



ЧУМАК В.В.

УДК 621.313.32

ЧУМАК В.В., канд. техн. наук, Национальный технический университет Украины "Киевский политехнический институт",

ФЕДОРЕНКО Г.М., докт. техн. наук,

Институт электродинамики НАНУ,

ГАЙДЕНКО Ю.А., канд. техн. наук, Национальный технический университет Украины "Киевский политехнический институт"

РАЗРАБОТКА, ПРИМЕНЕНИЕ И ОПЫТ ЭКСПЛУАТАЦИИ МАГНИТНЫХ КЛИНЬЕВ В МОЩНЫХ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯХ И СИНХРОННЫХ ГИДРОГЕНЕРАТОРАХ

Численными и экспериментальными методами проанализировано и дана оценка влияния магнитных клиньев для целей оптимизации ключевых параметров мощных асинхронных двигателей и синхронных гидрогенераторов вертикального исполнения мощностью 34 МВА.



ФЕДОРЕНКО Г.М.

Авторы приводят данные об экономической энергоэффективности модернизации электрических машин (ЭМ) с применением *магнитных клиньев* [1–3]. По этим данным, применение магнитных клиньев марки МКП-6 в асинхронных электродвигателях типа ВАО2 позволило увеличить КПД на 0,5–1,5% и уменьшить нагрев обмотки статора на 8–14°C. Такое улучшение, по расчетам авторов на примере высоковольтного двигателя мощностью 500 кВт, создаст энергосберегающий эффект примерно 30 МВт/год. Кроме того, в работе [4], хорватскими авторами приведены убедительные данные о положительном влиянии магнитных клиньев в пазах статора гидрогенератора на уменьшение поверхностных потерь в полюсном наконечнике, а также на уменьшение необходимого тока возбуждения, что, естественно, привело к уменьшению электрических потерь в обмотке возбуждения и снижению её температуры.

В то же время, на Смелянском электромеханическом заводе производятся несколько видов мощных высоковольтных тяговых асинхронных двигателей нового поколения (СТА1200 и СТА1200А). Их единичная мощность составляет 1200 кВт.

Известно, что помимо энергетических показателей, о которых уже сказано выше, уровню эффективности использования материалов и прочих технико-экономических показателей, важ-

ным параметром всех электрических машин, в том числе гидрогенераторов, является показатели надежности, уровень их шума и вибрации [3]. В развитых странах виброакустическим характеристикам ЭМ уделяется, не меньшее внимание, чем энергетическим и энергоэкологическим.

В предлагаемой работе, на основе анализа методами теории электромагнитного поля, был исследован асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором типа СТА1200А, как физическая модель более мощных машин, на предмет улучшения его виброакустических и энергетических свойств.

Объект исследования.

Двигатель СТА1200А имеет номинальную мощность 1200 кВт, номинальную частоту 60 Гц, диапазон регулирования частоты 0,5–120 Гц, номинальное напряжение 2400 В (при $f = 60$ Гц) и максимальное напряжение 3800 В (при $f = 120$ Гц),

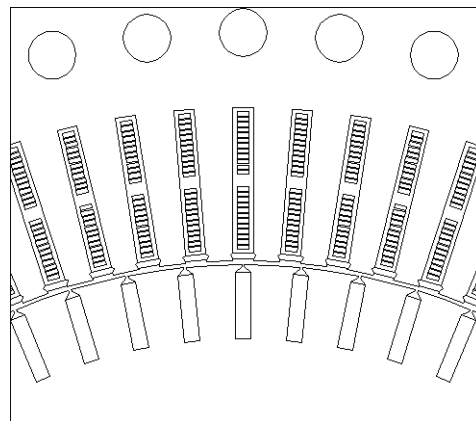


Рис. 1. Фрагмент поперечного сечения активной зоны исследуемого двигателя СТА1200А

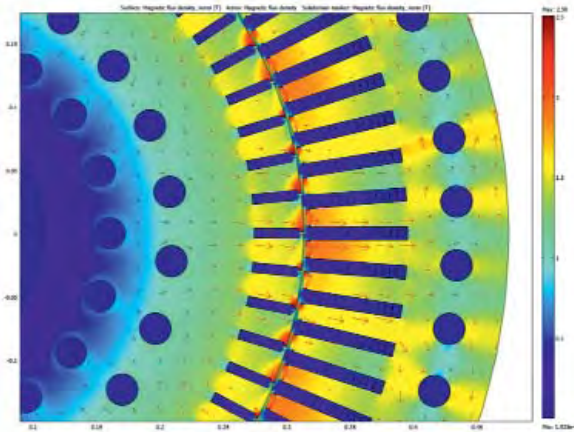


Рис. 2. Распределение магнитной индукции в поперечном сечении при частоте питания 60 Гц (номинальный режим)

