

синхронном режимом двигателя, рассчитано на длительное протекание тока возбуждения, однако имеет повышенные габариты и вес.

Второй вариант ИС обладает большим активным сопротивлением обмотки индуктора ($R_{ИС0} = 2 \cdot R_{f0}$) и включается в обмотку возбуждения только на время пуска, отличается компактностью, но требует размещения на роторе шунтирующего тиристорного устройства.

Оба варианта ИС спроектированы с учётом того, что более 90% мощности потерь скольжения во время пуска выделяются в стальных магнитопроводах индукционных дисков, которые при вращении хорошо охлаждаются. При необходимости ИС может быть изготовлено во взрывозащищённом исполнении и установлено на роторе двигателя за пределами его корпуса.

Выводы. 1. Пусковая характеристика БССД с ИС (рис.3) значительно превосходит аналогичную характеристику с постоянным сопротивлением по входному моменту и практически не уступает ей по пусковому моменту. 2. Кратность сопротивления $K = 20$ является оптимальной, исходя из допустимых значений провала пусковой характеристики и перенапряжений на обмотке возбуждения двигателя.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лищенко А.И. Синхронные двигатели с автоматическим регулированием возбуждения / Лищенко А.И. – Киев: Техніка, 1969. – 192с.
2. Власов В.Г. Взрывозащищённый тиристорный электропривод переменного тока / Власов В.Г., Иванов В.Л., Тимофеева Л.И. – М.: Энергия, 1977. – 160с.
3. Постников И.М. Обобщенная теория и переходные процессы электрических машин / Постников И.М. – М.: Высшая школа, 1975. – 319с.

Поступила в редколлегию 22.06.2015.

УДК 621:313

КАЧУРА А.В., к.т.н., доцент

МОРОЗ Л.Ю., студент

СЪЯНОВ А.М., д.т.н., профессор

Днепропетровский государственный технический университет

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЕНТИЛЬНОГО РЕАКТИВНОГО ДВИГАТЕЛЯ С УМЕНЬШЕННЫМ МОМЕНТОМ ИНЕРЦИИ

Введение. 3,

начительная часть мировой инфраструктуры ориентирована на использование электрической энергии, основным потребителем которой является промышленность. В процессе модернизации промышленного электрооборудования и внедрения новых технологий широкое распространение получили электроприводы на базе вентильных реактивных двигателей (ВРД), которые являются составной частью разнообразных периферийных устройств, систем точного позиционирования, медицинского оборудования, станков с ЧПУ, роботов.

Широкое применение ВРД обусловлено их специфическими свойствами: возможность быстрого старта и реверсирования, прецизионное позиционирование, широкий диапазон регулирования, высокая надежность. В связи с этим актуальной является задача усовершенствования существующих и разработки новых конструкций ВРД с использованием современных материалов и технологических решений.

Постановка задачі. Несмотря на то, что ВРД отличаются относительно простой конструкцией электромеханической части, вопросы, связанные с их проектированием, нередко вызывают сложности. Явно выраженная зубчатость структуры сердечников статора и ротора, локальное насыщение головок зубцов, несинусоидальность магнитной индукции в воздушном зазоре, существенные температурные нагрузки, а также необходимость учета взаимного влияния двигателя и электронного преобразователя – далеко неполный перечень трудностей, которые не позволяют использовать для расчета ВРД классические методики, применяемые при проектировании традиционных электрических машин. В связи с этим важным инструментом анализа ВРД становятся численные методы, среди которых можно выделить метод конечных элементов (МКЭ) [2].

На основе МКЭ в работе исследованы электромагнитные параметры и электромеханические характеристики серийного ВРД с видоизмененным ротором, анализ которых позволяет обосновать конструктивную модификацию, направленную на уменьшение момента инерции и улучшение динамических свойств двигателя.

Результаты работы. Для расчета параметров ВРД воспользуемся системой уравнений Максвелла, которая в системе СИ имеет вид:

$$\begin{aligned} \operatorname{rot} \vec{H} &= \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}; \\ \operatorname{rot} \vec{E} &= -\partial \vec{B} / \partial t; \\ \operatorname{div} \vec{D} &= \rho; \\ \operatorname{div} \vec{B} &= 0, \end{aligned} \quad (1)$$

где \vec{H} – напряженность магнитного поля; \vec{J} – плотность электрического тока; \vec{D} – электрическая индукция; \vec{E} – напряженность электрического поля; \vec{B} – магнитная индукция; ρ – плотность электрического заряда.

