

ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ РОТОРОВ МАЛОШУМНЫХ СИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С ВОЗБУЖДЕНИЕМ ОТ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ

В.В. Магин

Рассмотрены особенности проектирования роторов малошумных синхронных двигателей с возбуждением от постоянных магнитов. Показано, что конструкция ротора оказывает существенное влияние на уровни гармонических составляющих поля в зазоре, которые приводят к пульсациям электромагнитного момента и, следовательно, к повышенным вибрациям электрической машины. Рассмотрены наиболее распространённые конструкции индукторов с постоянными магнитами, установленными на поверхности магнитного сердечника и встроенными в магнитный сердечник. Приведены зависимости высших гармонических составляющих электромагнитного момента синхронных двигателей с возбуждением от постоянных магнитов в зависимости от коэффициента полюсной дуги индуктора и определены оптимальные значения коэффициента полюсной дуги для различных конструкций индукторов и выбрана оптимальная конструкция. Даны рекомендации по снижению пульсаций момента синхронных двигателей с возбуждением от постоянных магнитов.

Ключевые слова: малошумные синхронные двигатели, пульсации момента, постоянные магниты, индуктор.

В настоящее время широкое распространение получают электрические машины с магнитоэлектрическим возбуждением от постоянных магнитов из редкоземельных материалов (РЗМ), так как они обладают хорошими удельными, энергетическими и массогабаритными характеристиками.

Уровень электромагнитных вибраций электрической машины определяется величиной вибровозмущающих сил и податливостью системы. Для снижения вибровозмущающих сил требуется снижение амплитуд гармонических составляющих магнитного поля в зазоре электрической машины [1], которые определяются конструкцией статора и ротора. В данной работе рассматриваются особенности проектирования роторов малошумных синхронных двигателей с возбуждением от постоянных магнитов (СДПМ).

При создании малошумных СДПМ, конструкция ротора должна обеспечивать минимальные уровни гармонических составляющих поля в зазоре, которые приводят к пульсациям момента и, следовательно, к повышенным вибрациям электрической машины. Поэтому при проектировании малошумных СДПМ требуется особый подход к разработке роторов с постоянными магнитами. Например, проведённые исследования показывают, что пульсации момента, составляющие 1% от основного момента, в двигателе мощностью 37 кВт и частотой вращения 3000 об/мин, создают вибрации на холостом ходу, достигающие 50 дБ.

Представленные ниже рекомендации по проектированию роторов малошумных СДПМ применя-

лись при разработке нового поколения малошумных электроприводов герметичных электронасосов [2]. В результате работы удалось достичь существенного улучшения виброшумовых характеристик насосов по сравнению с аналогичными насосами предыдущего поколения.

Рассмотрим основные типы конструкций ротора (индуктора) с постоянными магнитами:

- установленными на поверхности магнитного сердечника и имеющими радиальную намагниченность;

- встроенными в магнитный сердечник ротора.

Индуктор с магнитами в виде секторов, имеющих радиальную намагниченность, и установленных на поверхности магнитного сердечника (ИСПМП) представлен на рис. 1.

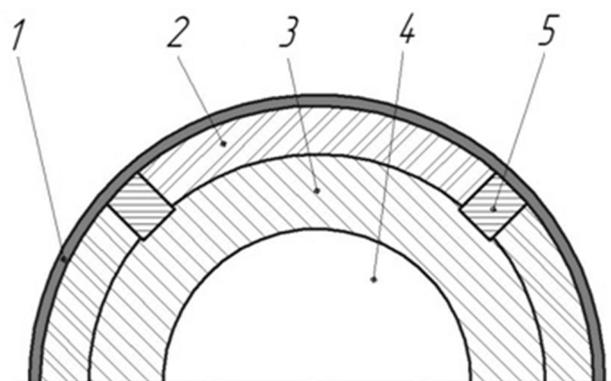


Рис. 1. Конструкция индуктора с магнитами в виде секторов, имеющих радиальную намагниченность и установленных на поверхности магнитного сердечника

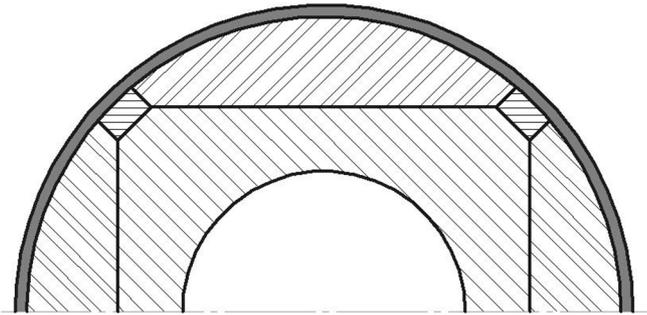


Рис. 2. Конструкция ротора с уплощенным магнитом со стороны вала

Конструкция ротора выполнена следующим образом: на немагнитный вал 4 напрессована втулка из магнитного материала 3. Если вал выполняется из магнитного материала, то необходимость во втулке 3 отпадает. Втулка 3 выполняет роль ярма и необходима для создания путей замыкания магнитного потока от постоянных магнитов смежных полюсов. Магнитный поток, замыкающейся по втулке, является практически неизменным во времени, поэтому втулка выполняется сплошной без шихтовки. Сечение втулки выбирается из расчета отсутствия насыщения при замыкании магнитного потока. В реальных конструкциях толщина втулки выбирается примерно равной высоте ярма якоря.

Магниты 2 приклеиваются к ярму специальным анаэробным клеем, удерживающим магниты на ярме, компенсируя действие на них центробежных сил. На рис. 1 представлена конструкция ротора, в которой полюса созданы из одного целого

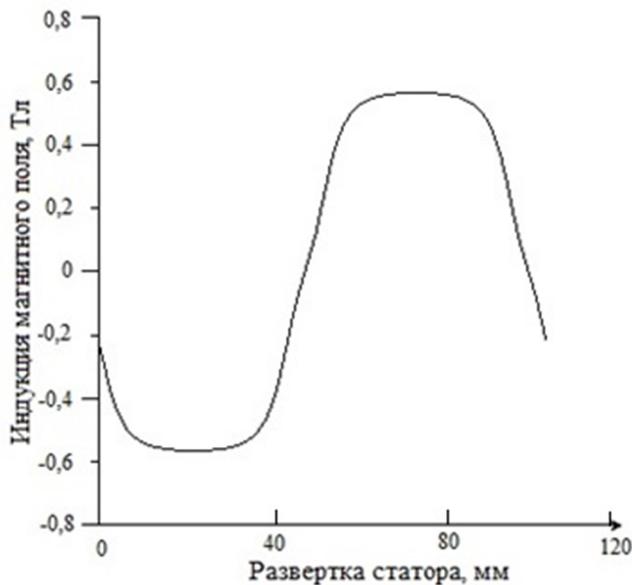


Рис. 3. Распределение индукции по расточке статора при гладком сердечнике статора

магнита. Возможно создание полюса из нескольких одинаково намагниченных магнитов. При этом результирующий поток одного полюса создается суммарным потоком этих магнитов. Полюса между собой разделяются вставками 5. Вставки выполняются из немагнитных материалов.

Поверх магнитов устанавливается гильза 1 из немагнитного материала. Гильза, во-первых, обеспечивает дополнительное крепление магнитов на роторе; во-вторых, вместе с торцевыми шайбами создаёт герметичную оболочку ротора, которая обеспечивает защиту магнитов от коррозии. Гильза выполняется из немагнитного материала для уменьшения потоков рассеяния. Толщина гильзы выбирается из условия её механической прочности.