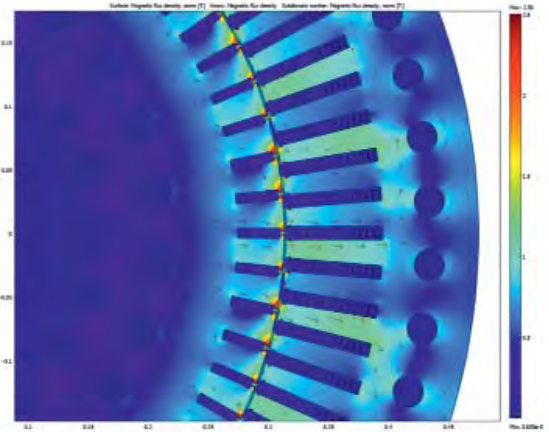


Рис. 3. Распределение магнитной индукции в поперечном сечении при частоте питания 120 Гц

число фаз — 4. Фрагмент зубцово-пазовой зоны двигателя показан на Рис. 1. Двигатель имеет независимую систему охлаждения, стержни ротора выполнены из меди.

Расчет электромагнитного поля в активной зоне двигателя производился с помощью метода конечных элементов. Расчеты выполнены в программно-вычислительном комплексе COMSOL. При расчете магнитного поля использовалось нестационарное нелинейное дифференциальное уравнение для векторного магнитного потенциала в движущейся электропроводной среде [2, 3] для случая, когда магнитное поле изменяется по гармоническому закону

$$\vec{\nabla} \times \frac{1}{\mu} (\vec{\nabla} \times \vec{A}) - j\omega\gamma \vec{A} + \gamma \vec{V} \times (\vec{\nabla} \times \vec{A}) = \vec{J}_{стоп}$$

где μ , γ — магнитная проницаемость и электропроводность; \vec{V} , $\vec{J}_{стоп}$ — вектора скорости движения среды и сторонней плотности тока; $\vec{\nabla}$ — дифференциальный набла-оператор, ω — угловая частота изменения магнитного поля. При решении этого общего уравнения была выбрана роторная система пространственных координат как наиболее удобная для данного случая. При этом ро-

тор остается условно неподвижным, и, если принять допущение, что на статоре нет электропроводных сред, в которых могли бы индуцироваться вихревые токи, его тоже можно считать условно неподвижным. В этом случае частота токов в роторе равна частоте скольжения. Тогда в основном уравнении необходимо принять условия $\omega = \omega_1 s$ и $\omega_R = V_{x,y} = 0$. Уравнение окончательно записывается в следующем виде

$$\Delta \vec{A} - j\omega_1 s \mu \gamma \vec{A} = -\mu \vec{J}_{стоп}$$

Оценка уровня магнитной вибрации производилась на основе анализа распределения нормальной и тангенциальной составляющих магнитной индукции в середине воздушного зазора.

На Рис. 2 и 3 представлено распределение магнитной индукции в поперечном сечении в номинальном режиме при частоте питания 60 Гц и 120 Гц соответственно.

Наибольшее значение магнитная индукция имеет в зоне зубцов статора и ротора, а также в области вентиляционных каналов, где самые узкие участки ярма статора. В коронках зубцов ротора значения индукции достигают 3,12 Тл. При таком уровне насыщения магнитная проницаемость этих участков магнитопровода резко

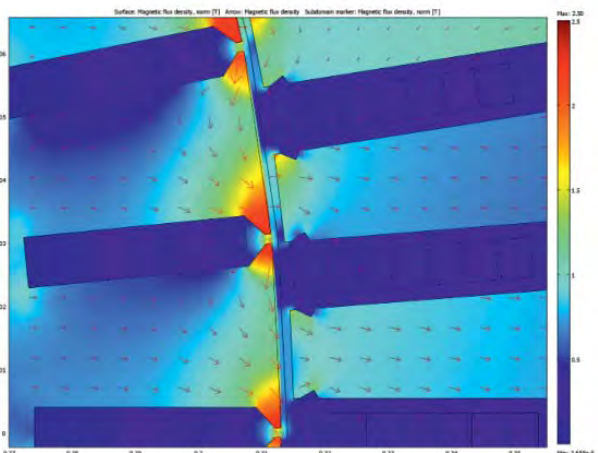
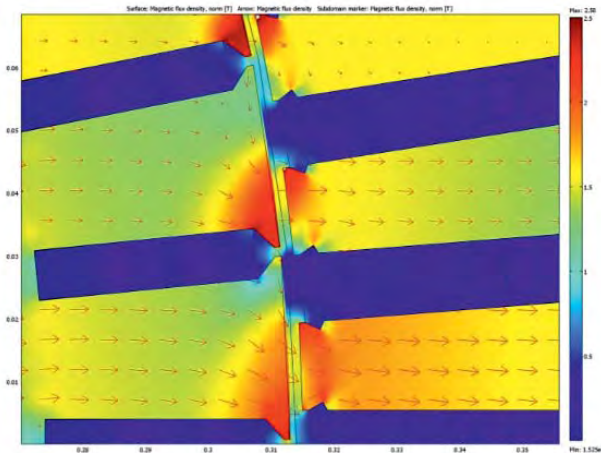