К уравнениям (1) добавляются уравнения, характеризующие электромагнитные свойства материальной среды:

$$\begin{aligned} \vec{D} &= \varepsilon \vec{E}; \\ \vec{B} &= \mu \vec{H}; \\ \vec{J} &= \sigma \vec{E}, \end{aligned} \quad (2)$$

где ε – диэлектрическая проницаемость; μ – магнитная проницаемость; σ – удельная проводимость среды.

Как правило, в исходном виде система (1) не решается. Обычно она преобразуется в иную, в которой векторы \vec{E} , \vec{B} и \vec{H} заменяются вспомогательными функциями.

Введя понятие векторного магнитного потенциала [4], решение (1) можно упростить

$$\vec{B} = \operatorname{rot} \vec{A}. \quad (3)$$

Выполнив ряд известных математических преобразований [5], получим общее уравнение, описывающее электромагнитное поле

$$\nabla \times (\nu \nabla \times \vec{A}) = -\sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t}. \quad (4)$$

Уравнение (4) является обобщенным, правая часть которого зависит от элемента конструкции ВРД. Его решение связано с решением трехмерной полевой задачи. В декартовой системе координат (4) принимает вид

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\nu \frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu \frac{\partial A}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu \frac{\partial A}{\partial z} \right) = -\sigma \frac{\partial A}{\partial t}, \quad (5)$$

где x, y, z – координаты области.

Задача по решению (5) сводится к краевой задаче решения уравнения Пуассона относительно векторного магнитного потенциала \bar{A} . Учитывая сложность геометрии ВРД, решение данной задачи аналитическими методами является затруднительным. Выходом является сведение краевой задачи к вариационной и использование МКЭ [1, 2].

Вариационная формулировка задачи предусматривает использование энергетического функционала [1, 2] и его минимизации

$$F(A) = \int_S \left(\int_0^{B_x} \frac{B_x}{\mu\mu_0} dB_x + \int_0^{B_y} \frac{B_y}{\mu\mu_0} dB_y \right) - \int_S A_j dS, \quad (6)$$

где S – площадь конечного элемента; B_x, B_y – составляющие вектора магнитной индукции; j – вектор плотности тока в конечном элементе.

Определив значения магнитной индукции и напряженности в каждой точке поля рассматриваемой области задачи, найдем электромагнитную силу и вращающий момент через тензоры натяжений [3]. Если система натяжений \bar{T}_n на поверхности S эквивалентна электромагнитной силе, действующей на некоторый объем V , то эту силу можно найти, суммируя элементарные силы натяжения $\bar{T}_n dS$:

$$\bar{F} = \int_S \bar{T}_n dS = \bar{q}_x F_x + \bar{q}_y F_y + \bar{q}_z F_z,$$

где $F_x = \int_S T_{nx} dS$, $F_y = \int_S T_{ny} dS$, $F_z = \int_S T_{nz} dS$.

Электромагнитный момент, действующий на выделенный объем, найдем путем суммирования его составляющих относительно осей x, y, z :

$$\bar{M} = \int_S [\bar{r} \bar{T}_n] dS = \bar{q}_x M_x + \bar{q}_y M_y + \bar{q}_z M_z,$$

где $M_x = \bar{q}_x \bar{M} = \int_S (y T_{nz} - z T_{ny}) dS$;

$$M_y = \bar{q}_y \bar{M} = \int_S (z T_{nx} - x T_{nz}) dS$$
;

$$M_z = \bar{q}_z \bar{M} = \int_S (x T_{ny} - y T_{nx}) dS,$$

где T_{nx}, T_{ny}, T_{nz} – компоненты тензора натяжений по осям системы координат.

Тензор натяжений через параметры поля в векторной форме определяют как [3]

$$\bar{T}_n = \frac{\bar{B} B_n - 0.5 B^2 \bar{n}}{\mu\mu_0},$$

где \bar{B} – вектор индукции в рассматриваемой точке поля; B_n – нормальная составляющая индукции; \bar{n} – нормальный орт к той стороне поверхности, на которую действует натяжение \bar{T}_n .

