.net
Одесский национальный политехнический университет
Украина, 65058, Одесса, пр-т Шевченко, 6/2, кв. 70,

V.G. Degtev, A.V. Babushanov, Y.A. Chesnov

Synchronous generators air gap magnetic field analysis

Research on magnetic field of a synchronous implicit-pole generator operative embodiment is performed for no-load conditions. Comparative analysis of magnetic field distribution curves in the air gap obtained experimentally and analytically is made.

Key words – magnetic field distribution, synchronous generator, finite element method, superior harmonics, Fourier series