Рис. 4. Сравнение распределения магнитной индукции на участках зубцово-пазовой зоны в номинальном режиме при частоте питания 60 Гц (слева) и 120 Гц (справа)

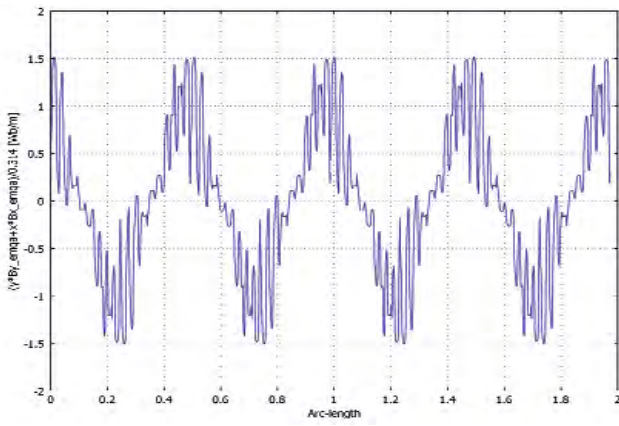


Рис. 5. Распределение нормальной составляющей величины магнитной индукции вдоль средней линии воздушного промежутка

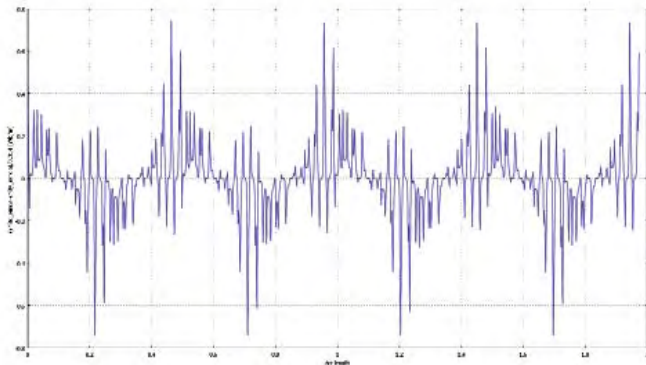


Рис. 6. Распределение тангенциальной составляющей величины магнитной индукции вдоль средней линии воздушного промежутка

уменьшается и стремится к магнитной проницаемости воздуха.

При детальном рассмотрении участков зубцо-пазовой зоны (Рис. 4) на частоте питания 60 Гц (слева) и 120 Гц (справа) видно, что распределение магнитной индукции неравномерно и зависит от взаимного положения пазов ротора и статора. Эта неравномерность искажает синусоидальность распределения магнитной индукции по длине воздушного зазора, что и ведёт к появлению высших гармоник и магнитной вибрации в двигателе.

На Рис. 5 показано распределение величины нормальной составляющей магнитной индукции, а на Рис. 6 – тангенциальной составляющей. Как уже отмечалось, измерение проводилось вдоль средней линии воздушного зазора по всей его длине.

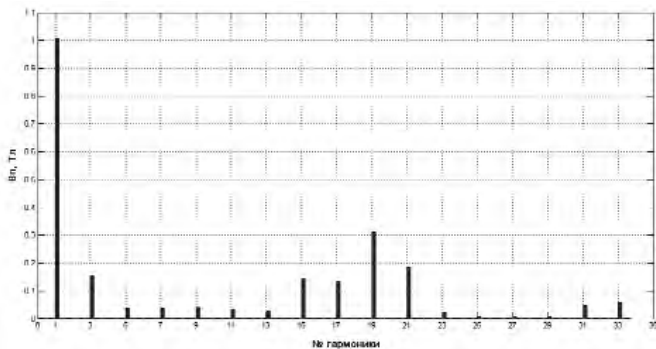


Рис. 7. Амплитуды гармоник нормальной составляющей магнитной индукции вдоль средней линии воздушного зазора

Индукция хоть и имеет периодический характер, но на её распределение влияют высшие гармоники, в частности зубцовые. Максимальные значения индукции соответствуют тем участкам линии, которые находятся под зубцами статора, а минимальные – под пазами. Существенный уровень пульсаций индукции в воздушном зазоре влечет за собой дополнительные потери в двигателе от высших гармоник, а также несинусоидальное распределение ЭДС.

Для анализа гармонического состава распределения индукции в зазоре был проведен **спектральный анализ**. На Рис. 7 представлены результаты спектрального анализа для нормальной составляющей индукции, где по оси ординат отложена амплитуда соответствующей гармоники в Тл, а по оси абсцисс – номер гармоники.

На Рис. 8 представлен фрагмент спектра (до 35-й гармоники) для тангенциальной составляющей магнитной индукции.