Компоненты тензора натяжений имеют следующий вид [3]:

$$T_{xx} = \frac{B_x^2 - 0.5 B^2}{\mu\mu_0}; T_{xy} = \frac{B_x B_y}{\mu\mu_0}; T_{xz} = \frac{B_x B_z}{\mu\mu_0};$$

$$T_{yx} = \frac{B_y B_x}{\mu\mu_0}; T_{yy} = \frac{B_y^2 - 0.5 B^2}{\mu\mu_0}; T_{yz} = \frac{B_y B_z}{\mu\mu_0};$$

$$T_{zx} = \frac{B_z B_x}{\mu\mu_0}; T_{zy} = \frac{B_z B_y}{\mu\mu_0}; T_{zz} = \frac{B_z^2 - 0.5 B^2}{\mu\mu_0}.$$

В рамках рассмотренной математической модели проведены исследования серийного ВРД SRM 57-100-4 производства ТОВ „Електромеханіка” (г. Николаев) в шаговом режиме. В соответствии с данными предприятия-изготовителя ВРД имеет номинальные параметры, указанные в табл.1. Для повышения динамических свойств двигателя и снижения температурных нагрузок модель подверглась модификации путем внесения в конструкцию ротора вентиляционных каналов диаметром 5 мм (рис.2). Магнитная система ВРД выполнена с соотношением полюсов статора к ротору 8/6. Статорный и роторный пакеты набраны из электротехнической стали марки 2211 с толщиной пластин 0,5 мм. Активная длина статора и ротора 28 мм. Конструктивные параметры двигателя представлены на рис.1 и 2. Твердотельная модель ВРД и ее дискретный аналог показаны на рис.3.

Таблица 1 – Технические данные ВРД SRM 57-100-4

Технические данные	SRM 57-100-4
Номинальный момент, Нм	0,05
Номинальная мощность, Вт	21
Номинальное напряжение, В	24
Максимальная частота вращения, об/мин	4500
Максимальный момент, Нм	0,1
Глубина регулирования	1:500
Момент инерции ротора, кг м ²	0,0000055
Масса, кг	0,75
Способ охлаждения	IC0040
Степень защиты	IP54

