

# Общая методика исследования электромагнитных процессов вентильного двигателя с изменяемой структурой электромеханического преобразователя

ВИГРИЯНОВ П.Г.

*Проанализированы особенности и разработана общая методика исследования электромагнитных процессов многофазного вентильного двигателя при неполной коммутации фаз разомкнутой обмотки, питающейся от одного источника.*

Ключевые слова: многофазный вентильный двигатель, электромагнитные процессы, структура электромеханического преобразователя

Вентильные двигатели (ВД) постоянного тока нашли широкое применение в системах автоматического регулирования и управления благодаря таким своим преимуществам, как хорошая управляемость, высокие энергетические, массогабаритные и динамические показатели [1–4].

Существует достаточно развитая научная база анализа и проектирования ВД, ориентированная, однако, в основном на машины с малым (не более четырех) числом фаз. Между тем одним из перспективных направлений совершенствования данного класса машин является разработка многофазных ВД, что позволит устранить их основной недостаток – пульсации токовой составляющей электромагнитного момента, увеличить надежность на основе принципов функционального резервирования.

Дальнейшее повышение надежности, улучшение массоэнергетических, точностных и динамических характеристик приводов с ВД возможно главным образом за счет использования новых методов резервирования, применения новых материалов и конструктивных решений при создании электромеханического преобразователя исполнительного элемента. Поскольку ВД с малым числом фаз не позволяют реализовать повышенные требования по надежности электроприводов (вероятность безотказной работы  $p = 0,99999$ , наработка на отказ составляет несколько десятков тысяч часов, срок сохраняемости – до 100 000 ч), а применение двигателей с большим числом фаз ограничивается отсутствием общей методики исследования электромагнитных процессов в нормальных и аварийных режимах работы, то появляется необходимость в разработке новых вариантов построения схем, алго-

*The specific features of electromagnetic processes in a multiphase switched motor during incomplete switching of the phases of an open-circuit winding powered from one source are analyzed, and a general procedure for studying such processes is developed.*

Key words: multiphase switched motor, electromagnetic processes, structure of an electromechanical converter

ритмов коммутации и методов исследования электромагнитных процессов многофазных ВД.

Если в работе вентильного двигателя участвуют все фазы обмотки якоря электромеханического преобразователя, то такую коммутацию назовем полной, если только часть фаз, то такую коммутацию назовем неполной [5]. Из всего набора алгоритмов неполной коммутации для выбранного числа работающих фаз двигателя рассмотрим только наиболее целесообразные с точки зрения обеспечения максимальной эффективности преобразования энергии при минимальной дискретности углового перемещения результирующего вектора МДС обмотки статора по окружности его расточки. При этих условиях выбора алгоритмов неполной коммутации угловой размер импульсов потенциалов напряжений, подаваемых на начало фаз обмотки якоря, зависит от числа работающих фаз  $m$ . Если для варианта полной коммутации этот угол составляет  $\pi$  рад при подключении к шине каждой полярности, то для вариантов неполной коммутации в общем случае  $n$ -фазного двигателя этот угол составляет  $m\pi/n$  рад. Далее следует отключение с выдержкой паузы длительностью  $\pi(n-m)/n$ , после чего на начало фазы подается напряжение обратной полярности.

Использование алгоритмов неполной коммутации в ВД приводит к тому, что структура электромеханического преобразователя изменяется в течение межкоммутационного интервала (МКИ), поэтому его приходится разбивать на участки постоянной структуры. Основная трудность определения границы между участками – невозможность получения аналитического решения трансцендентного уравнения, описывающего значение тока в отключаемой фазе. Этот вопрос исследователи чаще все-

го обходят, принимая различные допущения, пренебрегают, например, индуктивностью обмоток, а если этого сделать нельзя, то задают границу участков ориентировочно, пользуясь своими предположениями [1–3, 6]. По этой причине точность расчетов электромагнитных процессов часто оказывается низкой.

В многофазных ВД по сравнению с трехфазными задача поиска границ участков ещё больше усложняется, поскольку увеличивается число вариантов неполной коммутации и возникает проблема точности вычислений и исследования устойчивости системы.

