

О фильтрующих свойствах электромагнитной системы гистерезисных гиродвигателей в мехатронных устройствах

ГАРГАНЕЕВ А.Г., КАШЕУТОВ А.В., КАШИН Е.И.

Представлены результаты анализа фильтрующих свойств электромагнитной системы синхронно-гистерезисных гироскопических двигателей, применяемых в мехатронных устройствах систем инерциальной навигации автономных объектов. Проведен анализ формы фазного тока синхронно-гистерезисных гироскопических двигателей при питании от автономного инвертора напряжения. Показана связь применяемого материала ротора и конструктивных параметров обмотки статора с гармоническим составом противоЭДС двигателя как информационной переменной в мехатронных устройствах с использованием информативных свойств автономного инвертора напряжения. Предложена уточненная математическая модель формирования фазного тока гироскопического двигателя на коммутационных интервалах автономного инвертора напряжения. Уточнение модели проведено при анализе электромагнитных процессов в синхронно-гистерезисных двигателях на основе материалов ротора Fe-Ni-Al и Fe-Co-Cr. Даны рекомендации по применению магнитных материалов с учетом конструктивных особенностей электромагнитной системы синхронно-гистерезисных двигателей для реализации гироскопических электроприводов.

Ключевые слова: гиродвигатель, инвертор, обмотка, фильтрация, гармоники, индукция

В гироскопических системах инерциальной навигации автономных объектов в качестве элемента формирования кинетического момента гироротора широкое применение находит синхронный гистерезисный двигатель (СГД) [1, 2]. Он представляет собой двигатель, вращающий момент которого создаётся за счёт взаимодействия вращающегося поля статора с магнитным полем ротора, возникающим в результате его намагничивания полем статора при включении двигателя в сеть [3]. Преимущества СГД по сравнению с другими типами электрических машин приведены, например, в [4, 5].

В качестве источника питания для СГД часто используется автономный инвертор напряжения (АИН) с классическим управлением ключами и дополнительным блоком импульсного подмагничивания [2, 6, 7]. Такая схема АИН вполне отвечает ряду требований к гироскопическому устройству с точки зрения высокого КПД, стабильности скорости и теплового состояния СГД, электромагнитной совместимости, точности гироскопа (ГП), надежности, стоимости и т.п. Кроме того, АИН в электромеханических системах (ЭМС) обладает информативными свойствами, позволяющими фактически реализовывать законы управления электродвигателем по «бездатчиковому» принципу [2].

Впервые идея и теоретические обоснования информативных свойств инвертора в ЭМС были опубликованы в [8, 9] и развиты в работах [2, 10] в части их использования в системах электропитания с химическими источниками тока и для диагности-

ки электрических машин. Ряд работ посвящен реализации предложенного способа управления с точки зрения математической обработки кривых тока на коммутационных интервалах АИН для различных электрических машин [2, 11]. При теоретической реализуемости способа в среде имитационного моделирования Matlab Simulink [12], не учитывающей реальной картины распределения поля в электрической машине, остается открытым вопрос его практической реализации, зависящий от параметров СГД, особенностей магнитных материалов и типа обмоток статора.

Общее условие реализации информативных свойств АИН. При питании двигателя от трехфазного АИН с прямоугольно-ступенчатой формой напряжения фазные токи на коммутационных интервалах $0 \div \pi/3$; $\pi/3 \div 2\pi/3$; $2\pi/3 \div \pi$ можно представить в виде:

$$I_1(\varphi) = \frac{U_d}{3R_{\text{ЭКВ}}} \left[1 - \frac{(1+a)(2-a)}{1+a^3} e^{-k\varphi} \right] - \frac{E_r}{\sqrt{R_{\text{ЭКВ}}^2 + X_{\text{ЭКВ}}^2}} \sin(\varphi - \Theta - \alpha); \quad (1)$$

$$I_2(\varphi) = \frac{U_d}{3R_{\text{ЭКВ}}} \left[2 - \frac{(1+a)^2(2-a)}{1+a^3} e^{-k(\varphi - \pi/3)} \right] - \frac{E_r}{\sqrt{R_{\text{ЭКВ}}^2 + X_{\text{ЭКВ}}^2}} \sin(\varphi - \Theta - \alpha); \quad (2)$$

$$I_3(\varphi) = \frac{U_d}{3R_{\text{ЭКВ}}} \left[1 + \frac{(1+a)(1-2a)}{1+a^3} e^{-k(\varphi-2\pi/3)} \right] - \frac{E_r}{\sqrt{R_{\text{ЭКВ}}^2 + X_{\text{ЭКВ}}^2}} \times \sin(\varphi - \Theta - \alpha), \quad (3)$$

где $R_{\text{ЭКВ}}, Z_{\text{ЭКВ}}$ – эквивалентные активное и реактивное сопротивления фазы двигателя; $k = R_{\text{ЭКВ}} / X_{\text{ЭКВ}}$; $\alpha = \arctg(X_{\text{ЭКВ}} / R_{\text{ЭКВ}})$; E_r – ЭДС ротора; $a = e^{-\frac{R_{\text{ЭКВ}} \pi}{X_{\text{ЭКВ}}}}$; $\varphi = \omega_1 t$; ω_1 – круговая частота; φ – текущее значение фазы; U_d – постоянное напряжение на входе инвертора; Θ – фаза ЭДС ротора относительно напряжения питания [8].

Физическое и количественное содержание $R_{\text{ЭКВ}}, X_{\text{ЭКВ}}$ и E_r определяется для конкретной разновидности двигателя. При пренебрежении потерями в стали для синхронного двигателя (СД) и СГД $R_{\text{ЭКВ}} = R_1$; для асинхронного двигателя (АД) $R_{\text{ЭКВ}} = R_1 + r_2$, где R_1 – активное сопротивление обмотки статора; r_2 – приведенное к статору активное сопротивление обмотки ротора. Составляющие выражений (1)–(3) представляют собой фиктивные токи, которые протекали бы в цепи статора двигателя со стороны инвертора (I_{ei}) при отсутствии реакции со стороны ротора и со стороны ротора (I_{2Er}) от действия ЭДС вращения E_r при отсутствии напряжения питания инвертора U_d . Следует отметить, что в СД и СГД, работающих в синхронном режиме, термин «ЭДС вращения» однозначно соответствует факту вращения ротора. В случае же СГД, работающего со скольжением s , «ЭДС вращения» однозначно относится лишь к доменной структуре ротора, следующей синхронно за вращающимся полем статора и создающей такую же реакцию в обмотке статора, как и в синхронном режиме.

В АД «ЭДС вращения» однозначно связана с вращающимся синхронно с полем статора токовым слоем ротора при токе ротора $I_2 = I_r$ и сопротивлении ротора r_2 в соответствии с выражением

$$E_r = I_r \frac{r_1(1-s)}{s}. \quad (4)$$

Топологически ЭДС E_r является противоЭДС. Изложенному выше пояснению соответствует универсальная схема замещения и векторные диаграммы для АД и СГД, представленные на рис. 1. На основании выражений (1)–(3) и рис. 1 объясняется форма фазного тока I_1 электрических машин, питающихся от АИН со 180-градусным управлением, как сумма двух функций: экспонент тока I_{ei} от воздействия АИН и синусоидального тока I_{2Er} от

ЭДС вращения на коммутационных интервалах i (рис. 2).

Положение вектора ЭДС определяется углом нагрузки Θ , который для СГД интерпретирован как Θ_r , а для АД – как Ψ_2 , являющийся аналогом Θ_r . При этом положение точки перегиба кривой фазного тока на коммутационном интервале $\pi/3 \div 2\pi/3$ является углом нагрузки СГД или АД относительно значения $\pi/2$ (см. рис. 3) [2, 8].

Стабильность положения точки перегиба определяет постоянство мгновенной скорости двигателя, что важно для точного функционирования ГП. Для систем управления, реализующих этот принцип, помимо обработки кривой тока при возможном наличии помех, необходимо выполнение условия синусоидальности составляющей тока I_{2Er} от ЭДС вращения E_r , что априорно и предполагается выражениями (1)–(3).