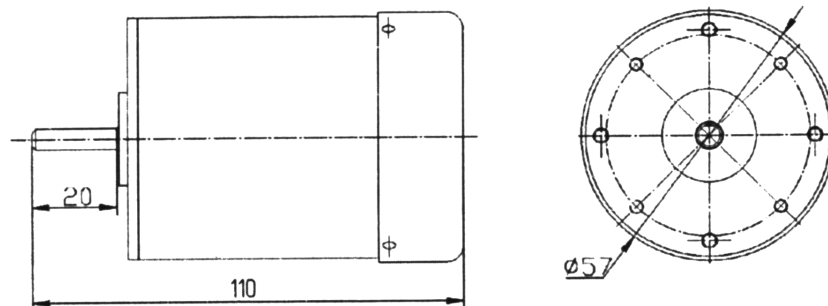


Рисунок 1 – Габаритные размеры ВРД-57-100-4

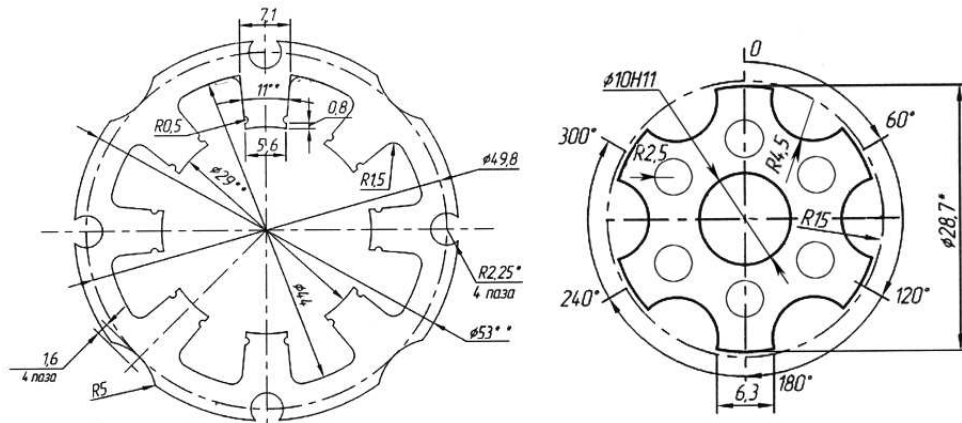


Рисунок 2 – Габаритные размеры статора и ротора

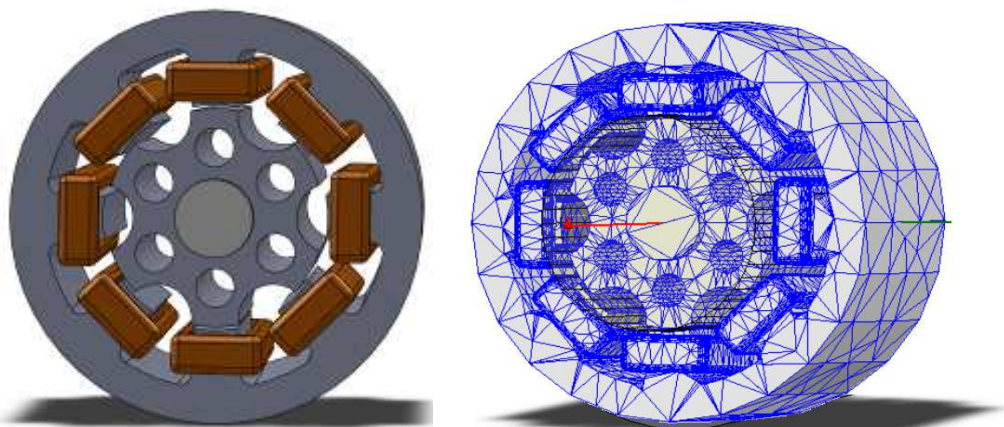


Рисунок 3 – Твердотельная и дискретная модели ВРД

В процессе расчета питание обмоток ВРД осуществлялось от источника импульсных сигналов, формирующего разнополярную четырехфазную систему напряжений прямоугольной формы амплитудой 0.1 В частотой 0.6 Гц (рис.4). Указанная система

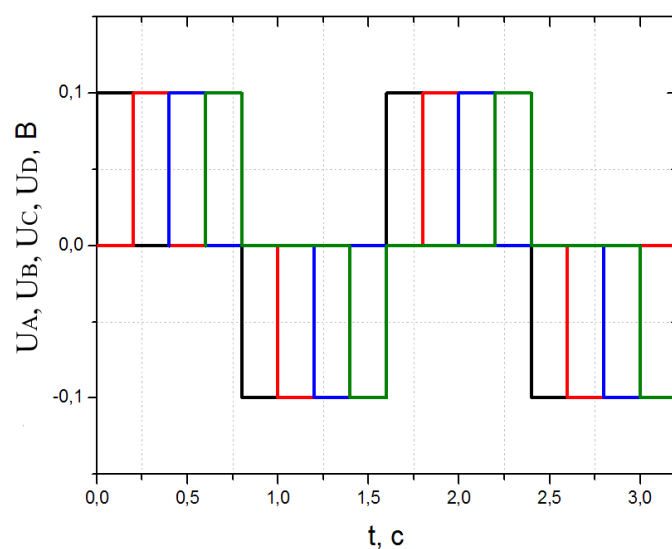


Рисунок 4 – Разнополярная четырехфазная система напряжения

напряжения обусловлена стабильной работой ВРД в шаговом режиме. При этом увеличение амплитуды импульсов напряжения либо их частоты неизбежно приводят к накоплению ротором ошибки преобразования сигнала управления в угол поворота, что исключает возможность применения данного ВРД в разомкнутых системах дискретного привода. Продолжительность переходного процесса составила около 10 сек.

В результате расчета получены графики распределения магнитной индукции в объеме ВРД для различных моментов времени (рис.5), переходные процессы скорости ВРД (рис.6), электромагнитного момента (рис.7), положения ротора (рис.8), токов в фазах (рис.9), потокосцеплений (рис.10). На рис.11 показан график противо-ЭДС, наводимой в фазах статора.