Появляется необходимость разработки общей методики исследования электромагнитных процессов ВД с любым числом фаз обмотки якоря электромеханического преобразователя при изменении его структуры в процессе работы для различных вариантов схем соединения, способов питания и алгоритмов коммутации фаз обмотки.

Физическая модель электромеханического преобразователя многофазного ВД с возбуждением от постоянных магнитов на роторе аналогична модели

шагового двигателя с активным ротором [7]. Обмотка якоря имеет  $n$  фаз на статоре, магнитные оси фаз равномерно распределены по расточке машины. Магнитные оси двух любых соседних фаз сдвинуты на угол  $\alpha=2\pi/n$ . Схема соединения фаз обмотки – разомкнутая (рис. 1,а). Концы фаз соединены в общую точку. На начало фаз, каждая из которых подключена к средней точке стойки полупроводникового коммутатора, подается напряжение от источника питания. Обмотка питается от одного источника. Схема питания реверсивная.

Падение напряжения на силовых ключах и шунтирующих их диодах в открытом состоянии равно нулю. Сопротивление закрытых ключей в обоих направлениях и диодов в обратном направлении равно бесконечности. Управление ключами происходит по сигналам дискретного датчика положения ротора.

Исследование проводим по мгновенным значениям координат. Для описания процессов в электромеханическом преобразователе необходимо задать общее число фаз обмотки и число фаз, участвующих в работе при заданном алгоритме непол-