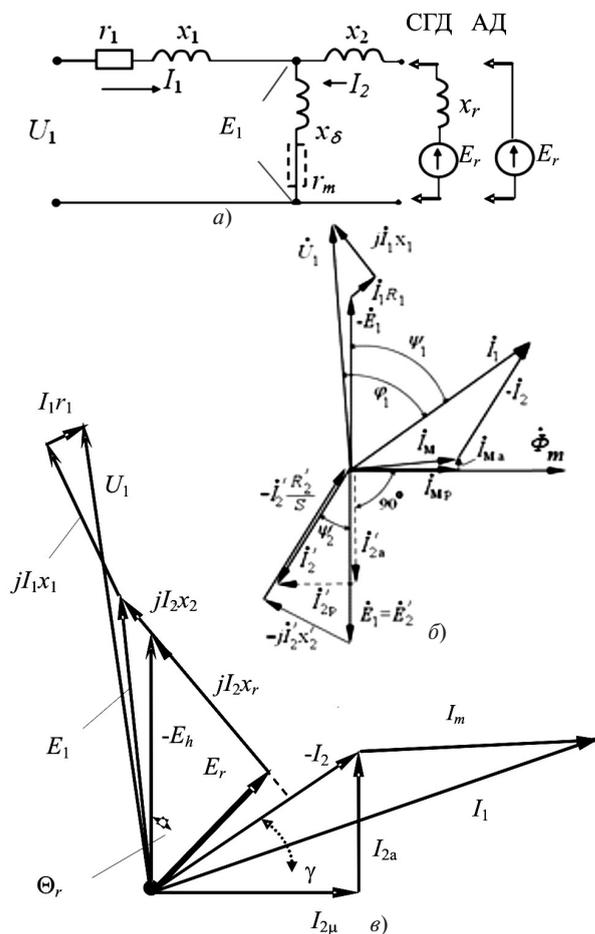


Рис. 1. Схема замещения с ЭДС ротора (а) и векторные диаграммы для АД (б) и СГД (в)

Общие замечания о форме ЭДС вращения гиродвигателя. Синусоидальность составляющей тока I_{2Er} предполагает синусоидальность ЭДС вращения E_r . При стабильном магнитном состоянии электрической машины реактивную составляющую $X_{\text{ЭКВ}}$ можно считать постоянной величиной.

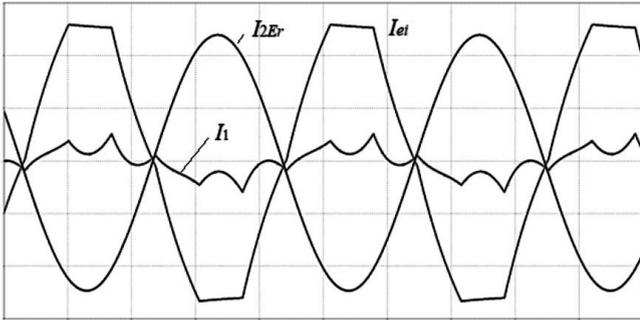


Рис. 2. Фазный ток СГД при питании от АИН и его составляющие

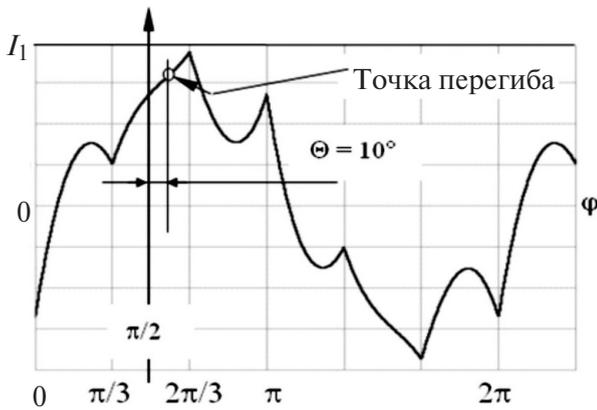


Рис. 3. Определение угла нагрузки для СД и АД по точке перегиба

В этом случае синусоидальность составляющей тока I_{2Er} можно оценить по форме ЭДС вращения. Наиболее просто оценить форму ЭДС у СГД экспериментальным путем в момент его отключения от АИН.

Форма ЭДС вращения электрической машины асинхронного или гистерезисного типа определяется формой магнитного поля ротора и параметрами обмоток. В свою очередь, форма магнитного поля ротора указанных типов машин определяется параметрами обмотки статора, а также конструктивными особенностями ротора. Для СГД, имеющего ротор, как правило, в виде кольца (цилиндра) из гистерезисного материала, взаимосвязь полей ротора и статора имеет особенность, определяемую физическими процессами перемагничивания и намагничивания материала ротора в соответствии с формой петли гистерезиса [14, 15]. Следует также отметить, что форма распределения магнитного поля в воздушном зазоре не зависит от формы питающего напряжения.

В разделах теории электрических машин, анализирующих гармонический состав МДС, индукции и магнитного потока, применяется метод ступенчатых координатных функций (СКФ) [16]. При всей наглядности и логичности анализа, использующего ряд допущений (расположение обмотки в зазоре, пренебрежение «геометрией» зубцово-

зоны и локальными насыщениями), метод СКФ не учитывает электромагнитные процессы, порождаемые ротором, в том числе при высоких частотах и импульсных воздействиях, а выражения для F , B и Φ носят общий характер. Для дальнейшего анализа формы ЭДС E_r и тока I_{2Er} СГД рассмотрим особенности его магнитного состояния в зависимости от режимов работы [14, 15].

Режимы работы СГД. Режим 1. Пусть первоначально в составе СГД присутствует предварительно размагниченный ротор, а индукция B на полюсном делении воздушного зазора распределена по синусоидальному закону (рис. 4,б). При прямом включении АИН нарастающее напряжение быстро выводит ротор на рабочую петлю гистерезиса либо по основной кривой намагничивания (рис. 4,б, кривая 1), либо по траектории петель гистерезиса, что не принципиально (рис. 4,а). При завершении разгона и непосредственно перед входом в синхронизм СГД работает со скольжением s , близким к нулю ($s < 1$ и $s \approx 0$), а элементы гистерезисного слоя ротора перемагничиваются в соответствии с максимальной рабочей петлей гистерезиса 2 (рис. 4,б). При вхождении в синхронизм перемагничивание прекращается, и петля гистерезиса 2 при $s=0$ и с максимальным гистерезисным моментом принимает статус петли «распределения». Далее ротор занимает положение в соответствии с угловой характеристикой и моментом на валу. При этом рабочие точки (для примера, точки a и b) с петли 2 переходят по частным циклам на петлю распределения 4. Если бы момент на валу СГД был больше или меньше, то петлями распределения стали бы соответственно петли 3 или 5, 6, поскольку площадь петли распределения определяет мощность на валу. Гипотетически при нулевом моменте нагрузки пет-