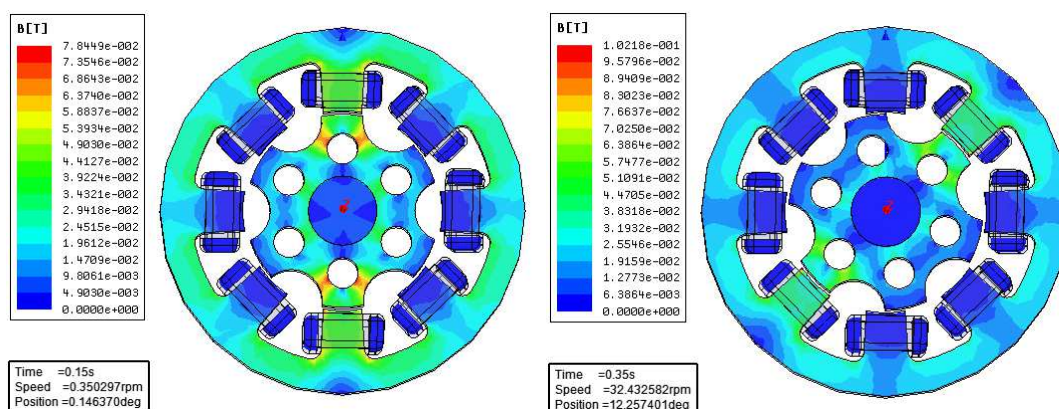


Рисунок 5 – Распределение магнитной индукции в сечении ВРД для различных моментов времени