Из графиков видно, что значения гармоник входящих в спектр тангенциальной составляющей индукции на порядок меньше, чем значение гармоник, входящих в спектр нормальной составляющей индукции. При этом характер спектров практически совпадает.

Наиболее выраженные гармоники спектра нормальной составляющей индукции имеют следующие величины: 1 – 1,0 Тл; 3 – 0,16 Тл; 15 – 0,15 Тл; 17 – 0,135 Тл; 19 – 0,31 Тл; 21 – 0,194 Тл. Из них наибольшее влияние оказывают гармоники № 1 и № 19. При этом 1-я гармоника – это основная гармоника, благодаря которой создается вращающий момент. 19-я гармоника, имея величину в 31 % от первой гармоники, создает значительные потери от вихревых токов в магнитопроводе машины, повышенное вытеснение тока и увеличение электрических потерь, а также пульсации вращающего момента.

Известным способом улучшения гармонического состава кривой распределения индукции является закрытие пазов ротора. Кроме того, широко известно, что и применение магнитных клинь-

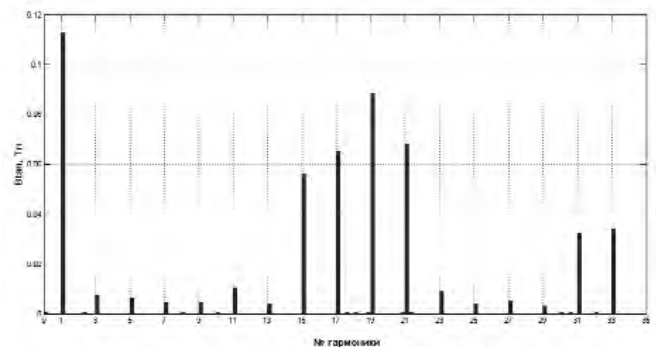


Рис. 8. Амплитуды гармоник тангенциальной составляющей магнитной индукции вдоль средней линии воздушного зазора

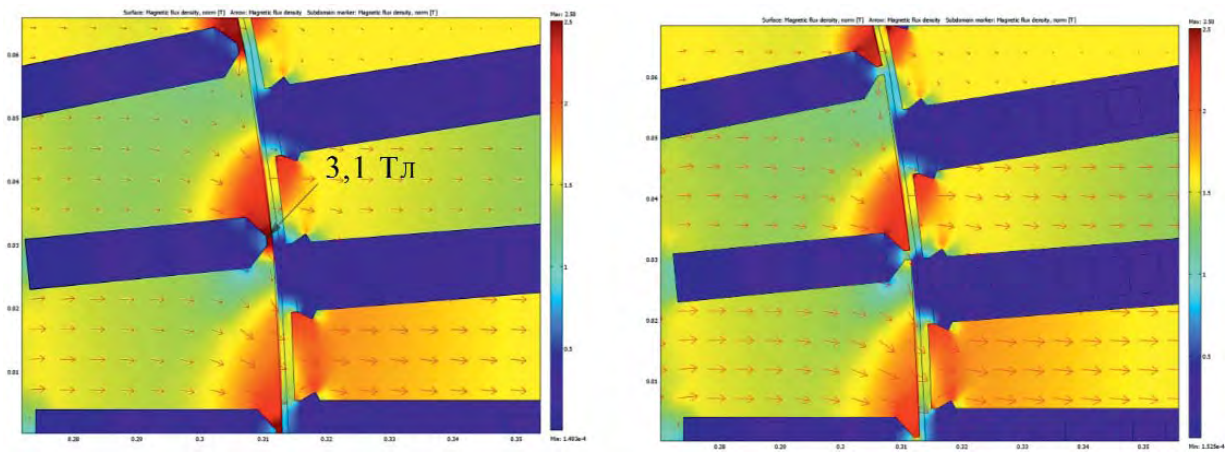


Рис. 9. Сравнение распределения магнитной индукции в зубцово-пазовой зоне в номинальном режиме при частоте питания 60Гц при закрытых (слева) и открытых (справа) пазах ротора

ев в обмотке статора также способствует снижению величины высших гармоник в спектре индукции в воздушном зазоре и, как следствие, снижению шума и вибрации [2–4].

Проанализировано влияние и оценена эффективность обоих перечисленных мер по снижению высших гармоник в спектре индукции воздушного зазора.

На Рис. 9 показано сравнение распределения магнитной индукции в зубцово-пазовой зоне в номинальном режиме при частоте питания 60 Гц при закрытых и открытых пазах ротора. Красными стрелочками показано направление движения магнитного потока.

Установлено, что изменение формы паза не сильно повлияло на распределение магнитной индукции, однако в области перекрытия паза ротора появились зоны с индукцией 3,1 Тл, что равноценно наличию открытия паза ротора.

В качестве магнитных клиньев были приняты клинья марки МКП-6 у которых величина относительной магнитной проницаемости равна 10. На Рис. 10 представлен паз исследуемого асинхронного двигателя СТА1200А с магнитным клином, аналогичный конструкции [4].