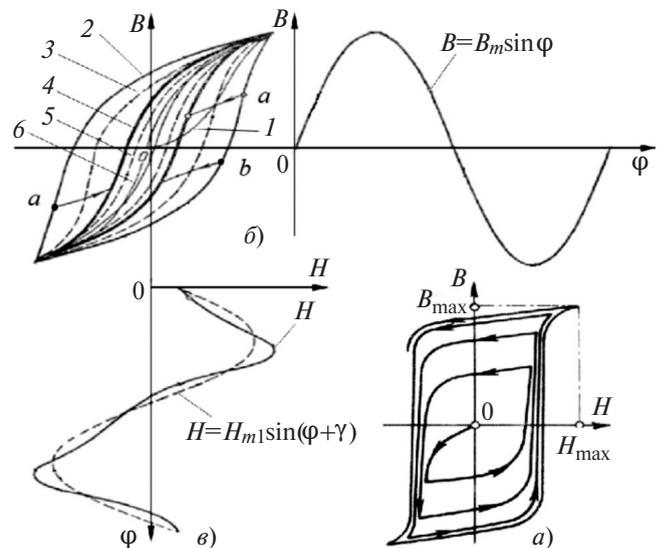


Рис. 4. Режим первоначального включения СГД без изменения напряжения

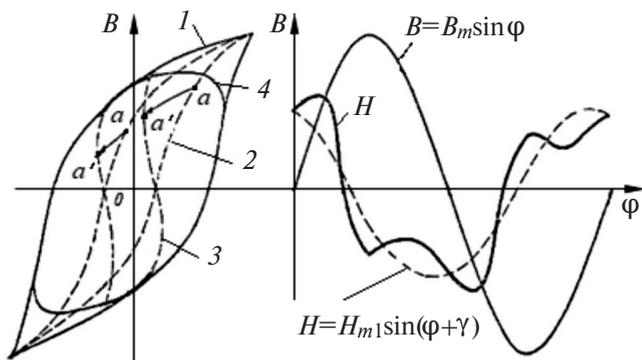


Рис. 5. Режим пуска СГД на повышенном напряжении с последующим перевозбуждением

ля распределения вырождается в безгистерезисную кривую намагничивания. При увеличении нагрузки на валу процесс перехода точек происходит в обратном порядке по частным циклам вплоть до максимальной петли, выпадения двигателя из синхронизма и перемагничивания элементов ротора.

Режим 2. Одним из режимов работы гиродвигателя является его пуск на повышенном напряжении с дальнейшим переходом на номинальное значение после входа в синхронизм. Согласно рис. 5 после разгона СГД и входа в синхронизм рабочие точки (на примере точек a), характеризующие магнитное состояние областей ротора, перемещаются с петли распределения 1 на петлю 2 в соответствии с моментом нагрузки. При снижении напряжения до номинального значения рабочие точки (на примере a, a') перемещаются на петлю 3 с площадью, равной площади петли 2. Такой режим называется режимом «первозбуждения», поскольку приобретенная на повышенном напряжении, а следовательно, магнитном потоке намагниченность ротора создаст при номинальном напряжении увеличенное значение противоЭДС. Как следствие, СГД будет работать при высоком коэффициенте мощности и КПД. Кривая 4 характеризует траекторию движения точки с максимальной напряженностью поля петли 3 при увеличении момента нагрузки

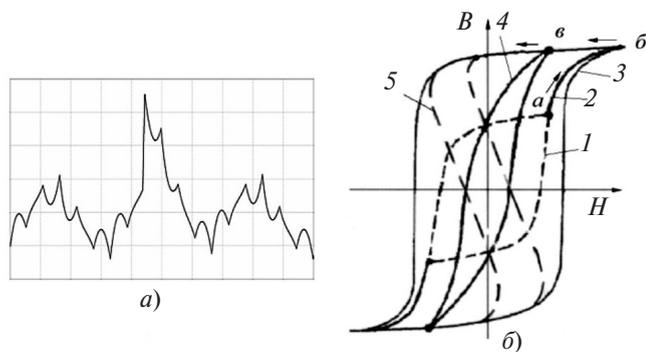


Рис. 6. Пуск СГД на номинальном напряжении с последующим импульсным подмагничиванием: a – фазный ток с импульсом подмагничивания; $б$ – изменение петли распределения

(увеличения площади петли 3) вплоть до выхода СГД из синхронизма.

Режим 3. Этот режим характеризуется пуском СГД на номинальном напряжении. После вхождения СГД в синхронизм на основное напряжение питания U накладываются импульсы повышенного напряжения, осуществляющие дополнительное намагничивание и периодическое подмагничивание материала ротора в процессе работы гироприбора (рис. 6, a). Значение импульса $U_{\text{имп}}$ характеризуется коэффициентом кратности повышения напряжения $k_U = U_{\text{имп}} / U$.

Пусть после разгона СГД и вхождения его в синхронизм магнитное состояние ротора характеризуется петлей распределения 1 (рис. 6, $б$). При создании импульсного подмагничивания рабочие точки петли 2 следуют по безгистерезисной петле 2 до максимальных значений индукции и напряженности поля, характеризующихся точкой $б$ на петле распределения 3. При прекращении импульсного воздействия снижается напряженность внешнего поля и намагниченный ротор характеризуется петлей распределения 4, площадью, равной петле распределения 1. При возрастании амплитуды импульса намагничивания ротор будет характеризоваться петлей распределения 5.

Анализ формы ЭДС вращения СГД. В рассмотренных режимах форма напряженности H поля в роторе определяется формой конкретной петли распределения. При этом «телесность» петли определяет сдвиг вектора напряженности поля относительно индукции и фактически угол нагрузки СГД. Наибольшие искажения формы напряженности наблюдаются при перевозбуждении и малом значении момента на валу (см. рис. 5), однако увеличение нагрузки на валу приводит к трансформации петли распределения (ближе к эллиптической форме), а следовательно, улучшению формы напряженности. В реальности поле в зазоре гистерезисной машины определяется не только внешним полем обмотки, но и рассмотренными выше петлями распределения. Дискретность распределения обмоток по пазам, наличие пазов, создающих переменное магнитное сопротивление потоку, а также ре-

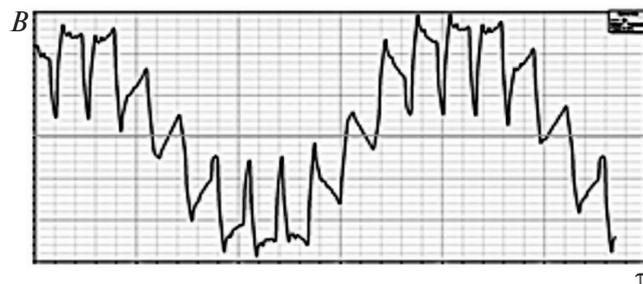


Рис. 7. Распределение индукции в воздушном зазоре СГД на полюсном делении

акция ротора, характеризующаяся рассмотренными выше петлями распределения, определяют собой сложную в спектральном смысле картину поля на полюсном делении τ СГД (рис. 7).

Экспериментальные исследования СГД. Для исследования ЭДС вращения был проведен ряд экспериментов с различными типами СГД, характеристики которых представлены в табл. 1. Каждый СГД подвергался трехкратным испытаниям с усреднением экспериментальных данных по следующим программам.

Программа 1. Разгон при значениях напряжения от номинального до двухкратного форсированного и отключение непосредственно перед входом в синхронизм с последующей фиксацией формы ЭДС вращения и анализом ее коэффициента гармоник K_r (до 41-й гармоники).

Программа 2. Разгон при значениях напряжения от номинального до двухкратного форсированного при входе в синхронизм с последующим отключением, фиксацией формы ЭДС вращения и анализом ее коэффициента гармоник.

Программа 3. Разгон на форсированном напряжении при входе в синхронизм с последующим снижением напряжения до номинального значения, отключением СГД, фиксацией формы ЭДС вращения и анализом ее коэффициента гармоник.

Программа 4. Разгон на номинальном напряжении при входе в синхронизм, изменении коэффициента кратности повышения напряжения (при плавном изменении напряжения питания АИН) $k_U = U_d / U_{ном}$ с последующим отключением СГД, фиксацией формы ЭДС вращения и анализом ее коэффициента гармоник. Дополнительно измерялся фазный ток СГД. Кроме того, для СГД 1 были проведены опыты по измерению активного сопротивления $R_{ЭКВ} = R_1 = 4,7$ Ом и определению индук-

тивного сопротивления $X_{ЭКВ} = 6,78$ Ом ($L_{ЭКВ} = 2,7$ мГн) для номинального напряжения [9]. Далее, в процессе выполнения программ 2 и 4, на основании полученных $R_{ЭКВ}$ и $X_{ЭКВ}$, в соответствии с (1)–(3) и схемой на рис. 8,а была получена осциллограмма тока I_{2Er} как разность тока I_1 СГД и тока I_{ei} от АИН (рис. 8,б). Массив точек тока I_{2Er} был обработан программой оценки коэффициента гармоник. Следует также отметить, что СГД3 и СГД5, не являющиеся гироскопическими, были исследованы для выявления общих закономерностей намагничивания различных материалов в магнитных системах с различными типами обмоток. Результаты экспериментов представлены в табл. 2 и на рис. 9.