Установка гильзы из немагнитного материала увеличивает немагнитный зазор между статором и ротором, что, в свою очередь, приводит к необходимости увеличения высоты магнитов для обеспечения рабочего потока. В некоторых случаях бывает оправданным применение биметаллической обоймы [3] в виде цилиндрического кольца, имеющего участки из магнитомягкого материала (над магнитами) и немагнитного материала (межполюсные промежутки). Биметаллическая обойма напрессовывается на полюсы магнитов с натягом, что принципиально позволяет обеспечить высокую механическую прочность и хорошие магнитные свойства индуктора. Эта конструкция индуктора впервые была предложена [3], однако, до настоящего времени не получила широкого распространения, так как является очень сложной в изготовлении. Кроме этого, высокие магнитные свойства современных постоянных магнитов из РЗМ обеспечивают требуемое значение рабочего потока возбуждения в СДПМ при больших воздушных зазорах. В двигателях средней мощности защитные бандажи обычно выполняются из немагнитного материала, например, титана или нержавеющей стали.

Кроме конструкции, представленной на рис. 1, используются и другие конструкции ротора с магнитами в виде секторов, имеющих радиальную намагниченность, установленных на поверхности магнитного сердечника. Например, с постоянными магнитами уплощенными со стороны вала или выпуклыми псевдопризматическими магнитами (ИСРМУП) (рис. 2). Магниты с уплощенным основанием являются более простыми в изготовлении, при этом для установки таких магнитов требуется дополнительная обработка поверхности ярма ротора. Такая конструкция позволяет более точно установить магниты на ярмо и тем самым уменьшить

вероятность их растрескивания при сборке и установке защитной гильзы.

Для анализа влияния конструкции индуктора на гармонические составляющие магнитного поля в зазоре проведём моделирование магнитного поля, создаваемого ротором. Рассмотрим магнитный поток в воздушном зазоре между статором и ротором. Магнитный поток СДПМ на расточке статора имеет вид, представленный на рис 3. В данном случае для наглядности полученных результатов сердечник статора принят гладким (рис. 4), без пазов. Это сделано для того, чтобы исключить влияние конструкции сердечника статора, а также реакции якоря на магнитный поток ротора.

Гармонический состав индукции магнитного поля в воздушном зазоре для двух рассмотренных конструкций индукторов при гладком сердечнике статора представлен на рис. 5. Амплитуды высших гармоник индукции в воздушном зазоре представлены в процентах от основной.

Таким образом, магнитное поле, создаваемое индуктором, содержит целый спектр высших гармонических, причём все они являются нечётными. Отсутствие чётных гармоник вызвано тем, что при расчёте использована «идеальная» модель, однако на практике всегда присутствует отклонение формы сердечников от идеальной, а также постоянные магниты не могут иметь постоянные магнитные свойства, они всегда меняются в небольших

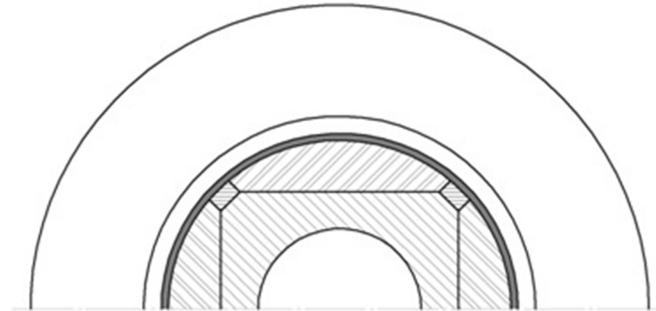


Рис. 4. Сечение СДПМ с гладким сердечником статора

пределах по периметру магнита. Всё это может породить чётные гармоники, а величина этих чётных гармоник будет зависеть от величины несимметрии магнитной системы.

Наибольшее значение имеют 3, 5, 7, 9, 11 и 13-я гармоники. Однако, как известно, в трёхфазных машинах, гармоники кратные трём в кривой МДС отсутствуют, поэтому основное влияние на работу СДПМ оказывают 5, 7, 11 и 13-я гармоники. 5 и 7-я гармоники создают пульсации момента с частотой $6f$. 11 и 13-я гармоники создают пульсации момента с частотой $12f$.

Амплитуды 5 и 7-й гармоник ниже у индуктора с уплощёнными магнитами со стороны вала. Это можно объяснить следующим: в данном случае для сохранения постоянства магнитного потока в индукторах с уплощёнными магнитами и с магнитами постоянной толщины, средние толщины



Рис. 5. Гармонические составляющие поля в зазоре СДПМ с гладким статором

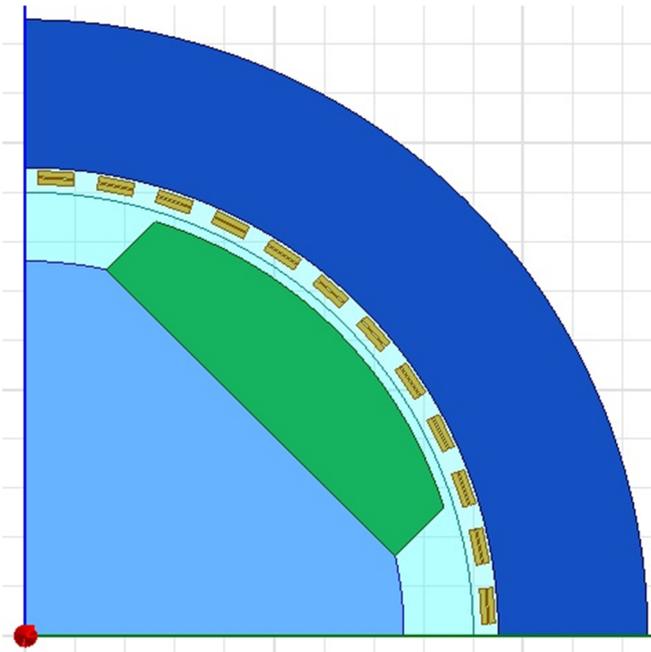


Рис. 6. Расчётная модель СДПМ с индуктором ИСРМУП

магнитов обоих индукторов должны быть одинаковыми. При этом в индукторе с уплощённым магнитом толщина магнита увеличивается от его края к середине. Это приводит к тому, что магнитный поток у краёв магнитов и, следовательно, у краёв полюсов становится более слабым и тем самым кривая магнитного поля более приближается к синусоиде. Амплитуды 11 и 13-й гармоник практически одинаковы.

Таким образом, исполнение индуктора ИСРМУП является более предпочтительным с точки зрения гармонических составляющих магнитного поля в зазоре СДПМ.

Далее рассмотрим влияние коэффициента полюсной дуги на пульсации момента. Коэффициент полюсной дуги удобно выразить в относительных единицах, который определяется как отношение ширины магнита к полюсному делению индуктора. На рис. 6 приведена расчётная модель СДПМ. Для исключения влияния зубчатости статора на пульсации момента применена беспазовая обмотка.