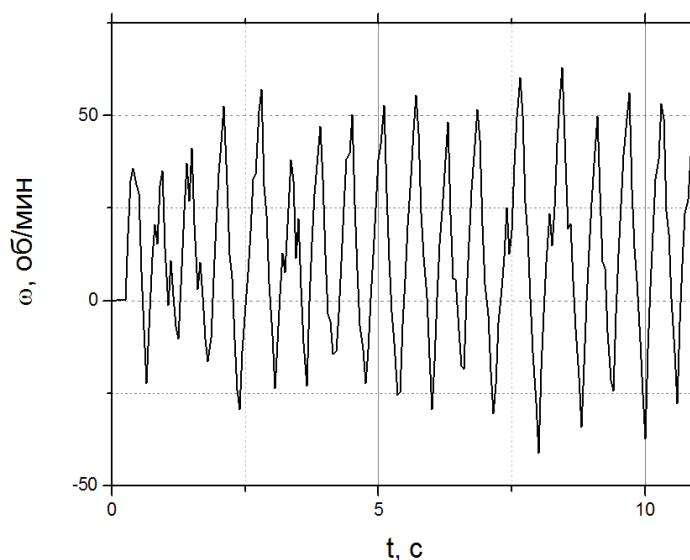


Рисунок 6 – Переходный процесс скорости ВРД

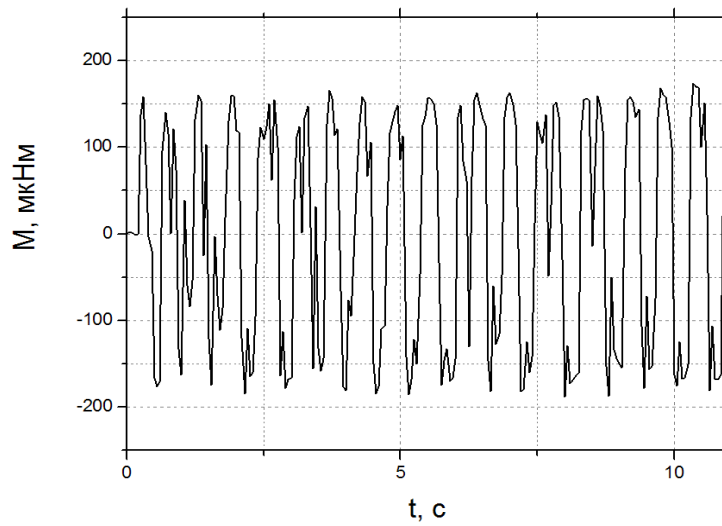


Рисунок 7 – Переходный процесс электромагнитного момента ВРД

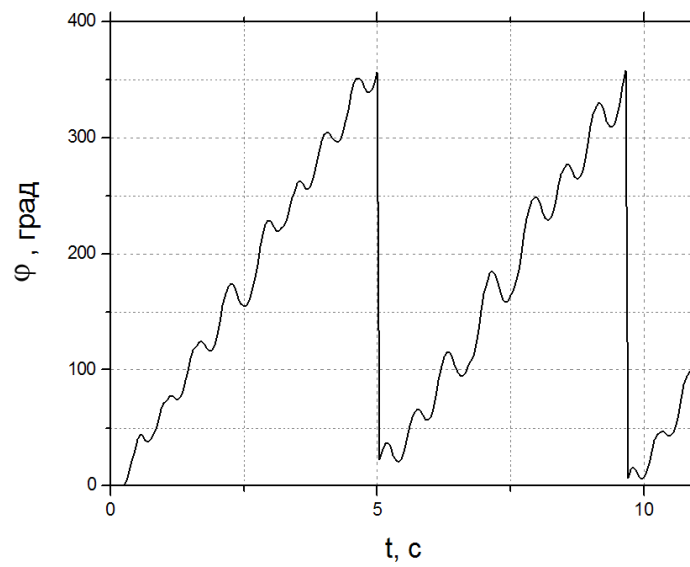


Рисунок 8 – Переходный процесс положения ротора ВРД

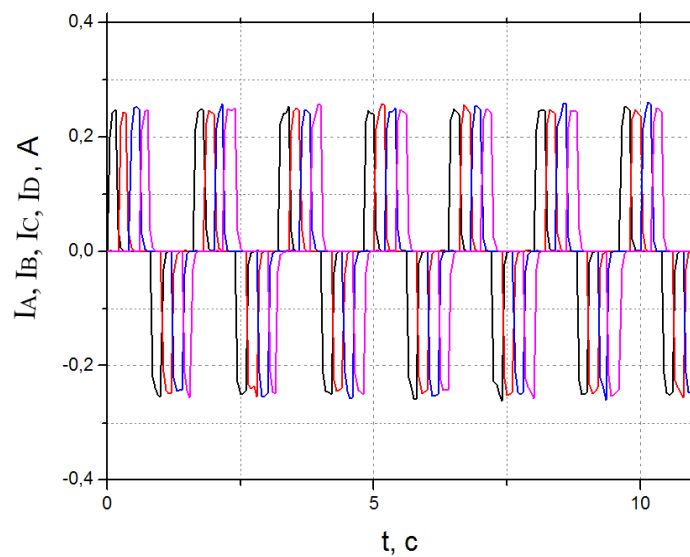


Рисунок 9 – Переходные процессы токов ВРД

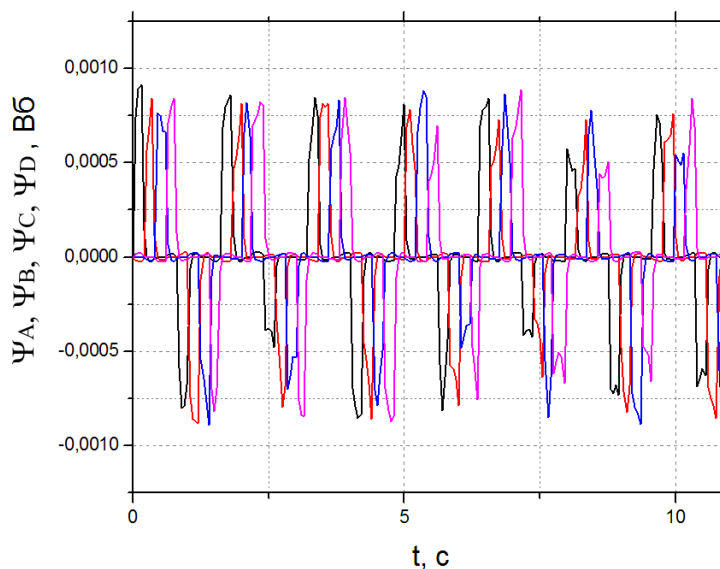


Рисунок 10 – Переходные процессы потокоцеплений фаз ВРД

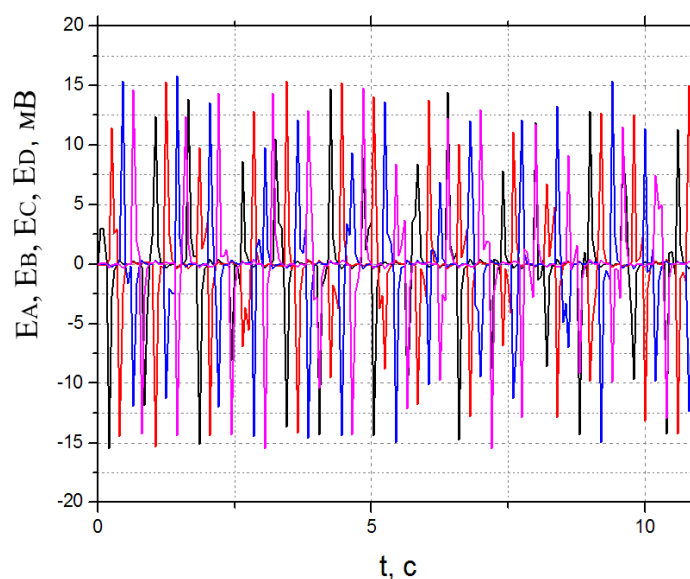


Рисунок 11 – Противо-ЭДС, наводимая в обмотках статора

Выводы. На основе полученных результатов можно сделать следующие выводы: 1) величина импульса питания для двигателя SRM 57-100-4 с модифицированным ротором в шаговом режиме составляет 0,1 В продолжительностью 0,2 с. Указанные параметры питания позволяют создавать на валу импульсный электромагнитный момент колебательного характера с возможностью эксплуатации двигателя в шаговом режиме без обратных связей; 2) установлено, что при вращении ротора в статорных обмотках ВРД индуцируется противо-ЭДС, величина которой достигает 15 мВ. Индуцированная противо-ЭДС должна учитываться при проектировании коммутационного преобразователя, питающего обмотку ВРД; 3) добавление технологических отверстий в конструкцию ротора способствует снижению его массы и момента инерции, что положительно сказывается на динамических свойствах двигателя; 4) в моменты совпадения зубцов статора и ротора в последних возникают локальные участки значительной concentra-

ции магнитного поля (рис.5), способствующие появлению зон повышенной температуры. При этом наличие вентиляционных каналов улучшит условия конвективного теплообмена ротора с окружающей средой.

ЛИТЕРАТУРА

1. Терзян А.А. Автоматизированное проектирование электрических машин / Терзян А.А. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 256с.
2. Сильвестр П. Метод конечных элементов для радиоинженеров и инженеров-электриков / Сильвестр П., Феррари Р.; пер. с англ. – М.: Мир, 1986. – 229с.
3. Иванов-Смоленский А.В. Электромагнитные силы и преобразование энергии в электрических машинах: учеб. пос. для вузов по спец. „Электромеханика” / Иванов-Смоленский А.В. – М.: Высшая школа, 1989. – 312с.