Обсуждение результатов. Эксперименты показывают не только хороший гармонический состав ЭДС вращения СГД (рис. 10) и порождаемого ей тока ротора (рис. 8,б), но и доказывают правомочность схемы замещения на рис. 1,а. К причинам, порождающим хорошие фильтрующие свойства электромагнитной системы СГД, следует отнести:

распределение обмоток статора на полюсном делении и схема их соединения;

симметрия выходного напряжения АИН;

физические процессы распространения электромагнитного поля в ферромагнитной среде.

Наблюдаемые периодические процессы изменения коэффициента гармоник в программах опытов 2 и 4 у двух разных типов СГД (рис. 9,б и в) имеют одинаковую тенденцию. При низком напряжении питания (рис. 9,б) ротор в процессе запуска СГД первоначально перемагничивается по петле гистерезиса «внизу» основной кривой намагничивания. При небольшой перегрузочной способности двигателя и низком напряжении петля распределения близка по форме к эллипсу и после входа в синхро-

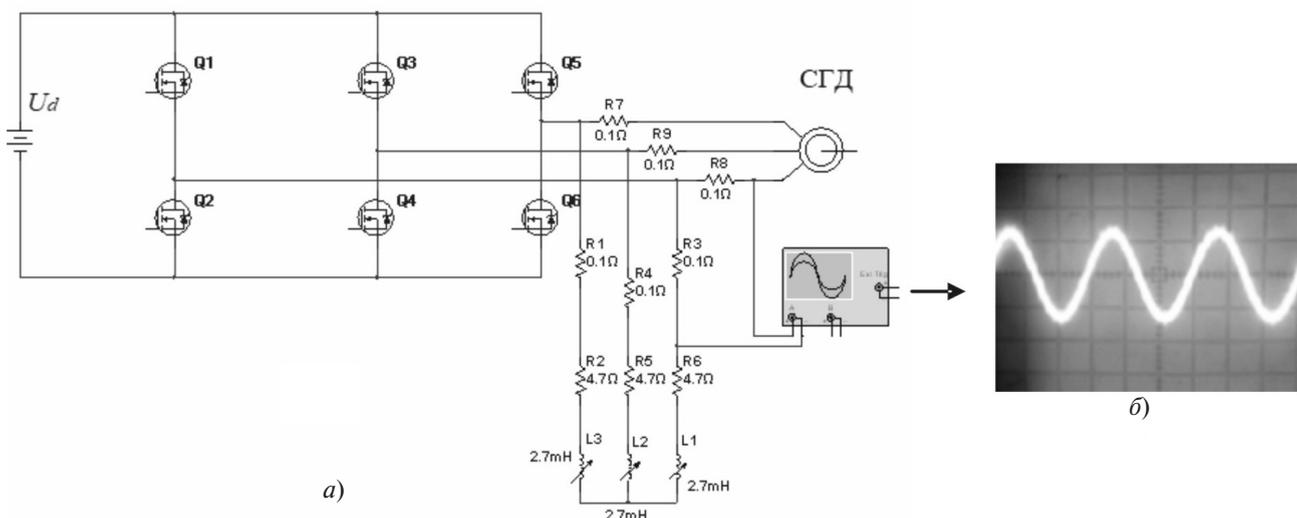


Рис. 8. Принципиальная схема проведения эксперимента по выявлению тока I_{2Er} (а), осциллограмма тока I_{2Er} (б)

Характеристики испытуемых СГД

Назначение или тип СГД	Напряжение питания, частота	Номинальная мощность, Вт	Параметры обмотки (число фаз m -число пазов на полюс и фазу q -относительный шаг по пазам)	Материал ротора
Гидродвигатель поплавкового ГП	32 В, 400 Гц	1	3-2-5/6	Fe-Ni-Al
Гидродвигатель гиросинтезатора	32 В, 400 Гц	0,6	3-2-5/6	Fe-Co-V
Г 210, системы автоматики	32 В, 400 Гц	4	3-1-4/5	Fe-Co-V
Г32, системы автоматики	32 В, 400 Гц	12,8	3-2-4/5	Fe-Co-V
Насосные системы	36 В, 400 Гц	300	3-2-5/6	Fe-Co-Cr

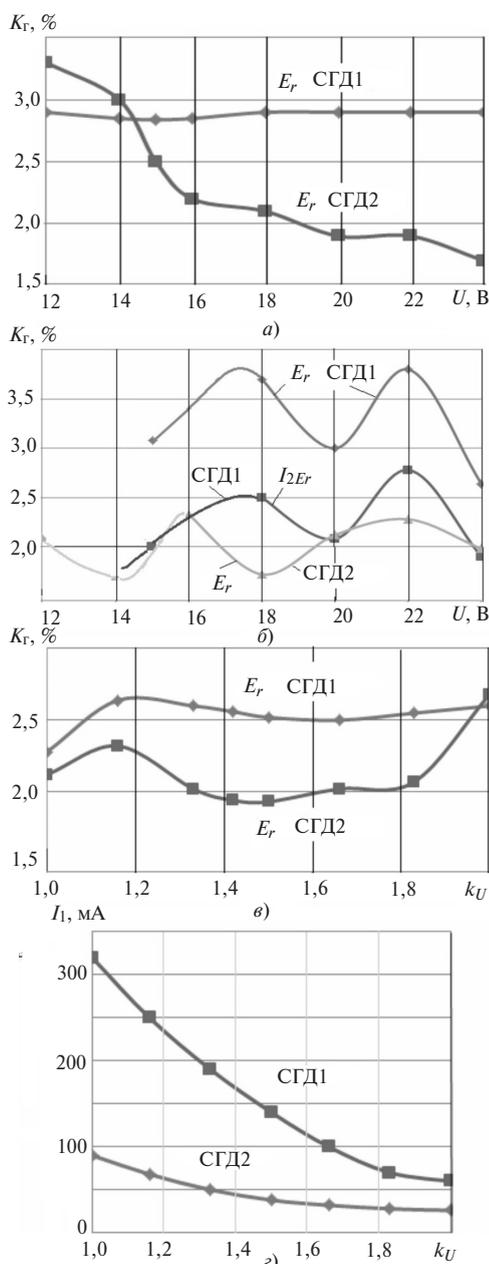


Рис. 9. Коэффициент гармоник ЭДС E_r , тока I_{2E_r} и токи СГД 1,2 в различных программах испытаний: а – программа 1; б – программа 2; в – программа 4; г – токи СГД в программе 4

низм мало отличается от первоначальной петли, что характеризует высокий гармонический состав напряженности поля ротора.

По мере возрастания пускового напряжения и «поднятия» рабочей точки по основной кривой намагничивания петля распределения расширяется, а при переходе в синхронный режим приобретает форму, близкую к той, что показана на рис. 4,б (кривая 4). При этом коэффициент гармоник ЭДС становится больше.

При дальнейшем увеличении пускового напряжения рабочая точка на основной кривой намагничивания выходит на линейный участок, а петля распределения в синхронном режиме при постоянстве площади становится все уже. При этом несколько улучшается коэффициент гармоник напряженности поля и соответствующей противоЭДС. В дальнейшем процесс вновь сопровождается возрастанием K_r с выходом рабочей точки на нелинейный участок («колени») кривой намагничивания. С приближением магнитной системы к насыщению и все большей внешней видимости бестелесности петли распределения также растут ток намагничивания и активные потери, однако ротор практически не меняет своей намагниченности и все более находится под действием лишь поля статора. Ток ротора от противоЭДС имеет меньшие значения коэффициента гармоник, что связано с дополнительным фильтрующим действием индуктивных сопротивлений двигателя.