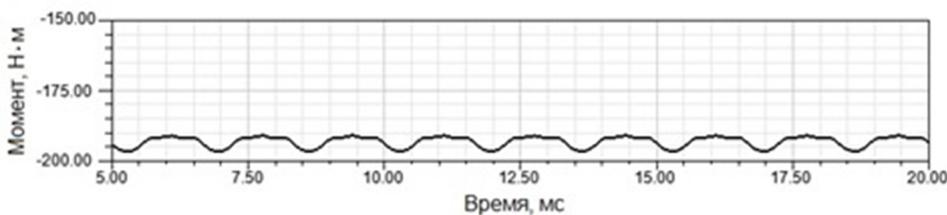


Рис. 7. Кривая момента СДПМ с коэффициентом полюсной дуги 0,7

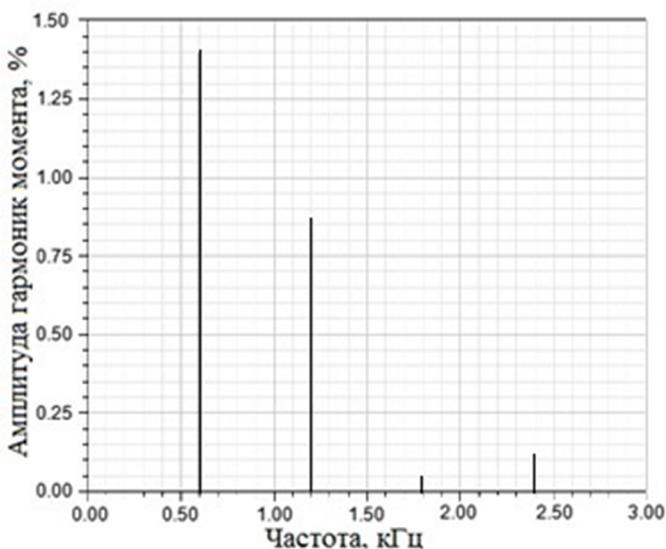


Рис. 8. Амплитуды гармоник момента

Номинальная мощность двигателя 60 кВт, частота питания 100 Гц, частота вращения ротора 3000 об/мин, число пазов на полюс и фазу 4.

Рис. 7 показывает, что в кривой момента СДПМ с коэффициентом полюсной дуги 0,7 присутствуют высшие гармоники. Амплитуды гармонических составляющих в процентах от основной представлены на рис. 8. В спектре момента наибольшее значение имеют 6 и 12-я гармоники, при этом амплитуда 6-й гармоники практически достигает 1,5% от основного момента.

На рис. 9, а представлены амплитуды 6-й гармоники момента СДПМ с индуктором ИСРМУП в зависимости от коэффициента полюсной дуги. На рис. 9, б представлены амплитуды 12-й гармоники момента СДПМ с индуктором ИСРМУП в зависимости от коэффициента полюсной дуги.

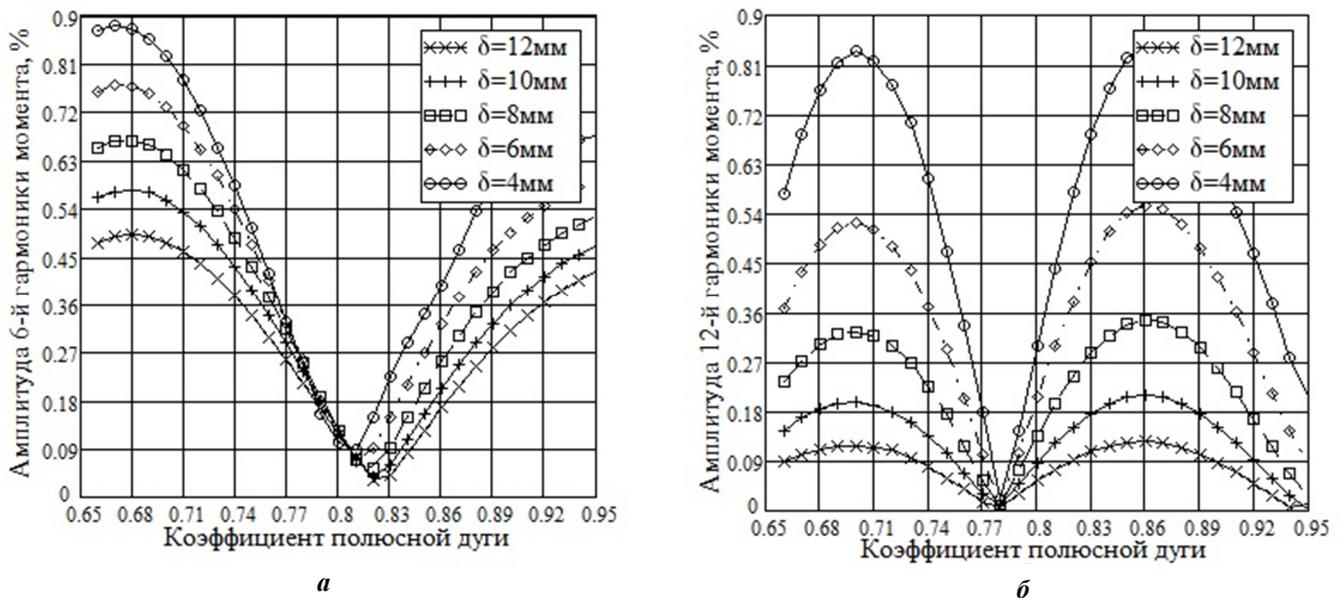
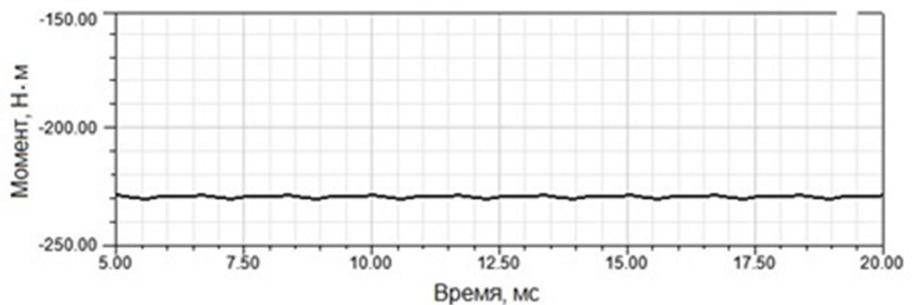


Рис. 9. Зависимость амплитуды 6-й гармоники (а) и 12-й гармоники (б) от коэффициента полюсной дуги

Рис. 10. Кривая момента СДПМ с коэффициентом полюсной дуги 0,79



Кривые представлены для пяти значений зазора между статором и магнитом δ при максимальной толщине магнита 10 мм.

Минимальные значения 6-й гармоники момента достигаются при значениях коэффициента полюсной дуги 0,81 – 0,82 для всех зазоров между статором и ротором. При увеличении воздушного зазора амплитуда 6-й гармоники момента снижается и, при величине воздушного зазора больше толщины магнита не превышает 0,5 % от номинального при всех значениях коэффициента полюсной дуги.

Минимальные значения амплитуды 12-й гармоники момента достигаются при значениях коэффициента полюсной дуги 0,78 для всех значений величины зазора между статором и ротором. При увеличении воздушного зазора амплитуда 12-й гармоники момента снижается и при толщине воздушного зазора, превышающей толщину магнита, практически не зависит от коэффициента полюсной дуги.

Проведённые исследования показали, что СДПМ средней мощности с индуктором ИСРМУП имеют минимальные пульсации момента при коэффициенте полюсной дуги 0,78 – 0,8.

Кривая момента СДПМ, расчётная модель которого представлена на рис. 6, при коэффициенте полюсной дуги 0,79 представлена на рис. 10. Как видно из рисунка, выбор коэффициента полюсной дуги 0,79 позволяет существенно снизить пульсации момента СДПМ по сравнению с СДПМ рассмотренным выше с коэффициентом полюсной дуги 0,7.

Далее рассмотрим влияние коэффициента полюсной дуги на пульсации момента для СДПМ с индуктором ИСРМП (см. рис. 1), имеющего аналогичные параметры с СДПМ, представленным на рис. 6. Расчётная модель СДПМ с индуктором ИСРМП показана на рис. 11.