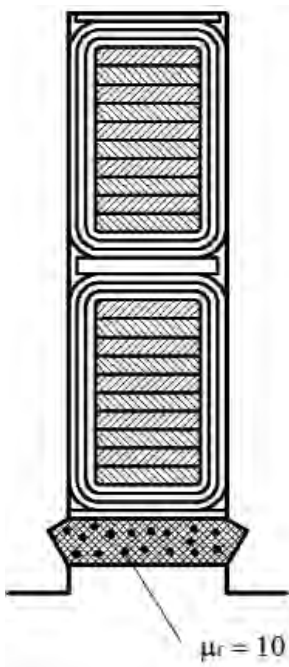


Рис. 10. Паз статора двигателя СТА1200А с магнитным клином типа МКП-6

На Рис. 12 показано сравнение распределения магнитной индукции в зубцово-пазовой зоне в номинальном режиме

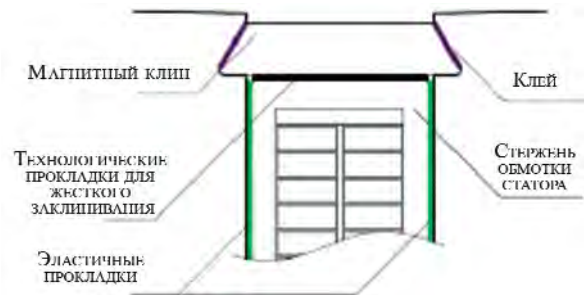


Рис. 11. Паз статора

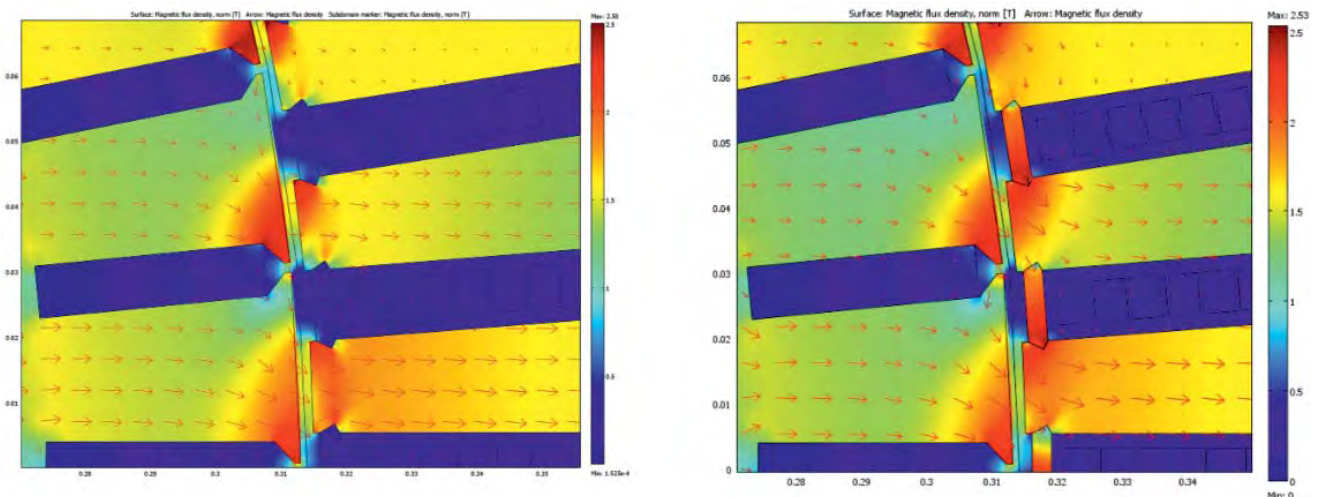


Рис. 12. Сравнение распределения магнитной индукции в зубцово-пазовой зоне в номинальном режиме при частоте питания 60Гц при обычных (слева) и магнитных (справа) клиньях обмотки статора

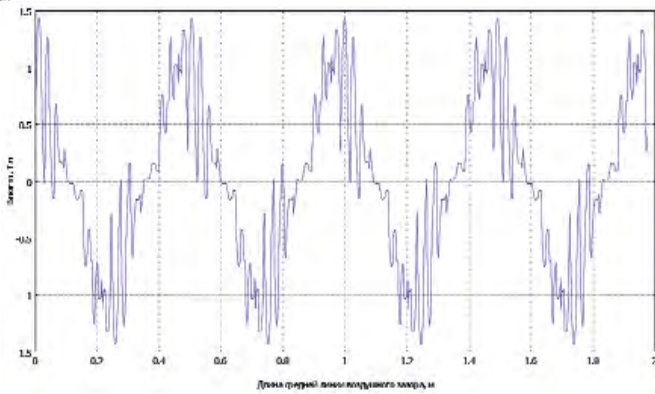


Рис. 13. Распределение нормальной составляющей величины магнитной индукции вдоль средней линии воздушного промежутка (вариант с магнитными клиньями)