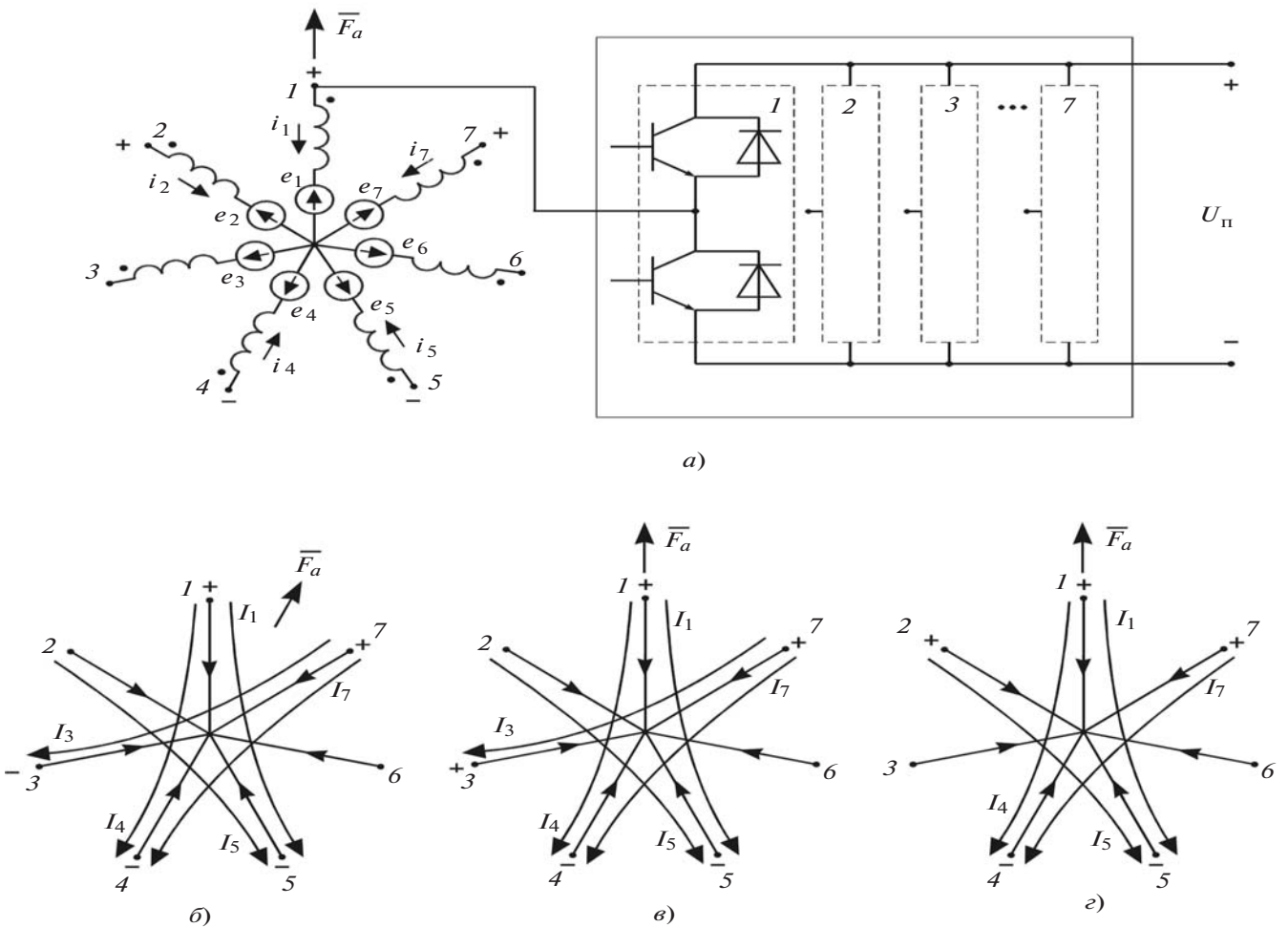


Рис. 1. Схема подключения фаз обмотки семифазного ВД при неполной коммутации пяти фаз (а), на предыдущем МКИ (б), на первом (е) и втором (е) участках исследуемого МКИ

ной коммутации. Рассмотрим электромагнитные процессы в многофазном ВД при соединении фаз в звезду, реверсивном питании фаз от одного источника и неполной коммутации. Двигатель имеет семь фаз ( $n=7$ ), на каждом МКИ к источнику подключаются по пять фаз ( $m=5$ ). Число фаз не выбирается случайно, а является необходимым и достаточным условием для получения рекуррентных соотношений при исследовании электромагнитных процессов электромеханического преобразователя с изменяющейся в течение МКИ структурой.

Схема подключения фаз обмотки приведена на рис. 1,а, где указаны положительные направления фазных токов и ЭДС, полярности питающего напряжения и подключение первой фазы к стойке полупроводникового коммутатора. Для выбранного варианта неполной коммутации начало каждой фазы подключается к шине каждой полярности в течение  $5\pi/7$  рад, а паузы между подключениями к шинам противоположной полярности составляют  $2\pi/7$  рад. При неполной коммутации в нечетном числе фаз потенциал средней точки обмотки изменяется в течение МКИ, поскольку отличается число фаз, подключенных к шинам разной полярности. По этой причине расчет цепей удобнее проводить методом контурных токов. В общем случае при постоянном числе независимых контуров выбор обозначений и положительных направлений контурных токов не вызывает затруднений. В нашем случае число фаз может быть любым, поэтому при выборе контуров нужно использовать общий формальный подход для их формирования, обозначения направлений контурных токов и контурных ЭДС. Для реализации такого подхода потребуем выполнения следующих условий:

в каждый контур должно быть включено одинаковое число фаз;

параметры контуров ( $R_k$ ,  $L_k$ ) должны быть одинаковы;

положительное направление всех контурных токов — от плюса к минусу источника питания;

амплитуды контурных ЭДС должны быть одинаковы, фазовый сдвиг между векторами контурных ЭДС должен быть одинаков;

формирование контуров начинаем с первой фазы; номер контура и номер контурного тока соответствует номеру фазы, которая при обходе расположена на первом месте.

Для реализации двух последних условий воспользуемся специальной коммутационной функцией  $SDB$ , значение которой при нечетном числе фаз обмотки находится как

$$SDB = (n+1)/2,$$

для нашего примера  $SDB=4$ .

Подробное описание, обоснование и применение специальной коммутационной функции  $SDB$  приведены в [8]. Получена она исходя из того, что в установившемся режиме работы двигателя электромагнитные процессы в обмотке якоря на смежных МКИ протекают одинаково. С помощью функции  $SDB$  описывается связь между теми фазами обмотки якоря, в которых электромагнитные процессы на любых смежных МКИ протекают одинаково. Функция представляет собой постоянное число, ее значение зависит только от числа фаз обмотки якоря. С помощью этой функции проводится, например, расчет алгоритмов полной и неполной коммутации ВД с любым числом фаз.