На рис. 12, а приведены графики амплитуды 6-й гармоники момента СДПМ с индуктором

ИСРМП в зависимости от коэффициента полюсной дуги. На рис. 12, б представлены графики амплитуды 12-й гармоники момента СДПМ с индуктором ИСРМП в зависимости от коэффициента полюсной дуги. Кривые представлены для пяти значений зазора между статором и магнитом при толщине магнита 8 мм.

Минимальные значения 6-й гармоники момента СДПМ с индуктором ИСРМП достигаются при значениях коэффициента полюсной дуги 0,90 – 0,95 для всех значений величины зазора между статором и ротором. При этом по сравнению с индуктором ИСРМУП, минимальные значения амплитуды 6-й гармоники момента индуктора ИСРМП в несколько раз выше.

Минимальные значения 12-й гармоники момента достигаются при значениях коэффициента полюсной дуги 0,76 и 0,91 при различных значениях величины зазора между статором и ротором. При увеличении воздушного зазора амплитуда 12-й гармоники момента снижается и при величине воздушного зазора, превышающей толщину магнита, практически не зависит от коэффициента полюсной дуги. Проведённые исследования показали, что СДПМ средней мощности с индуктором ИСРМП имеют минимальные пульсации момента при коэффициенте полюсной дуги 0,9 – 0,92.

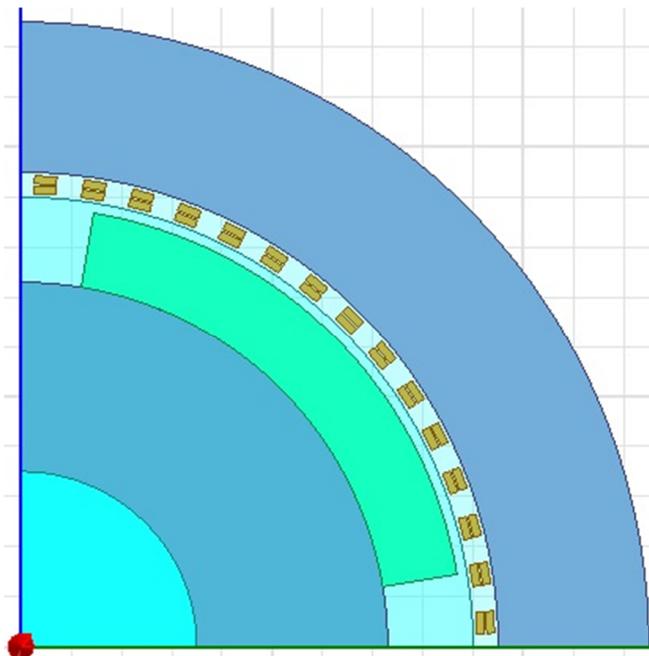
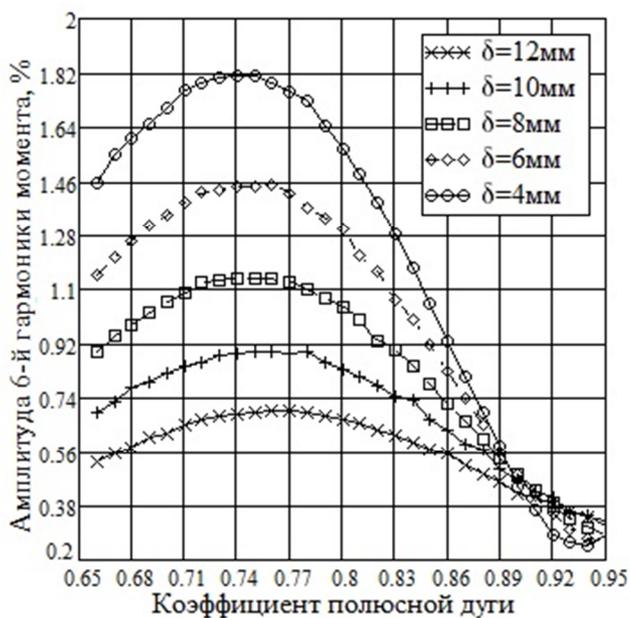
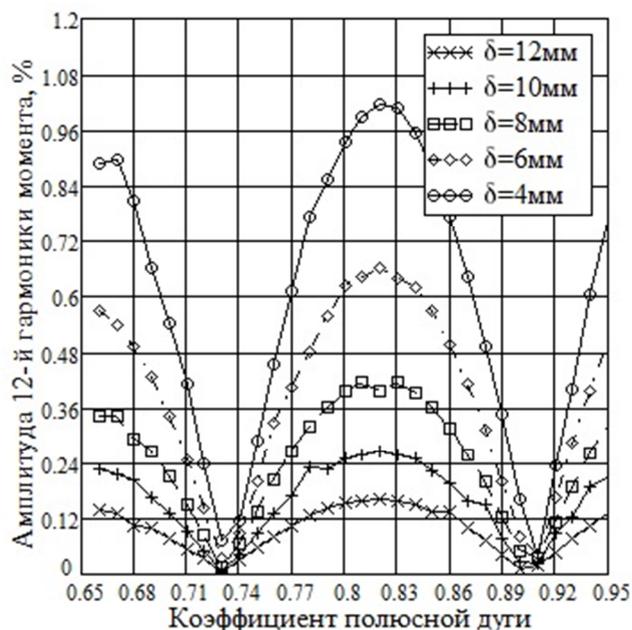


Рис. 11. Расчётная модель СДПМ с индуктором ИСРМП



а



б

Рис. 12. Зависимость амплитуды 6-й гармоники (а) и 12-й гармоники (б) от коэффициента полюсной дуги

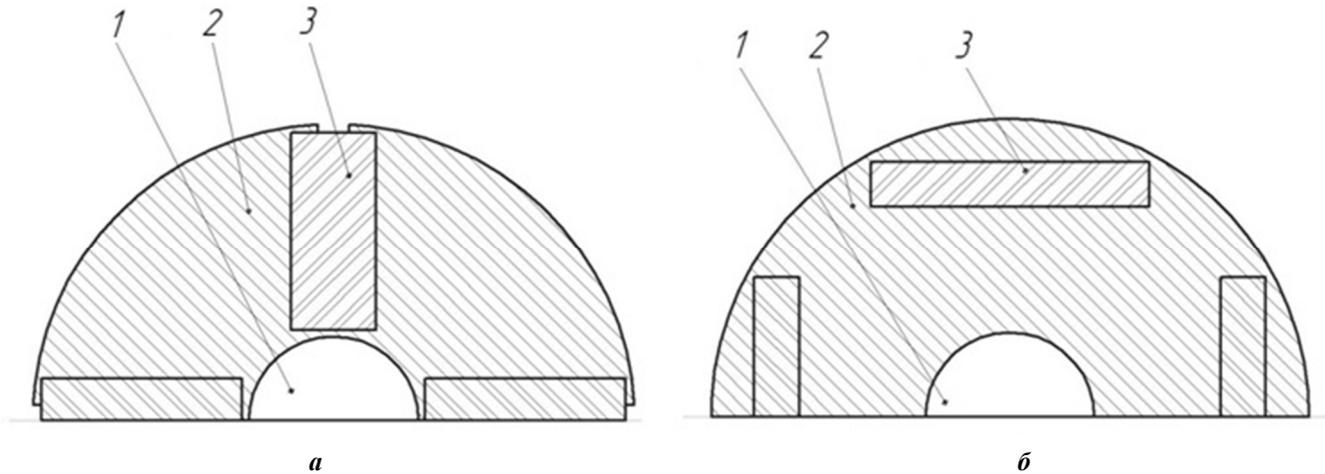


Рис. 13. Индукторы: *а* – с тангенциальным встроенным магнитом; *б* – с радиальным встроенным магнитом

Индукторы с постоянными магнитами, встроенными в магнитный сердечник ротора, могут иметь разнообразные конструкции. Далее рассмотрим две конструкции индуктора с встроенными магнитами с радиальным расположением магнита и тангенциальным расположением магнита.