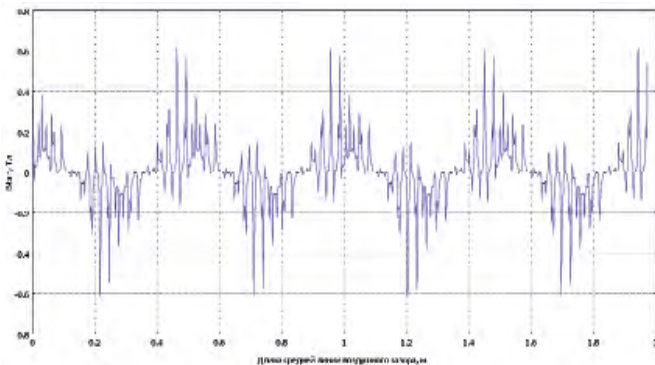


Рис. 14. Распределение тангенциальной составляющей величины магнитной индукции вдоль средней линии воздушного промежутка (вариант с магнитными клиньями)

при частоте питания 60 Гц для исходного варианта (с текстолитовыми клиньями) и варианта с магнитными клиньями.

Как видно на рисунке справа магнитные клинья оказались достаточно сильно насыщены. На отдельных участках магнитного клина индукция достигала 2,53 Тл.

Далее был проведен спектральный анализ распределения нормальной и тангенциальной составляющих магнитной индукции вдоль середины воздушного зазора для обеих вариантов конструкции. На Рис. 13–16 приведены соответствующие распределения для варианта с магнитными клиньями.

Качественно картина спектра не изменилась, однако величины наиболее заметных гармоник

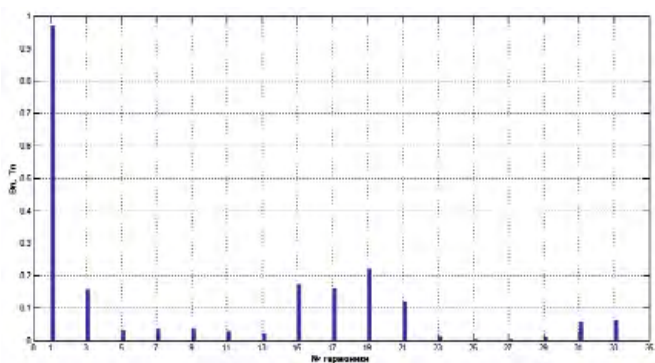


Рис. 15. Амплитуды гармоник нормальной составляющей магнитной индукции вдоль средней линии воздушного зазора (вариант с магнитными клиньями)

несколько изменились. В таблице сведены величины наиболее выраженных гармоник для исходного варианта конструкции зубцово-пазовой зоны и двух вариантов её изменения.

Из приведенных данных следует, что для модельного асинхронного двигателя закрытие пазов ротора не только не приводит к улучшению гармонического состава кривой распределения магнитной индукции в зазоре, но даже ухудшает её.

В случае же использования *магнитных клиньев*, то, несмотря на снижение 1-й гармоники на всё те же 3 %, достаточно существенно снизились 19-я и 21-я гармоники (на 29 % и 35 % соответственно). При этом величина 3-й гармоники не изменилась, а 15-я и 17-я хоть и возросли на 17 %, но их абсолютные величины значительно меньше наиболее заметной 19-й высшей гармоники. Это обстоятельство свидетельствует о том, что магнитные клинья действительно могут оказать положительное влияние на виброакустические показатели машины.

В [4] описан опыт приобретенный при проектировании, сборке и эксплуатации магнитных клиньев пазов на двух относительно больших гидрогенераторах. Материал для магнитных клиньев взят в соответствии с рекомендациями хорошо известных Европейских компаний. Клиновья композиция состоит из стекловолкна (7,8 %), железного порошка (74,9 %), эпоксидного компаунда (17,3 %). В дальнейшем, для получения большего эффекта композиция и ее отдельные составляющие подлежат оптимизации.

Краткая характеристика двух исследованных гидрогенераторов вертикального типа: мощность 33 МВА, напряжение статора 10,5 кВ, частота 50 Гц, количество пазов статора 264, диаметр расточки статора 5,67 м, количество полюсов ротора 32, опыт коммерческой эксплуатации более 5 лет, Коэффициент мощности $\cos \varphi = 0,8$, средняя магнитная проницаемость материала магнитных клиньев $\mu_r = 2,8$. Детализировка паза статора исследованного гидрогенератора [4] приведена на Рис. 11.