Изобразим каждую ветвь схемы в виде ветви графа, определим число контурных токов и их направление на предыдущем МКИ (рис. 1,б), на первом (рис. 1,в) и втором (рис. 1,г) участках исследуемого МКИ.

На первом участке коммутируются две фазы. К положительной шине источника подключается одна фаза (в нашем примере — фаза 2), одна фаза отключается от отрицательной шины. Поскольку отключаемая фаза обладает запасом энергии, то она через обратный клапан подключается к шине противоположной полярности (в примере — фаза 3); ЭМП имеет пять контуров и описывается системой уравнений:

$$\begin{aligned} U &= 2(Lp+r)I_1 + (Lp+r)(I_4 + I_5) + e_1 - e_5; \\ 0 &= 2(Lp+r)I_3 + (Lp+r)I_7 + e_7 - e_3; \\ U &= 2(Lp+r)I_4 + (Lp+r)(I_1 + I_7) + e_1 - e_4; \\ U &= 2(Lp+r)I_5 + (Lp+r)I_1 + e_2 - e_5; \\ U &= 2(Lp+r)I_7 + (Lp+r)(I_3 + I_4) + e_7 - e_4, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $U$  — напряжение источника питания;  $r$  — активное сопротивление фазы обмотки якоря;  $L$  — индуктивность фазы с учетом взаимной индуктивности от других фаз [3];  $I_k$  — контурные токи;  $e_k$  — мгновенные значения фазных ЭДС.

Считаем, что значения ЭДС фаз изменяются по гармоническому закону, тогда для первой, второй и в общем случае  $k$ -й фазы мгновенные значения ЭДС по первой (основной гармонике) определяются как

$$\begin{aligned} e_1 &= E_m \cos(\omega_p - \gamma); \\ e_2 &= E_m \cos(\omega_p - \gamma - 2\pi/n); \\ &\dots \\ e_k &= E_m \cos(\omega_p - \gamma - 2\pi(k-1)/n), \end{aligned} \quad (2)$$

где  $E_m$  — максимальное значение ЭДС фазы;  $\omega_p$  — угловая частота вращения ротора;  $\gamma$  — угол между

продольной осью индуктора и плоскостью фазы  $I$  в начале МКИ:

$$\gamma = \theta_y + \Delta / 2 + \psi.$$

Здесь  $\theta_y$  – угол управления коммутацией;  $\Delta = \pi / n$  – угол, соответствующий длительности МКИ;  $\psi$  – угол между осью фазы  $I$  и установившимся результирующим вектором МДС якоря.

При этом никаких требований к форме ЭДС методика не предъявляет. В случае необходимости любая повторяющаяся форма ЭДС может быть описана с необходимой степенью точности суммой гармоник (разложена в ряд Фурье), каждая из которых имеет свои весовые коэффициенты.

На втором участке после затухания тока в отключаемой фазе имеем четыре контурных тока:

$$\begin{aligned} U &= 2(Lp+r)I_1 + (Lp+r)(I_4 + I_5) + e_1 - e_5; \\ U &= 2(Lp+r)I_4 + (Lp+r)(I_1 + I_7) + e_1 - e_4; \\ U &= 2(Lp+r)I_5 + (Lp+r)I_1 + e_2 - e_5; \\ U &= 2(Lp+r)I_7 + (Lp+r)(I_3 + I_4) + e_7 - e_4; \end{aligned} \quad (3)$$

Поскольку (1) и (3) записаны для контурных токов, целесообразно ввести в них контурные ЭДС:

$$\begin{aligned} E_1 &= (e_1 - e_5); \\ E_3 &= (e_7 - e_3); \\ E_4 &= (e_1 - e_4); \\ E_5 &= (e_2 - e_5); \\ E_7 &= (e_7 - e_4). \end{aligned} \quad (4)$$

Следующий вопрос – выявление повторяющихся закономерностей при решении системы дифференциальных уравнений (1). Сначала систему нужно решить относительно контурных токов. Следует отыскать такой путь решения, чтобы процесс расчета был непрерывным при любом числе уравнений системы. Потребуем проводить обход контуров в такой последовательности, чтобы электрическая цепь не прерывалась. Это требование выполняется, если обход начать с того контура, в который входит подключаемая фаза, тогда номер каждого последующего контура отличается на значение специальной коммутационной функции  $SDB$ . Последним будет номер контура, который содержит отключаемую фазу.