Эскиз индуктора с тангенциальным встроенным магнитом (ИТВМ) представлен на рис. 13, *а*; с радиальным встроенным магнитом (ИРВМ) на рис. 13, *б*.

Конструкция индуктора с встроенными магнитами выполнена следующим образом: на немагнитный вал 1, напрессован сердечник 2 из сплошного или шихтованного магнитного материала, который выполняет роль ярма, а также полюсных наконечников. В сердечник с торцов устанавливают постоянные магниты 3. В индукторе ИТВМ магнит намагничен тангенциально; в индукторе ИРВМ – радиально.

На рис. 13 представлены конструкции ротора, в которых полюса выполнены из одного целого магнита. Возможно создание полюса из нескольких магнитов, расположенных под разными углами. При этом результирующий поток одного полюса создаётся суммарным потоком этих магнитов.

Далее рассмотрим влияние коэффициента полюсной дуги на пульсации момента для СДПМ с индуктором ИТВМ (рис. 14).

На рис. 15, *а* показаны графики зависимости амплитуды 6-й гармоники момента от коэффициента полюсной дуги, а на рис. 15, *б* – 12-й гармоники. Кривые представлены для пяти значений зазора между статором и ротором.

Минимальные значения 6-й гармоники момента СДПМ с индуктором ИТВМ достигаются при значениях коэффициента полюсной дуги 0,6 – 0,62 при различных значениях величины зазора между

статором и ротором. Однако по сравнению с индуктором ИСРМУП, минимальные значения амплитуды 6-й гармоники момента в несколько раз выше. Минимальные значения 12-й гармоники момента достигаются при значениях коэффициента полюсной дуги 0,67 – 0,68 и 0,87 при различных значениях величины зазора между статором и ротором. При увеличении воздушного зазора амплитуда 12-й гармоники момента снижается и при величине воздушного зазора, превышающего толщину магнита, практически не зависит от коэффициента полюсной дуги.

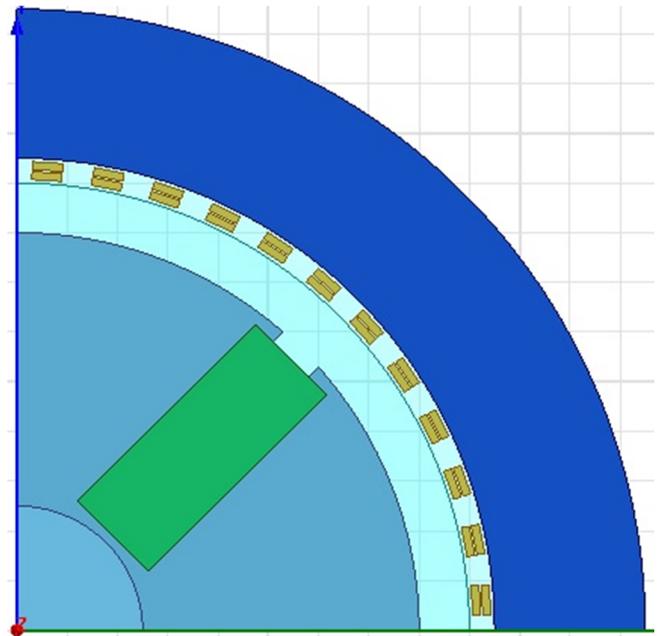


Рис. 14. Расчётная модель СДПМ с индуктором ИТВМ

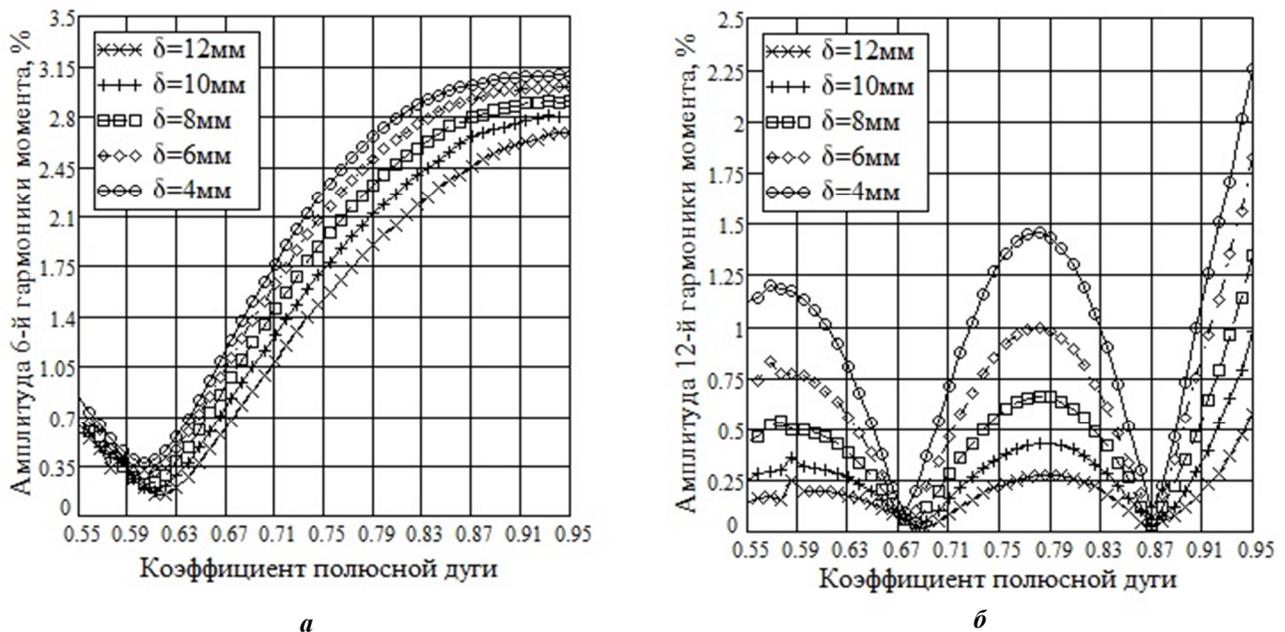


Рис. 15. Зависимость амплитуды 6-й гармоники (а) и 12-й гармоники (б) от коэффициента полюсной дуги

Проведённые исследования показали, что СДПМ средней мощности с индуктором ИТВМ имеют минимальные пульсации момента при коэффициенте полюсной дуги 0,63 – 0,65.

При проектировании СДПМ выбор индуктора ИТВМ может быть обоснован в индукторах с не-

большим полюсным делением, так как в индукторах с большим полюсным делением для обеспечения оптимального коэффициента полюсной дуги необходима большая толщина магнита. Поэтому индуктор ИТВМ может быть применён, например, при проектировании многополюсных СДПМ.

Расчётная модель СДПМ с индуктором ИРВМ представлена на рис. 16.

На рис. 17, а представлены графики амплитуды 6-й гармоники момента СДПМ с индуктором ИРВМ в зависимости от коэффициента полюсной дуги. На рис. 17, б представлены графики амплитуды 12-й гармоники момента СДПМ с индуктором ИРВМ в зависимости от коэффициента полюсной дуги. Кривые представлены для пяти значений зазора между статором и ротором.

Минимальные значения 6-й гармоники момента СДПМ с индуктором ИРВМ достигаются при значениях коэффициента полюсной дуги 0,89 – 0,93 в зависимости от зазора между статором и ротором. Минимальные значения 12-й гармоники момента достигаются при значениях коэффициента полюсной дуги 0,91 – 0,94 в зависимости от величины зазора между статором и ротором. При увеличении воздушного зазора амплитуда 12-й гармоники момента снижается и при величине воздушного зазора, превышающей толщину магнита, практически не зависит от коэффициента полюсной дуги.