4. Абрамкин Ю.В. Теория и расчет пондеромоторных и электродвижущих сил и преобразования энергии в электромагнитном поле / Абрамкин Ю.В. – М.: Изд-во МЭИ, 1997. – 208с.
5. Качура А.В. Математическая модель индукционного реостата с учетом насыщения магнитной системы / Качура А.В., С’янов А.М., Сторожко В.С. // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – 2002. – С.376-378.

Поступила в редколлегию 01.09.2015.

УДК 62-83

ДЕРЕЦ А.Л., к.т.н., доцент
САДОВОЙ А.В., д.т.н., профессор

Днепродзержинский государственный технический университет

ОПТИМИЗАЦИЯ ПО БЫСТРОДЕЙСТВИЮ РЕЖИМА «БОЛЬШОГО ТРЕУГОЛЬНИКА» РЕЛЕЙНОЙ СИСТЕМЫ ПЯТОГО ПОРЯДКА МЕТОДОМ N-І ПЕРЕКЛЮЧЕНИЙ

Введение. Релейная система подчинённого регулирования (СПР) положения, синтезированная методом N-і переключений [1], способна сформировать оптимальный по быстродействию процесс позиционирования электропривода с упругой кинематической цепью. Настройки такой системы определяются наибольшими значениями канонических координат, достигаемыми на расчётной траектории позиционирования. В свою очередь, максимумы старших производных ошибки регулирования зависят от формы прогнозируемой траектории, которая варьируется в функции амплитуды задающего воздействия. Перечисленные обстоятельства придают актуальность разработке в рамках метода N-і переключений процедур синтеза СПР, ориентированных на специфику конкретных динамических режимов.

Постановка задачи. Уровень ограничения первой производной положения рабочего органа двухмассовой электромеханической системы (ЭМС) диктуется допустимым максимумом частоты вращения исполнительного вала. Однако данный максимум, рассчитываемый на основании конструктивных характеристик ЭМС, в ряде динамических режимов [2] не может быть достигнут по условиям реализуемости оптимальной по быстродействию переходной траектории. К таким режимам относится, в частности, процесс позиционирования двухмассовой ЭМС, в котором старшие производные положения рабочего органа достигают предустановленных уровней ограничения, а мак-