Запишем уравнения в системе (1) в указанном порядке, тогда

$$\begin{aligned} U &= 2(Lp+r)I_5 + (Lp+r)I_1 + E_5; \\ U &= 2(Lp+r)I_1 + (Lp+r)(I_4 + I_5) + E_1; \\ U &= 2(Lp+r)I_4 + (Lp+r)(I_1 + I_7) + E_4; \\ U &= 2(Lp+r)I_5 + (Lp+r)I_1 + e_2 - e_5; \\ 0 &= 2(Lp+r)I_7 + (Lp+r)(I_3 + I_4) + E_7; \\ 0 &= 2(Lp+r)I_3 + (Lp+r)I_7 + E_3. \end{aligned} \quad (5)$$

Для придания результатам большей обобщенности перейдем к относительным единицам. Введем обозначения относительной частоты вращения, относительного индуктивного сопротивления при текущей частоте вращения ротора и оператора дифференцирования по углу:

$$V = \frac{E_m}{U_n}; \quad \tau = \frac{\omega_p L}{r}; \quad p = \frac{d}{d\theta_p}.$$

Для первого участка МКИ

$$\begin{aligned} u_5 &= 2(1+\tau p)i_5 + (1+\tau p)i_1 + e_{k(5)}; \\ u_1 &= 2(1+\tau p)i_1 + (1+\tau p)(i_1 + i_5) + e_{k(1)}; \\ u_4 &= 2(1+\tau p)i_4 + (1+\tau p)(i_1 + i_7) + e_{k(4)}; \\ u_7 &= 2(1+\tau p)i_7 + (1+\tau p)(i_3 + i_4) + e_{k(7)}; \\ 0 &= 2(1+\tau p)i_3 + (1+\tau p)i_7 + e_{k(3)}. \end{aligned} \quad (6)$$

За базовые напряжение, ток, мощность примем:

$$U_6 = U_n; \quad I_6 = \frac{U_n}{r}; \quad P_6 = \frac{U_n^2}{r}.$$

На втором участке получаем такую же систему, но при отсутствии последнего уравнения в связи с затуханием тока в отключаемой фазе.

Введем упрощающие обозначения:

$$(1+\tau p) = a; \quad u_k - e_{k(k)} = b_k;$$

система (6) будет иметь вид:

$$\begin{aligned} b_5 &= 2ai_5 + ai_1; \\ b_1 &= 2ai_1 + a(i_5 + i_4); \\ b_4 &= 2ai_4 + a(i_1 + i_7); \\ b_7 &= 2ai_7 + a(i_4 + i_3); \\ b_3 &= 2ai_3 + ai_7. \end{aligned}$$

Для того чтобы решить эту систему относительно токов и их производных, используем метод исключения переменных. Из первого уравнения находим тот ток, который входит во второе, и подставляем его в это уравнение; из второго уравнения ток, входящий в третье, и так далее до последнего уравнения. Решаем его относительно одного оставшегося тока (в примере  $i_5$ ):

$$\begin{aligned} ai_1 &= -2ai_5 + c_5; \\ ai_4 &= +3ai_5 + c_1; \\ ai_7 &= -4ai_5 + c_4; \\ ai_3 &= +5ai_5 + c_7; \\ 0 &= -6ai_5 + c_4. \end{aligned} \quad (7)$$

Учитывая, что в системе присутствуют только токи независимых контуров, а не всех возможных в



схеме, считаем отсутствующие токи равными нулю. Исходя из этого, задаем выражения  $c_2$  и  $c_6$ , по которым вычислялись бы отсутствующие токи ( $i_2$  и  $i_6$ ), также равными нулю и включаем их в расчет для обобщения и более четкого выявления связей в последовательности вычислений:

$$\begin{aligned} c_5 &= -2c_2 - c_6 + b_5; \\ c_1 &= -2c_5 - c_2 + b_1 = -2b_5 + b_1; \\ c_4 &= -2c_1 - c_5 + b_4 = +3b_5 - 2b_1 + b_4; \\ c_7 &= -2c_4 - c_1 + b_7 = -4b_5 + 3b_1 - 2b_4 + b_7; \\ c_3 &= -2c_7 - c_4 + b_3 = +5b_5 - 4b_1 + 3b_4 - 2b_7 + b_3. \end{aligned} \quad (8)$$