Пульсации момента в СДПМ с индуктором ИРВМ зависят от величины зазора между статором

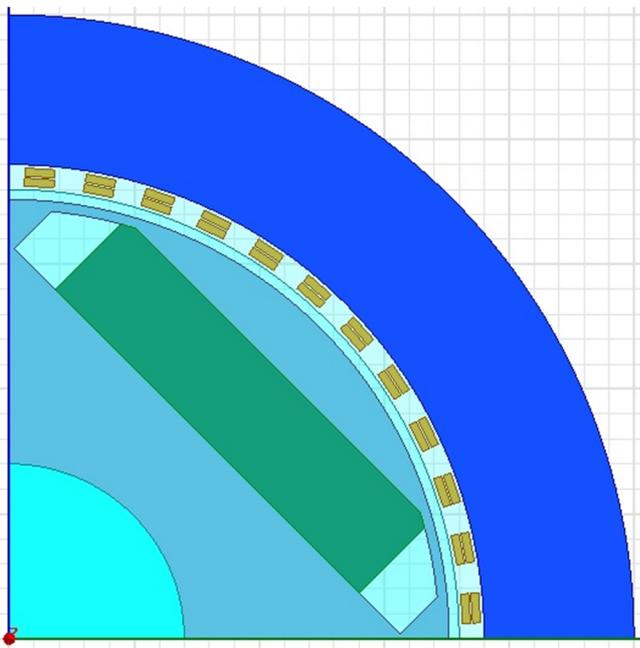


Рис. 16. Расчётная модель СДПМ с индуктором ИРВМ

и ротором и толщины мостика между магнитом и внешним диаметром ротора. Поэтому при проектировании машин с радиальным вставным магнитом для минимизации пульсаций момента можно принять коэффициент полюсной дуги 0,8 – 0,91, и произвести уточнённый расчёт кривой момента с выбранной геометрией индуктора.

Минимальные и максимальные значения амплитуд 6 и 12-й гармоник момента для всех рассмотренных типов индукторов представлены в табл. 1.

Из рассмотренных конструкций индукторов наиболее предпочтительной представляется конструкция индуктора ИСРМУП (см. рис. 2), так как

позволяет спроектировать СДПМ с минимальными пульсациями момента.

Также следует отметить, что во всех конструкциях амплитуда 12-й гармоники не зависит от длины полюсной дуги при величине зазора, превышающей толщину магнита.

Однако во всех рассмотренных конструкциях минимальные значения 6 и 12-й гармоник достигаются при разных значениях коэффициента полюсной дуги. Поэтому указанные рекомендации по выбору коэффициента полюсной дуги позволяют обеспечить невысокие значения амплитуд 6 и 12-й гармоник, но не полностью исключить их. Если

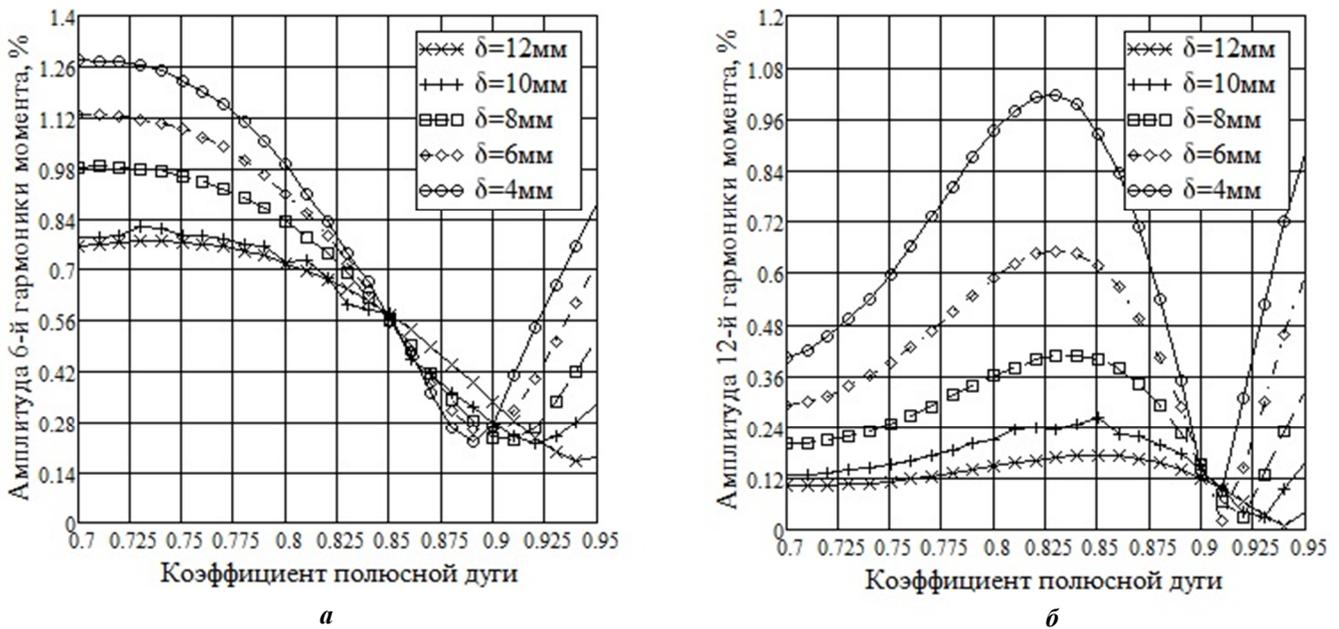


Рис. 17. Зависимость амплитуды 6-й гармоники (а) и 12-й гармоники (б) от коэффициента полюсной дуги

Максимальные и минимальные значения амплитуд 6 и 12-й гармоник момента в процентах от основной

Индуктор	Амплитуда 6-й гармоники момента (%) при зазоре (мм)			Амплитуда 12-й гармоники момента (%) при зазоре (мм)		
	12	8	4	12	8	4
ИСРМУП	0,03/0,49	0,05/0,67	0,09/0,88	0,01/0,12	0,015/0,32	0,02/0,83
ИСРМП	0,25/0,7	0,28/1,14	0,33/1,81	0,01/0,16	0,03/0,42	0,04/1,0
ИТВМ	0,14/2,7	0,23/2,9	0,37/3,1	0,02/0,57	0,05/1,34	0,1/2,25
ИРВМ	0,17/0,78	0,22/0,99	0,22/1,28	0,01/0,17	0,03/0,4	0,09/1,0

В числителе min, в знаменателе max.

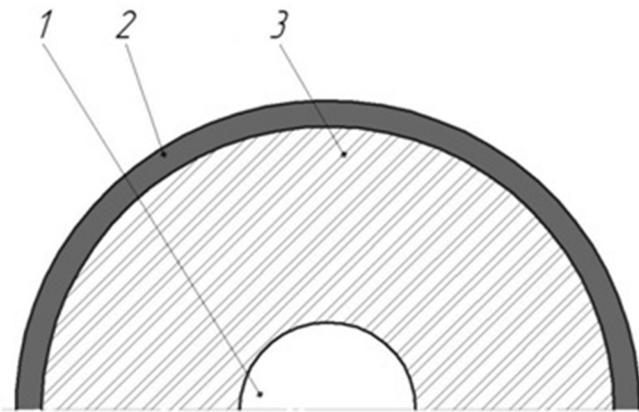


Рис. 18. Эскиз индуктора с кольцевым магнитом

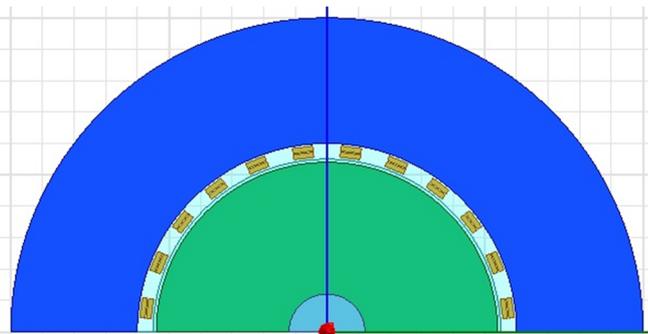


Рис. 19. Расчётная модель СДПМ с индуктором с кольцевым магнитом

требования к пульсациям момента повышенные и мероприятий по их снижению, рассмотренных выше, недостаточно, то необходимо применение специальных конструкций индукторов.