При перевозбуждении СГД по программе 4 (см. рис. 9,в) изменение коэффициента K_U практически не приводит к изменению коэффициента гармоник, поскольку при постоянстве рабочего напряжения двигателя форма петли распределения меняется незначительно. При отключении СГД непосредственно перед входом в синхронизм (программа 1, рис. 9,а) петля распределения характеризуется полной мощностью на перемагничивание материала, а также типом материала ротора с его ин-

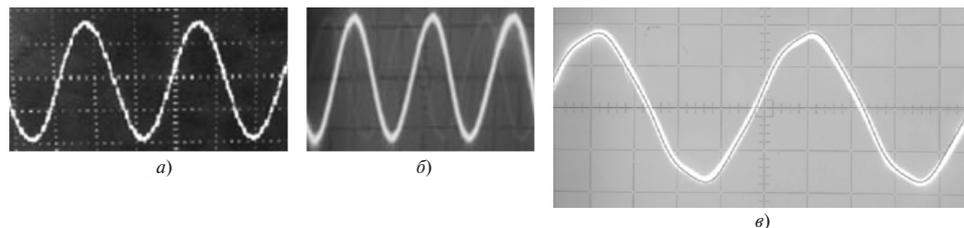


Рис. 10. Формы осциллограмм противо ЭДС: а – СГД 1 и 2; б – СГД 5; в – СГД 3 и 4 (темная сплошная линия на этой осциллограмме получена моделированием с добавлением 5 и 7-й гармоник)

дукцией, коэрцитивной силой, а также электрической и магнитной проводимостью.

На фоне хорошего гармонического состава ЭДС у СГД 1 и СГД 2 двигатели СГД 3 и СГД 4 имеют показатели K_r хуже. Отклонение от синусоидальной формы противоЭДС у СГД 3 и СГД 4 объясняется отсутствием подавления обмоткой с числом пазов на полюс и фазу $q=1$ гармоник 5- и 7-й [15].

При внесении в модель 5- и 7-й гармоник с соответствующими амплитудами и сдвигами можно получить форму противоЭДС, аналогичную экспериментальной (рис. 10, в – темная сплошная линия, совмещенная с осциллограммой). Таким образом, СГД с обмотками подобного типа могут вносить погрешность в определение положения ротора при реализации управления на основе информативных свойств АИН.

В отличие от СГД 3 и 4 двигатели СГД 1, 2 и 5 имеют обмотку с числом пазов на полюс и фазу $q=2$ и относительным шагом $\beta=5/6$. При этом коэффициенты укорочения для 5- и 7-й гармоник $k_{y5}=k_{y7}=0,259$ [14]. С учетом того, что при соединении фаз СГД звездой гармоники, кратные трем, отсутствуют, а вместе с 5- и 7-й гармониками отфильтровываются и гармонические всех порядков, в целое число раз отличающиеся от них [17], образуется синусоидальная форма противоЭДС высокого качества.

Уточнение анализа формы фазного тока и противоЭДС СГД с точки зрения фильтрующих свойств магнитной системы. Как было отмечено в [10], АИН выполняет не только функцию преобразователя энергии, но и устройства, организующего непосредственно в рабочем режиме оперативный зон-

Таблица 2

Экспериментальное исследование коэффициента гармоник ЭДС вращения и тока ротора I_{2Er}

Номер СГД	Программа 1		Программа 2			Программа 3		Программа 4		
	U, В	K_r ЭДС, %	U, В	K_r ЭДС, %	K_r для I_{2Er} , %	K_r ЭДС, %	k_U	K_r ЭДС, %	I, А	
1	12	2,90	15	3,07	2,00	24/12	3,00	1,00	2,28	0,32
	14	2,85	18	3,70	2,50			1,14	2,64	0,26
	15	2,84	20	3,00	2,08			1,42	2,56	0,17
	18	2,90	22	3,80	2,78			1,70	2,52	0,10
	22	2,90						2,00	2,60	0,06
	24	2,90	24	2,64	1,90			2,00	2,60	0,06
2	12	3,3	12	2,10	–	24/12	2,00	1,00	2,12	0,09
	14	3,0	14	1,71	–			1,16	2,32	0,068
	16	2,2	16	2,33	–			1,33	2,02	0,050
	18	2,1	18	1,72	–			1,50	1,93	0,038
	20	1,9	20	2,12	–			1,66	2,02	0,032
	22	1,9	22	2,28	–			1,83	2,07	0,028
	24	1,7	24	1,89	–			2,00	2,68	0,026
3	12	6,2	12	6,5	–	24/12	6,3	1,0	6,5	–
	24	7,1	24	7,4	–			1,5	6,8	–
4	12	5,8	12	6,2	–	24/12	6,4	1,0	6,2	–
	24	7,2	24	7,0	–			1,5	6,5	–
5	18	4,2	18	4,0	–	30/18	3,8	1,00	4,0	–
	30	4,2	30	4,0	–			1,50	3,8	–

дирующий сигнал, по отклику на который можно судить о режимах и переменных параметрах электродвигателя. Эта особенность вполне согласуется и с основным свойством мехатронных систем – принципиальной невозможностью реализации электрической машиной законов управления без автономного инвертора. Зондирующий сигнал в виде прямоугольно-ступенчатого питающего напряжения АИН позволяет уточнить взаимосвязь режимов намагничивания и формы фазного тока.

Предварительно дополним сформулированные в [8] положения утверждением, согласующимся с логикой идеи информативности АИН, результатами моделирования и экспериментальными данными:

точка перегиба кривой фазного тока СГД на коммутационном интервале АИН $\pi/3 \div 2\pi/3$ соответствует максимуму противоЭДС и переходу через нуль намагничивающей составляющей I_{2Erd} тока I_{2Er} (рис. 11):

$$I_{2Erd} = I_{2Er} \sin\left(\Theta_r + \arctg \frac{X_{\text{ЭКВ}}}{R_{\text{ЭКВ}}}\right) \quad (4)$$

или после преобразований

$$I_{2Erd} = I_{2Er} \left(\frac{k}{\sqrt{1+k^2}} \sin \Theta_r + \frac{k}{\sqrt{1+k^2}} \cos \Theta_r \right). \quad (5)$$

При работе СГД в синхронизме ротор находится под воздействием постоянного поля с гармоническим составом, определяемым типом обмотки и вышеозначенными особенностями намагничивания ротора. При этом все действующие гармонические составляющие намагничивают ротор с учетом того, что амплитуды гармоник уменьшаются соответственно в $\nu/k_{y\nu}$ раз, где ν – номер гармоники. Самые значимые гармоники при $q=2$ и $\beta=5/6$ – 5- и 7-я. С учетом того, что 7-я гармоника является прямой, а 5-я – обратной, их сдвиги по фазам составляют:

для фазы A – $5\Theta_r$ и $-5\Theta_r$; B – $(240^\circ + \Theta_r)$ и $-(120^\circ + 7\Theta_r)$; C – $(120^\circ + 5\Theta_r)$ и $-(240^\circ + 7\Theta_r)$.

Статор в отличие от ротора испытывает воздействие от высших гармоник противоЭДС, подчиняющееся законам теории электромагнитного поля, а именно, уравнениям Максвелла, описывающим динамику процессов намагничивания [18–20]. Задача анализа для СГД конкретизируется рассмотрением поверхностного эффекта при проникновении волны магнитного поля в ферромагнитное полупространство – статор, на частотах 2000 и 2800 Гц. При обозначении координаты, нормально расположенной к поверхности статора через z , электромагнитная волна H во времени t выражается как

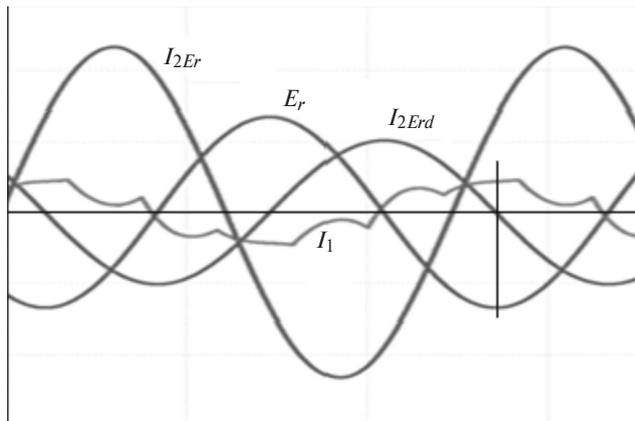


Рис. 11. ПротивоЭДС и составляющие фазного тока I_1 для СГД 1 при угле нагрузки $\Theta_r = 12$

$$H(z,t) = H(z)e^{j\omega t} = H_m e^{-\lambda \sqrt{\frac{\omega}{2}} z} e^{j(\omega t - \lambda \sqrt{\frac{\omega}{2}} z)}, \quad (6)$$

где ω – круговая частота; $\lambda = 0,57 \sqrt{\frac{\pi \mu}{\rho}}$; μ – магнитная проницаемость; ρ – удельное электрическое сопротивление.