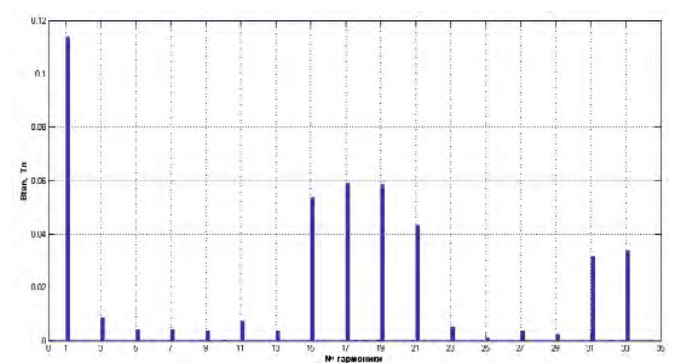


Рис. 16. Амплитуды гармоник тангенциальной составляющей магнитной индукции вдоль средней линии воздушного зазора (вариант с магнитными клиньями)



Величина намагнічуючого току в обмотке возбуждения, который необходим для создания магнитного потока в воздушном зазоре, ниже, чем с применением немагнитных клиньев. Результаты, полученные на стадии проектирования и результаты тестирования генератора с немагнитными клиньями и того же генератора с применением магнитных клиньев показывают увеличение энергоэффективности генератора, Табл. 2. При установке описанных магнитных клиньев, поверхностные потери в роторе генератора были сокращены на 20%, в то время как потери в обмотке возбуждения были сокращены на 8 %, в связи с уменьшением воздушного зазора и величины тока намагничивания. Кроме того, полученные аналитические расчеты и измерения магнитного клина показывают влияние на значения индуктивных сопротивлений в генераторе. За счет уменьшения тока возбуждения на холостом ходу, синхронное реактивное сопротивление по продольной и поперечной оси увеличится на 5 % в случае применения магнитных клиньев. Если принимается во внимание сопротивление рассеивания, то вообще увеличение синхронного реактивного сопротивления составляет около 8%.

В ходе дальнейших исследований и применения магнитных пазовых клиньев в крупных гидрогенераторах, важно решить вопросы, связанные с их опрессовкой в целях обеспечения надежной работы, выбора оптимального значения магнитной проницаемости для расчета влияния магнитных клиньев на параметры генератора.

Выводы и рекомендации.

1. Целесообразность применения магнитных клиньев зависит в первую очередь от объектов применения и требований, которые предъявляются к электрической машине или к узлу, содержащему эту машину.

2. Магнитные клинья в крупных асинхронных машинах целесообразнее применять для снижения магнитных вибраций и улучшения виброакустических свойств машины. Использование же этих клиньев для улучшения энергетических показателей мощных асинхронных двигателей, как показали исследования не дает положительных результатов и требует дальнейших обоснований численными методами и методами физического моделирования. Напротив, магнитные клинья вызывают некоторое снижение КПД и cos φ, а также

Таблица 1

№ гармоники	Значение, Тл		
	Исходный вариант	Закрытые пазы ротора	Магнитные клинья
1	1,0	0,97	0,97
3	0,156	0,162	0,157
15	0,147	0,153	0,172
17	0,135	0,14	0,158
19	0,31	0,305	0,22
21	0,184	0,19	0,12

повышенный нагрев обмотки статора.

3. Способ закрытия пазов на роторе в мощных тяговых асинхронных двигателях типа СТА1200А не является приемлемым, поскольку ведет к ухудшению практически всех ключевых характеристик машины.

4. Проанализированы результаты аналитических расчетов и результаты полученные путем измерения влияния магнитных клиньев на параметры и свойства синхронных вертикальных гидрогенераторов мощностью 34 МВА.

5. Приведена подробная информация о фиксации магнитных клиньев в пазах гидрогенератора, а также представлены данные, собранные более, чем за пять лет коммерческой эксплуатации клиньев на гидрогенераторах.

6. Поверхностные потери ротора исследованного гидрогенератора мощностью 34 МВА были сокращены на 20%, ток возбуждения – на 3,8% и потери в цепи возбуждения – на 8%. Рассчитано и измерено влияние магнитных клиньев на увеличение переходного, сверхпереходного и синхронного реактивного сопротивления. Полное увеличение синхронных реактансов гидрогенератора 8%. Проницаемость магнитных клиньев существенно влияет на поверхностные потери ротора и сопротивление рассеивания.

Таблица 2. Типичные свойства материалов для магнитных клиньев.

Свойства	Нормы	Единицы	Исходные значения	Тест при 200 °С		
				500	1000	1500
Толщина	-	мм	6,01	5,98	5,95	5,92
Плотность	ISO 1183	г/см ³	3,508	3,492	3,485	3,478
Усилие (при 23 °С)	ISO 178	МПа	171	170	162	148
Электрическое сопротивление	IEC 60167	ом · см	5,7 · 10 ⁶	7,9 · 10 ⁶	8,2 · 10 ⁶	9,4 · 10 ⁶
Магнитная проницаемость	Internal	1 Т (μ _r)	1,65	1,52	1,5	1,59