Существует несколько наиболее технологичных способов снижения пульсаций момента: применение индуктора с кольцевым магнитом, применение

индуктора с разномагнитными магнитами и применение неравномерного воздушного зазора между статором и ротором.

Эскиз индуктора с кольцевым магнитом представлен на рис. 18.

На вал 1, который может быть выполнен небольшого диаметра из немагнитного или магнитного материала, устанавливаются магниты 2 в виде колец с диаметральной намагниченностью. Для обеспечения механической прочности индуктора на магниты устанавливается бандаж 3 из немагнитного материала.

Расчётная модель СДПМ с индуктором с кольцевым магнитом показана на рис. 19.

Кривая момента СДПМ с индуктором с кольцевым магнитом приведена на рис. 20. Кривая представляет собой прямую линию, следовательно, применение индуктора с кольцевым магнитом позволяет практически полностью исключить пульсации момента при гладком сердечнике статора даже при небольших зазорах между статором и ротором.

Однако применение индуктора с кольцевым магнитом возможно только в СДПМ небольшой мощности, так как современные технологии не позволяют создать кольцевые постоянные магниты с диаметральной намагничиванием диаметром больше 80 мм.

Ещё одним способом снижения пульсаций момента является применение индуктора, в котором полюса разбиты на несколько секторных магнитов, имеющих различное направление намагничивания (ИСРНМ). Пример такой конструкции показан на рис. 21. Поток полюса индуктора создаётся пятью магнитами, которые имеют различные направления намагниченности. Направление намагничивания магнитов двух соседних полюсов приведено на рис. 22. Для получения оптимальной формы поля в зазоре угол намагничивания

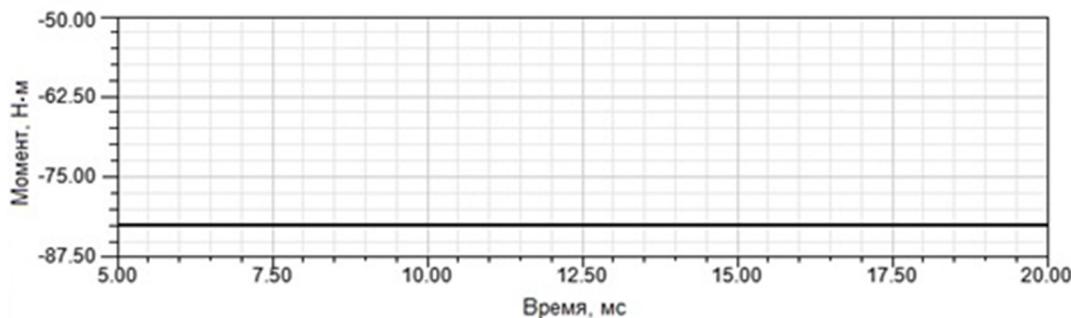


Рис. 20. Кривая момента СДПМ с индуктором с кольцевым магнитом

магнитов может быть определён по следующей формуле

$$\gamma_i = \frac{2i(\gamma_1 - \gamma_2)}{n - 1} + \gamma_2,$$

где $i=0 \dots (n - 1)/2$, n – количество магнитов на полюс, γ_1 – угол намагничивания центрального магнита, γ_2 – угол намагничивания крайнего магнита.

Проведённые исследования показали, что оптимальная форма поля, создаваемого индуктором, получается, если крайние магниты намагничены под углом $\gamma_2 = \gamma_1/p$, где p – число пар полюсов СДПМ. При этом направление намагничивания среднего магнита должно совпадать с направлением основного поля. Для того чтобы избежать провалов индукции в стыках между магнитами, необходимо обеспечить минимальные зазоры между магнитами.

Анализ пульсаций момента СДПМ с индуктором ИСРММ произведён на модели, показанной на рис. 23. Кривая момента СДПМ с индуктором ИСРММ представлена на рис. 24.

Как видно из рисунка, применение индуктора с пятью постоянными магнитами на полюс, имеющими различное направление намагничивания, позволяет получить кривую момента с незначительными пульсациями. Амплитуды высших гармоник момента не превышают 0,1% от номинального, при этом увеличение количества магнитов на полюс обеспечит дальнейшее снижение амплитуд высших гармоник момента.

Индуктор ИСРММ позволяет получить кривую момента СДПМ с незначительными пульсациями, однако такая конструкция достаточно сложна в изготовлении, так как требует постоянных магнитов, имеющих различное направление намагничивания. Это в значительной степени увеличивает трудозатраты по изготовлению такого индуктора СДПМ. Поэтому применение такой конструкции индуктора оправдано только в том случае, когда необходимо увеличить основной поток при ограниченных габаритах индуктора и получить при этом минимум гармонических составляющих в зазоре СДПМ. Например, если не удастся получить требуемые массогабаритные характеристики СДПМ с индуктором ИСРМУП и коэффициентом полюсной дуги 0,79 и требуется увеличение потока за счёт увеличения коэффициента полюсной дуги.

Другим способом снижения пульсаций момента является применение неравномерного зазора между сердечником статора и магнитом. Такой способ

улучшения формы поля в зазоре применяется в явнополюсных синхронных машинах с электромагнитным возбуждением. Эскиз индуктора с неравномерным зазором представлен на рис. 25. Конструкция аналогична конструкции индуктора ИСРМУП (см. рис. 2), однако центр окружности внешней поверхности магнита смещён относительно центра ротора, что позволяет получить увеличенный зазор δ_{max} по краям магнитов, по сравнению с зазором по середине полюса δ .

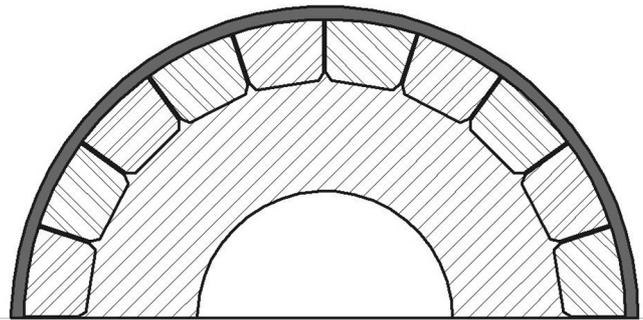


Рис. 21. Эскиз индуктора с магнитами, имеющими различное направление намагничивания