Действительная часть (6) есть решение вышеозначенной задачи:

$$H = H_m e^{-\lambda \sqrt{\frac{\omega}{2}} z} \cos \omega \left(t - \frac{\lambda z}{\sqrt{2\omega}} \right). \quad (7)$$

Результаты вычислений по (7) для электротехнической стали 2421 при толщине листа 0,18 мм для статора СГД 1 представлены на рис. 12. Можно сделать вывод о том, что поля 5- и 7-й гармоник дополнительно ослабляются в $1/k_{\nu\Delta}$ раз, причем

$$k_{5\Delta} = \frac{\int_0^{18} H(z) dz}{18} = 0,71, \quad k_{7\Delta} = \frac{\int_0^{18} H(z) dz}{18} = 0,67. \quad (8)$$

Суммарный коэффициент ослабления гармоник по амплитуде можно представить как:

$$k_{\text{ослн}} = k_{\Delta} k_{y\nu} / \nu. \quad (9)$$

По мере проникновения поля в толщу стального листа статора электромагнитная волна высших гармоник сдвигается по фазе δ (см. (7)):

$$\delta = \frac{\omega \lambda z}{\sqrt{2\omega}}, \quad (10)$$

в результате в формировании противоЭДС участвует усредненная сумма гармонических составляющих различных амплитуд и фаз. Согласно рис. 12 среднее значение $\delta_{\text{ср}}$ для гармоник составляет $\delta_{5\text{ср}} = 21^\circ$, $\delta_{7\text{ср}} = 25^\circ$ при соответствующих частотах. В пересчете на основную гармонику дополни-

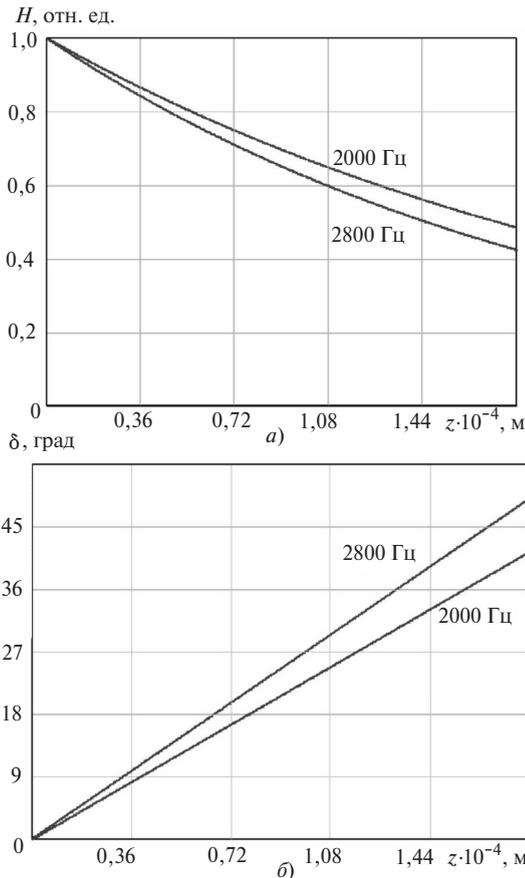


Рис. 12. Относительная амплитуда (а) и фаза (б) 5- и 7-й гармоник поля от противоЭДС при проникновении в статор СГД1

тельный сдвиг δ_{cp} гармоники ν -й будет в ν раз меньше. Таким образом, представленная уравнениями (1)–(3) математическая модель для фазного тока СГД $I_{\phi n}(\varphi)$ преобразуется к виду:

$$I_{\phi n}(\varphi) = \frac{U_d}{3R_{\text{ЭКВ}}} F_n(\varphi) - \sum_{\nu=1}^{\infty} A \sin \left[\nu(\varphi - \Theta) - \alpha_{\nu} - \frac{\delta_{cp}}{\nu} \right], \quad (11)$$

где $F_n(\varphi)$ – коммутационная функция АИН для n -го интервала коммутации, причем $n=1$ для $0 \div \pi/3$; $n=2$ для $\pi/3 \div 2\pi/3$; $n=3$ для $2\pi/3 \div \pi$;

$$F_1 = 1 - \frac{(1+a)(2-a)}{1+a^3} e^{-k\varphi};$$

$$F_2 = 2 - \frac{(1+a)^2}{1+a^3} e^{-k(\varphi - \pi/3)};$$

$$F_3 = 1 + \frac{(1+a)(1-2a)}{1+a^3} e^{-k(\varphi - 2\pi/3)};$$

$$\alpha_{\nu} = \arctg(\nu X_{\text{ЭКВ}} / R_{\text{ЭКВ}}); \quad A = \frac{E_r k_{\text{осл}} D}{\sqrt{R_{\text{ЭКВ}}^2 + (\nu X_{\text{ЭКВ}})^2}},$$

где D – функция формирования ряда гармоник с исключением четных и кратных трем:

$$D = \frac{1 - (-1)^{\nu} + 2 \sin \frac{\pi}{2} \nu \sin \frac{\pi}{6} \nu}{\nu}.$$

Для проверки вышеизложенных теоретических выкладок в программе Mathcad была реализована математическая модель по выражению (11), а в программе Multisim – соответствующая ей имитационная модель (рис.13). Моделирование формы тока проводилось для СГД 1 с предварительно измеренными значениями ЭДС ротора (сплав Fe-Ni-Al), общего индуктивного сопротивления и активного сопротивления обмотки статора при пренебрежении потерями в стали (сталь 2421 статора с толщиной листа 0,18 мм). Результаты моделирования формы тока как критерия правильности вышеизложенных рассуждений представлены на рис. 14 и показывают весьма хорошее совпадение.

Что касается зубцовых гармоник (для СГД 1 порядков 11 и 13), то наличие пазов и зубцов, порождающее их, несмотря на искажения кривой поля (см. рис.7), не приводит к искажению кривой противоЭДС [16]. Кроме того, при намагничивании зубцовыми гармониками гистерезисного слоя про-

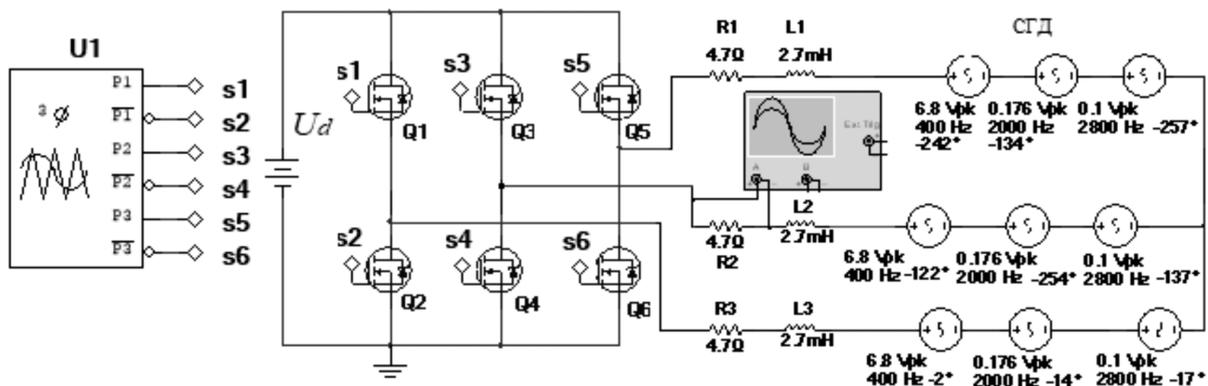


Рис. 13. Имитационная модель гистерезисного гидропривода для анализа формы фазного тока и противо ЭДС