Таблица 3. Результаты расчетов и измерений в режиме холостого хода

Потери	Расчетные значения (кВт)			Измеренные значения (кВт)		
	Обычные клинья	Магнитные клинья	Разница	Обычные клинья	Магнитные клинья	Разница
Холостой ход	121,7	106,4	15,3	124,9*	107*	17,9*
Обмотка возбуждения	107,8	102,3	5,5	105,7	97,45	8,25

*Измерения проведены при некоторых различиях температуры сердечника статора



ЛИТЕРАТУРА

1. Васьковський Ю.Н., Гайденко Ю.А., Цывинський С.С. Определение интегральных характеристик электрических машин методами теории электромагнитного поля // *Електротехніка і електромеханіка*. — 2006. — № 1. — С. 28–32.
2. Троицкий В.А., Ролик И.И., Яковлев А.И. Магнитодиагностика в силовой электротехнике // *Техника*. — К.: — 1983. — 207 с.
3. Поташич С.І., Васьковський Ю.М., Федоренко Г.М. Підвищення надійності, рівня безпеки та ефективності

функціонування демпферних систем потужних гідрогенераторів // *Гідроенергетика України*. — 2009. — № 4. — С. 28–34.

4. Milojkovic Z., Van D., Petrinic M., Studir J., Polak J. Application of magnetic wedges for stator slots of hydrogenerators // 2010 CIGRE SESSION, SCA1, A1-101, Croatia

5. Васьковський Ю.Н., Гайденко Ю.А. Применение полевого анализа для усовершенствования конструкции тяговых асинхронных двигателей // *Електромашинобудування та електрообладнання*. — 2006. — Вип.67. — С. 88–94.

© Чумак В.В., Федоренко Г.М., Гайденко Ю.А., 2010



УДК 621.313.322

ЛЕВИЦЬКИЙ А.С., канд. техн. наук,
Ін-т електродинаміки НАН України, м. Київ

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ КОНТРОЛЮ ТА ДІАГНОСТИКИ ПОТУЖНИХ ГІДРОГЕНЕРАТОРІВ ЗА РАХУНОК ЗАСТОСУВАННЯ ЄМНІСНИХ ВИМІРЮВАЧІВ ПАРАМЕТРІВ МЕХАНІЧНИХ ДЕФЕКТІВ

Обґрунтовано переваги ємнісних сенсорів при застосуванні їх для контролю та діагностики потужних гідрогенераторів. Показано, що сенсори даного типу є перспективними пристроями, які широко застосовуються провідними світовими компаніями (зокрема VibrosytM, Канада). Наведено матеріали про розробки таких сенсорів в Інституті електродинаміки Національної академії наук України.

Своєчасне виявлення дефектів у процесі роботи гідрогенератора дозволяє значно підвищити надійність його роботи, знизити час простоїв і зменшити витрати, пов'язані з ремонтом. За високої ефективності контролю стає можливим перехід від планових ремонтів до ремонтів згідно фактичного стану генератора, що все частіше застосовується за кордоном. Потрібно враховувати, що задача вибору оптимального комплексу параметрів для контролю стану машини під час роботи досить складна. З одного боку, необхідно виявити якомога більшу кількість імовірних дефектів, а з іншого боку — вибрати найбільш ефективні методи контролю з багатьох, що застосовуються, керуючись економічно доцільними витратами.

Мета даної роботи — привернути увагу зацікавлених організацій і підприємств до ємнісного методу вимірювання параметрів механічних дефектів у великих електричних машинах, який є одним із найбільш перспективних на сьогоднішній день.

Як відомо, особливе місце серед більшості дефектів генераторів (машин) займає контроль вібрації основних вузлів. Вимірювання вібрації і похідних від неї величин входить в усі сучасні системи контролю стану і програми обстеження. Однак контроль лише вібраційних параметрів дозволяє виявити далеко не всі можливі дефекти

різних вузлів гідрогенератора [1, 2]. У роботі [1] наводиться оцінка ефективності вимірювання параметрів вібрації для виявлення механічних дефектів, відшукування їхнього місця та прогнозування розвитку в часі (Табл. 1). Як видно з таблиці, ефективність практично ніколи не буває рівною 100 % і коливається в межах (залежно від типу дефекту) від 20 до 80 %.

Тому для одержання вищої вірогідності у виявленні механічних дефектів в сучасні універсальні системи вібраційного контролю включають спеціальні сенсори, за допомогою яких одержують додаткову інформацію про параметри дефектів.

Взагалі слід зазначити, що зазначені в Табл. 1 механічні дефекти не є єдиними, що можуть бути виявлені вібраційним контролем. Крім дефектів конструкції за допомогою вимірювання параметрів вібрації виявляються виткові замикання в обмотці ротора, несиметричність в схемі обмоток, зменшення спресованості осердя, ослаблення кріплення обмоток у пазу і лобових частинах та інші.

Однією з перших універсальних систем вібраційного контролю стану гідроагрегату з додатковими сенсорами є система V1MOS (Vibration Monitoring System), розроблена в 90-х роках минулого століття у шведському відділенні компанії