Из (8) хорошо видно, что выражения  $c_k$  вычисляются в последовательности обхода контуров схемы обмотки ЭМП. Первое выражение требует знания только значения величины  $b_5$ , входящей в данный контур. Для второго контура, кроме  $b_1$ , необходимо знание и предыдущей величины  $b_5$ , а для третьего (и всех последующих) при вычислении выражений  $c_k$  используют два предыдущих значения выражений  $c_1$  и  $c_5$ . Такая периодичность вычислений обнаруживается при наличии не менее четырех контуров и может быть распространена на любое число контуров. Показанная особенность вычислений позволяет предварительно аналитически отыскать и проинтегрировать выражения  $b_k$  для каждого контура на всех участках МКИ:

$$\int_0^{\theta_p} b_k e^{\frac{\theta_p}{\tau} d\theta_p}; \int_{\theta_0}^{\theta_p} b_k e^{\frac{\theta_p}{\tau} d\theta_p}. \quad (9)$$

Из последнего уравнения системы (7) находим ток через отключаемую фазу и выполняем обратную подстановку последовательно в остальные четыре уравнения. В результате получаем систему, решенную относительно контурных токов:

$$\begin{aligned} (1 + \tau p)i_5 &= c_3 / 6 = d_5; \\ (1 + \tau p)i_1 &= -2d_5 + c_5 = d_1; \\ (1 + \tau p)i_4 &= +3d_5 + c_1 = d_4; \\ (1 + \tau p)i_7 &= -4d_5 + c_4 = d_7; \\ (1 + \tau p)i_3 &= +5d_5 + c_7 = d_3. \end{aligned} \quad (10)$$

Вычисляем контурные токи в последовательности расположения уравнений. При этом для нахождения правой части каждого последующего уравнения достаточно знать значения  $d_k$  первого уравнения и  $c_k$  предыдущего. Значение множителя перед  $d_k$  определяется порядковым положением уравнения в системе, а его знак меняется при переходе к каждому последующему уравнению.

Решение каждого уравнения имеет вид:

$$i_k = c_{(k)} + i_{k0} e^{-\frac{\theta_p}{\tau}}. \quad (11)$$

Первое слагаемое определяется с использованием уже известных нам базовых интегралов (9) в соответствии с (8) и (10);  $i_{k0}$  — постоянная интегрирования, определяемая из начальных условий.

Система для второго участка МКИ решается аналогично:

$$i'_k = c'_{(k)} + i'_{k0} e^{-\frac{\theta_p - \theta_0}{\tau}}. \quad (12)$$

Отличаются границы интервала интегрирования, система содержит на одно уравнение меньше, иначе определяются начальные условия.

Начальные условия на первом участке определяет равенство фазных токов на смежных МКИ (рис. 1, б-г). Связь между контурными токами предыдущего интервала и второго участка исследуемого МКИ в общем случае выражается зависимостью

$$i'_k = i''_k (k - SDB). \quad (13)$$

В нашем примере

$$\begin{aligned} i'_{10} &= -i''_{4(\Delta)}; \quad i'_{20} = -i''_{5(\Delta)}; \quad i'_{30} = -i''_{6(\Delta)}; \\ i'_{40} &= -i''_{7(\Delta)}; \quad i'_{50} = -i''_{1(\Delta)}; \quad i'_{70} = -i''_{3(\Delta)}. \end{aligned}$$

С учетом этого условия находим соотношение между контурными токами в конце предыдущего МКИ ( $i''_{k(\Delta)}$ ) с конечными токами второго участка ( $i'_{k(\Delta)}$ ) и начальными токами в начале исследуемого ( $i'_{k0}$ ):

$$\begin{aligned} i''_5 &= -i'_{2(\Delta)} = c'_{2(\Delta)} + i'_{20} e^{-\frac{\Delta - \theta_0}{\tau}} = i_{50}; \\ i''_1 &= -i'_{5(\Delta)} = c'_{5(\Delta)} + i'_{50} e^{-\frac{\Delta - \theta_0}{\tau}} = i_{10}; \\ i''_4 &= -i'_{1(\Delta)} = c'_{1(\Delta)} + i'_{10} e^{-\frac{\Delta - \theta_0}{\tau}} = i_{40}; \\ i''_7 &= -i'_{4(\Delta)} = c'_{4(\Delta)} + i'_{40} e^{-\frac{\Delta - \theta_0}{\tau}} = i_{70}; \\ i''_3 &= -i'_{7(\Delta)} = c'_{7(\Delta)} + i'_{70} e^{-\frac{\Delta - \theta_0}{\tau}} = i_{30}. \end{aligned} \quad (14)$$