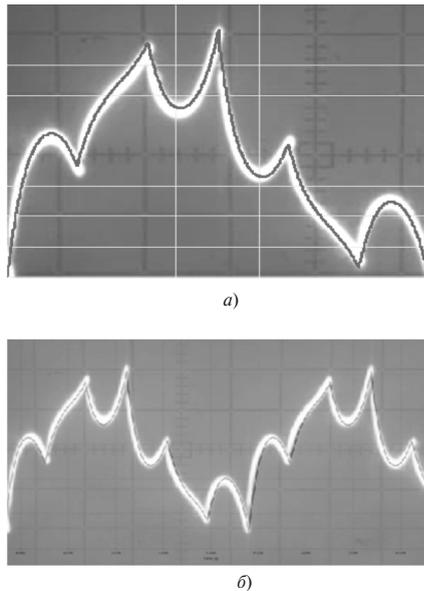


Рис. 14. Сравнение результатов моделирования фазного тока в программах Mathcad (а) и Multisim (б) с реальным значением тока СГД 1 (на осциллограмму наложены кривые тока, полученные моделированием)

никновение поля в толщу ротора с учетом вышеизложенного ослабляет воздействие гармоник в роторе из сплава Fe-Ni-Al согласно (8) по амплитуде соответственно в 3,4 и 3,6 раз, а при воздействии их со стороны ротора на статор из стали 2421 — еще в 1,6 и 1,7 раз. При этом изменение магнитной проницаемости гистерезисного слоя, исследованное, в частности, в [21], не приводит к ощутимым изменениям оцененных выше значений. Дополнительный фазовый сдвиг указанных гармоник по мере распространения в толщу ротора уже на глубине 2,5 мм составляет примерно 90° , что в совокупности с гистерезисным углом сдвига на соответствующих частотах можно трактовать как некий условный «скос пазов» ротора, что в совокупности приводит к дополнительному ослаблению зубцовых составляющих.

Заключение. Исследования показали, что электромагнитная система гистерезисных машин обладает хорошими фильтрующими свойствами для гармонических составляющих поля высшего порядка. Это обстоятельство позволяет рассчитывать момент СГД по первым гармоническим составляющим для различных форм питающего напряжения, формируемого АИН. Предложенная математическая модель дает возможность поинтервальной оценки фазного тока СГД не только для выбора ключей АИН, но и для организации сигнала обратной связи по скорости и положению ротора, в частности для подавления колебаний гироротора, с использованием характерных точек на коммутационных интервалах. Для реализации мехатронных устройств на основе информативных свойств АИН

рекомендуется в СГД использование статорных обмоток с числом пазов на полюс и фазу $q=2$, относительным шагом $\beta=5/6$ и материалом ротора типа Fe-Ni-Al. Для указанного сплава сочетание удельного сопротивления $\rho=0,5 \cdot 10^{-6}$ Ом·м и относительной магнитной проницаемости $\mu_{отн} = 10$ в большей мере способствует фильтрации высших гармонических поля, чем сочетание $\rho=50 \cdot 10^{-6}$ Ом·м и $\mu_{отн} = 22$ для деформируемого сплава типа Fe-Co-Cr, что выражается в несколько худших значениях коэффициента гармоник K_T противоЭДС для Fe-Co-Cr. Однако снижение K_T для указанного сплава не является критичным и может быть компенсировано степенью фильтрации системы обработки информации на коммутационных интервалах [11], а перспективный сплав Fe-Co-Cr использован для построения сверхвысокоскоростных СГД, способных работать в условиях высоких температур и без бандажирования ротора [22–25].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тарасов В.Н., Делекторский Б.А. Управляемый гистерезисный привод. М.: Энергоатомиздат, 1983, 128 с.
2. Гарганеев А.Г., Брованов С.В., Харитонов С.А. Мехатронные системы с синхронно-гистерезисными двигателями. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2012, 226 с.
3. Мастяев Н.З., Орлов И.Н. Гистерезисные электродвигатели, Ч.1. М.: Изд. МЭИ, 1963, 220 с.
4. Делекторский Б.А., Мастяев Н.З., Орлов И.Н. Проектирование гироскопических электродвигателей. М.: Машиностроение, 1968, 252 с.
5. Бертинов А.И. Электрические машины авиационной автоматики. М.: Оборонгиз, 1961, 430 с.
6. Тарасов В.Н. Миниатюризация устройств перевозбуждения гистерезисных электродвигателей. — Труды МЭИ, 1976, вып. 291, с. 72–77.
7. Тарасов В.Н., Останин С.Ю., Соболев Л.Б. Моделирование физических процессов в гистерезисном двигателе при импульсном регулировании его возбуждения. — Электричество, 1998, № 3, с. 44–51.
8. Гарганеев А.Г. Информативные свойства автономных инверторов в электромеханике. — Электричество, 2001, № 12, с. 28–36.
9. Пат. 2193212 (РФ). Способ определения индуктивного сопротивления электродвигателей переменного тока/А.Г. Гарганеев. — БИ, 2002, № 132.
10. Гарганеев А.Г. Информативные свойства мехатронных систем. — Доклады ТУСУР, 2012, № 1(25), с. 153–161.
11. Realization of motor current curve approximation algorithm on switching intervals [Electronic resource] /A.V. Kashutov, A.G. Garganeev. Micro/Nanotechnologies and Electron Devices, EDM 2016. Proceedings 17th International Conference of Young Specialists, 30 June–4 July 2016, Erlagol, Altai Republic, Russia, 2016, pp. 462–464.
12. Reddy M. Dynamic analysis of hysteresis motor using Matlab/Simulink/M. Reddy, L.V. Suresh. — International Journal of Engineering Research & Technology, 2012, No. 1(5), pp. 1–8.
13. Руденко В.С., Сенько В.И., Чиженко И.М. Преобразовательная техника. Киев.: Вища школа, 1978, 423 с.
14. Музыка Н.А., Музыка Ю.А. Графоаналитический метод определения параметров синхронного и перевозбужденного режимов гистерезисного двигателя. — Электричество, 1966, № 4, с. 66–70.

15. Музыка Н.А., Музыка Ю.А. К расчету электрических параметров гистерезисного электродвигателя, работающего при несимметричном питании. — Электричество, 1970, № 1, с. 34–37.

16. Вольдек А.И. Электрические машины. Л.: Энергия, 1974, 840 с.

17. Жерве Г.К. Обмотки электрических машин. Л.: Энергоатомиздат, 1989, 400 с.

18. Тамм И.Е. Основы теории электричества. Т. 1, ч. 2. М.: Гостехиздат, 1934, 284 с.

19. Поливанов К.М. Теоретические основы электротехники, ч. 3. М.: Энергия, 1969, 352 с.

20. Кифер И.И., Пантюшин В.С. Испытания ферромагнитных материалов. Л.: Госэнергоиздат, 1955, 240 с.

21. Мастяев Н.З., Трегубов В.А. Влияние высших гармоник индукции на пусковой момент гистерезисного двигателя. — Электричество, 1977, № 9, с. 30–33.

22. Кавалерова Л.А., Малько И.А., Миляев И.М. и др. Сплавы для гистерезисных двигателей. — Электронная промышленность, 1987, вып. 6(164), с. 40–42.

23. Kubota T., Watui G., Itagati M. Hysteresis motor using magnetically anisotropic Fe-Cr-CO magnet. — IEEE Trans on Magnetics, 1998, No. 34(6), pp. 3888–3896.