Рис. 22. Направления намагничивания магнитов двух соседних полюсов

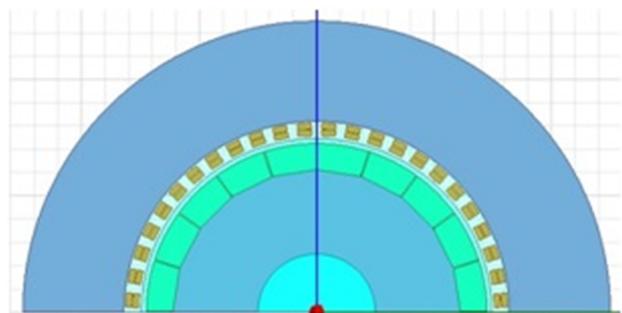


Рис. 23. Модель СДПМ с индуктором ИСРММ

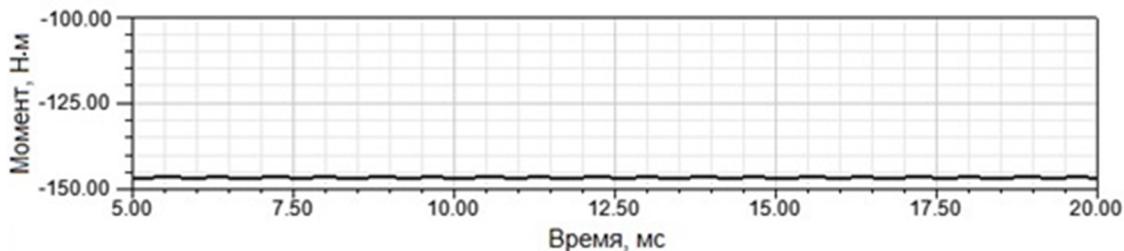


Рис. 24. Кривая момента СДПМ с индуктором ИСРНМ

Кривая момента СДПМ с неравномерным зазором и коэффициентом полюсной дуги 0,9 показана на рис. 26. Как видно из рисунка, применение СДПМ с неравномерным воздушным зазором, позволяет получить кривую момента с незначительными пульсациями. Амплитуды высших гармоник момента не превышают 0,1% от номинального, при коэффициентах полюсной дуги больше 0,8.

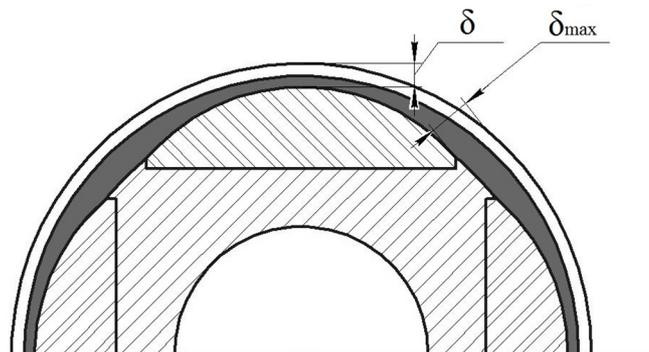


Рис. 25. Эскиз индуктора с неравномерным зазором

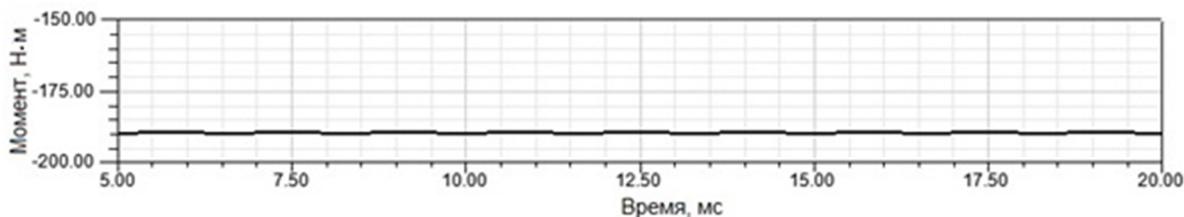


Рис. 26. Кривая момента СДПМ с индуктором с неравномерным зазором

Помимо конструкции индуктора ИСРМУП, для снижения пульсаций момента неравномерный зазор может быть применён в любой из рассмотренных конструкций индуктора. В индукторах с вставными магнитами неравномерный зазор может быть выполнен между статором и сердечником ротора, при этом постоянный магнит остается призматической формы. Однако в индукторах со вставными магнитами не удаётся получить амплитуды пульсаций момента ниже 0,15% от основного.

Проведённые исследования СДПМ с неравномерным зазором показали, что для получения оптимальных значений пульсаций момента, необходимо выбирать зазор под краями полюсов $\delta_{\max}=(1,8 - 2,0) \delta$.

Недостатком данной конструкции является сложная технология изготовления бандажа сложной формы, а при использовании бандажа в виде

цилиндрической трубы, – обеспечение жёсткости конструкции в поперечном направлении.

Выводы

Проведённые в работе исследования показали, что коэффициент полюсной дуги индуктора с секторными магнитами оказывает существенное влияние на пульсации момента СДПМ. Наименьшие пульсации момента достигаются в СДПМ с индуктором ИСРМУП при коэффициентах полюсной дуги 0,78 – 0,8. В СДПМ небольшой мощности пульсации момента, вызванные конструкцией ротора, можно исключить применением индуктора с кольцевым магнитом. В остальных СДПМ снижение пульсаций момента можно добиться применением индуктора с несколькими секторными магнитами на полюс, имеющими различное направление намагничивания, а также применением неравномерного зазора.

Литература

1. Макриденко Л. А., Сарычев А. П., Коварский М. Е., Магин В. В. Электрические машины для специальных применений / Л. А. Макриденко и др. // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – 2008. – Т. 107.
2. Коварский М. Е., Портной Ю. Т., Магин В. В., Рожков Д. В. Результаты разработки нового поколения малошумных электроприводов герметичных электронасосов / М. Е. Коварский и др. // Труды VII Международной (XVIII Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2012, 2012 г.
3. Балагуров В. А., Галтеев Ф. Ф. Электрические генераторы с постоянными магнитами / В. А. Балагуров, Ф. Ф. Галтеев. – М.: Энергоиздат, 1988.

Поступила в редакцию 17.11.2014

Вячеслав Валерьевич Магин, АО «Корпорация «ВНИИЭМ»,
начальник лаборатории,
т. (495) 366-24-01, maginv@rambler.ru.

ROTOR DESIGN SPECIAL FEATURES OF THE LOW-NOISE SYNCHRONOUS MOTORS WITH A CONSTANT EXCITATION FROM PERMANENT MAGNETS

Magin V. V

The article revises the rotor design special features for the low-noise synchronous motors with a constant excitation from permanent magnets. It is demonstrated, that the rotor design has a significant impact on the harmonic component levels in the clearance, which leads to the electromagnetic torque pulsations and, therefore, to the electrical machine elevated vibrations. The most popular permanent magnet inducers designs, mounted on the magnetic core surface and integrated into the magnetic core, are shown. It is demonstrated, how the electromagnetic torque higher harmonic components of the synchronous motors with a constant excitation from permanent magnets, depend on the values of the inducer polar arc coefficient, and the optimal values of the polar arc coefficient for various designs is determined, and the ideal design is chosen. Recommendations are given on how to reduce torque pulsations levels of the synchronous motors with a constant excitation from permanent magnets.

Key words: Low-noise synchronous motors, torque pulsations, permanent magnets, inducer.

Reference

1. Makridenko L. A., Sarychev A. P., Kovarskii M. E., Magin V. V. Electrical machines for dedicated applications / Makridenko L. A. & others // Electromechanical matters. VNIIEM studies – 2008 – Т. 107
2. Kovarskii M. E., Portnoi Iu. T., Magin V. V., Rozhkov D. V. Results of a new generation low-noise sealed electric pump drives development / Kovarskii M. E. & others // Studies of the VII International (VXIII Russian national) conference on the automatic electrical drive AED – 2012, year 2012.
3. Balagurov V. A., Galteev F. F. Electric generators with permanent magnets / Balagurov V. A., Galteev F. F., - М.: Energoizdat, 1988.

Magin Viacheslav Valeryevich, JC «VNIIEM Corporation»,
head of laboratory,
tel.: (495) 366-24-01, maginv@rambler.ru.