24. Бурханов Г.С., Дормидонтов А.Г., Миляев И.М. и др. Практика и дальнейшие перспективы промышленного использования высокопрочных наноструктурных магнитотвердых сплавов системы Fe-Cr-Co [Электрон. ресурс]: <http://www.ntsrf.info/science/library/3201.htm> Нанотехнол. общ-во России. (дата обращения 5.11.2017).

25. Kurihara K., Kubota T. Steady-state performance analysis for hysteresis motor with magnetic anisotropy. COMPEL: The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering, 2008, vol. 27, iss: 4, pp. 830–835.

[07.05.2018]

А в т о р ы: Гарганеев Александр Георгиевич окончил Томский политехнический институт в 1978 г. Докторскую диссертацию «Системы электропитания специальных потребителей переменного тока на базе статических преобразователей напряжения» защитил в 2003 г. Профессор Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Кашеутов Алексей Викторович окончил Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники в 2012 г. Аспирант Инженерной школы Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Кашин Евгений Игоревич окончил Томский политехнический университет в 2007 г. Аспирант Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Elektrichestvo, 2019, No. 1, pp. 55–66

DOI:10.24160/0013-5380-2019-1-55-66

About the Filtering Properties of the Hysteresis Gyromotor Electromagnetic System in Mechatronic Devices

GARGANEYEV Aleksander G. (*National Research Tomsk Polytechnical University – NRTPU, Tomsk, Russia*) — *Professor, Dr. Sci. (Eng.)*

KASHEUTOV Aleksey V. (*NRTPU, Tomsk, Russia*) — *Post-graduate student*

KASHIN Yevgeniy I. (*NRTPU, Tomsk, Russia*) — *Post-graduate student*

The article presents the results from analyzing the filtering properties of the electromagnetic system of hysteresis synchronous gyromotors used in mechatronic devices of autonomous object inertial navigation systems. The phase current twave for minhysteresis synchronous motors powered from a self-excited voltage inverter is analyzed. The interrelation of the use droptormaterial and the stat or winding design parameters with the harmonic content of the motor's counter EMF as an information variable in mechatronic devices is shown with the use of the self-excited voltage inverter's informative properties. Are fine dma the matical model describing the generation of the gyromotor phase current in the self-excited voltage inverter swit chingintervals is proposed. The model was refined based on an analysis of electromagnetic processes in hysteresis synchronous motors with rotors made of Fe-Ni-Al and Fe-Co-Cr materials. Recommendations for using magnetic materials and specific design features of the hysteresis synchronous motor electromagnetic system for constructing gyro electric drives aresuggested.

REFERENCES

1. Tarasov V.N., Delektorskiy B.A. *Upravlyayemyi gisterезisnyi privod* (Controlled hysteresis drive). Moscow, Energoatomizdat, 1983, 128 p.

2. Garganeyev A.G., Brovanov S.V., Kharitonov S.A. *Mekhatronnye sistemy s sinkhronno-gisterезisnymi dvigatelyami* (Mechatronic systems with synchronous-hysteresis motors). Nomsk, Publ. of National Research Tomsk Polytechnical University), 2012, 226 p.

3. Mastayev N.Z., Orlov I.N. *Gisterезisnye elektrodvigateli. Ch. I* (Hysteresis motors. Part I). Moscow, Publ. of Moscow Power Engineering Institute, 1963, 220 p.

4. Delektorskiy B.A., Mastayev N.Z., Orlov I.N. *Proektirovaniye giroskopicheskikh elektrodvigateli* (Design of dyroscopic electric motors). Moscow, Mashinostroeniye, 1968, 252 c.

5. Bertinov A.I. *Elektricheskiye mashiny aviatsionnoi avtomatiki* (Electrical machines for aircraft automation). Moscow, Oborongiz, 1961, 430 p.

6. **Tarasov V.N.** *Miniaturizatsiya ustroystv perezobuzhdeniya gesterezisnykh elektrodvigatelei* (Miniaturization of overexcitation devices for hysteresis motors). – Proc. of Moscow Power Engineering Institute, 1976, iss. 291, pp. 72–77.
7. **Tarasov V.N., Ostanin S.Yu., Sobolev L.B.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 1998, No. 3, с. 44–51.
8. **Garganeyev A.G.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2001, No. 12, pp. 28–36.
9. **Pat. RF No. 2193212.** *Sposob opredeleniya induktivnogo soprotivleniya elektrodvigatelei peremennogo toka* (Method for determining the inductive resistance of AC motors)/A.G.Garganeyev. Bulletin of inventions, 2002, No. 132.
10. **Garganeyev A.G.** *Doklady TUSUR – in Russ. (Proceedings of TUSUR)*, 2012, No. 1(25), pp.153–161.
11. **Realization** of motor current curve approximation algorithm on switching intervals [Electronic resource] /A.V. Kasheutov, A.G. Garganeyev. Micro/Nanotechnologies and Electron Devices, EDM 2016. Proceedings 17th International Conference of Young Specialists, 30 June–4 July 2016, Erlagol, Altai Republic, Russia, 2016, pp. 462–464.
12. **Reddy M.** Dynamic analysis of hysteresis motor using Matlab/Simulink/M. Reddy, L.V. Suresh. – International Journal of Engineering Research & Technology, 2012, No. 1(5), pp. 1–8.
13. **Rudenko V.S., Sen'ko V.I., Chizhenko I.M.** *Preobrazovatel'naya tekhnika* (Power conversion equipment). Kiyev, Vishcha shkola, 1978, 423 p.
14. **Muzyka N.A.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 1966, No. 4, pp. 66–70.
15. **Muzyka N.A.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 1970, No. 1, pp. 34–37.
16. **Vol'dek A.I.** *Elektricheskiye mashiny* (Electric machines). Leningrad, Energiya, 1974, 840 p.
17. **Zherve G.K.** *Obmotki elektricheskikh mashin* (Winding of electrical machines). Leningrad, Energoatomizdat, 1989, 400 с.
18. **Tamm I.Ye.** *Osnovy teorii elektrichestva. T. 1, ch. 2* (Fundamentals of the electricity. T. 1, part 2). Moscow, Leningrad. Gostekhizdat, 1934, 284 с.
19. **Polivanov K.M.** *Teoreticheskiye osnovy elektrotekhniki* (Theoretical fundamentals of the power engineering). Moscow, Energiya, 1969, 352 p.
20. **Kifer I.I., Pantyushin V.S.** *Ispytaniya ferromagnitnykh materialov* (Tests of ferromagnetic materials). Leningrad, Gosenergoizdat, 1955, 240 p.
21. **Mastyayev N.Z., Tregubov V.A.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 1977, No. 9, pp. 30–33.
22. **Kavalerova L.A., Mal'ko I.A., Milyayev I.M. i dr.** *Elektronnaya promyshlennost' – in Russ. (Electronics industry)*, 1987, iss. 6(164), pp. 40–42.
23. **Kubota T., Watui G., Itagati M.** Hysteresis motor using magnetically anisotropic Fe-Cr-CO magnet. – IEEE Trans on Magnetics, 1998, No. 34(6), pp. 3888–3896.
24. **Burkhanov G.S., Dormidontov A.G., Milyayev I.M. i dr.** *Praktika i dal'neishiye perspektivy promyshlennogo ispol'zovaniya vysokoprochnykh nanokonstrukturnykh magnitoverdykh splavov sistemy Fe-Cr-Co* (Practice and further prospects of industrial use of high-strength nanostructured magnetically hard alloys of the Fe-Cr-Co system). [Electron. Resource] [http: www.nts.rinfo/science/library/3201.htm](http://www.nts.rinfo/science/library/3201.htm) Russian nanotechnol. Society (Data of apple) 5.11.2017.
25. **Kurihara K., Kubota T.** Steady-state performance analysis for hysteresis motor with magneticanisotropy. COMPEL: The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering, 2008, vol. 27, iss: 4, pp. 830–835.

[07.05.2018]