Но начальные токи второго участка зависят от начальных токов первого участка и определяются из условия затухания до нуля текущего значения тока в отключаемой фазе при повороте ротора на угол  $\theta_p = \theta_0$ :

$$i_2(\theta_0) = c_2(\theta_0) + i_{20} e^{-\frac{\theta_0}{\tau}} = i'_{20};$$

$$i_5(\theta_0) = c_5(\theta_0) + i_{50} e^{-\frac{\theta_0}{\tau}} = i'_{50};$$

.....

$$i_7(\theta_0) = c_7(\theta_0) + i_{70} e^{-\frac{\theta_0}{\tau}} = i'_{70}.$$

Эти соотношения подставляем в (14) и с учетом (13) получаем рекуррентную последовательность вычисления начальных токов. Первым в эту систему добавим уже известный нам начальный ток контура, содержащего подключаемую фазу:

$$i_{20} = 0;$$

$$i_{50} = \left[ c_2(\Delta) + c'_2(\theta_0) e^{-\frac{\Delta - \theta_0}{\tau}} + i_{20} e^{-\frac{\Delta}{\tau}} \right];$$

$$i_{10} = \left[ c_5(\Delta) + c'_5(\theta_0) e^{-\frac{\Delta - \theta_0}{\tau}} + i_{50} e^{-\frac{\Delta}{\tau}} \right];$$

.....

$$i_{70} = \left[ c_4(\Delta) + c'_4(\theta_0) e^{-\frac{\Delta - \theta_0}{\tau}} + i_{40} e^{-\frac{\Delta}{\tau}} \right];$$

$$i_{30} = \left[ c_7(\Delta) + c'_7(\theta_0) e^{-\frac{\Delta - \theta_0}{\tau}} + i_{70} e^{-\frac{\Delta}{\tau}} \right].$$

Полученные закономерности для любого числа контуров можно записать в виде

$$i_{k0} = \left[ c_{J(\Delta)} + c'_J(\theta_0) e^{-\frac{\Delta - \theta_0}{\tau}} + i_{J0} e^{-\frac{\Delta}{\tau}} \right], \quad (15)$$

где  $J = k - SDB$ .

Последнее уравнение системы определяет начальный ток контура, содержащего отключаемую фазу. Его состояние по окончании переходных процессов после отключения от источника питания нам известно. Остается только определить, когда наступит этот момент времени. Это зависит от состояния и параметров контура, частоты вращения и электромагнитных связей между контурами.

При организации вычислительного процесса задаем начальное значение аргумента на МКИ равным нулю и вычисляем последовательно все начальные контурные токи, а затем ток в отключаемой фазе. Далее задаем определенный шаг изменения аргумента в пределах МКИ и повторяем вычисления. Положение ротора, соответствующее первому переходу через нуль тока отключаемой фазы, определяется сравнением знаков текущего значения тока с предыдущим. Выбор шага должен обеспечить определение всех корней уравнения. После этого путем итераций определяем с необхо-

димой точностью угол затухания тока  $\theta_p = \theta_0$ . Одновременно находим значения начальных токов на каждом участке МКИ. В случае, когда этот угол выходит за пределы МКИ ( $\theta_0 > \Delta$ ), констатируем нарушение алгоритма коммутации.

После определения контурных токов переходим к токам фазным, расчет можно продолжать в естественных фазных координатах. По мгновенным значениям координат определяются интересующие разработчика параметры или характеристики двигателя.

На основе выражений (1)–(15) реализуется удобная для компьютерного моделирования математическая модель многофазного ВД с изменяемой структурой электрохимического преобразователя.

В связи с ограниченным объемом статьи методика не ориентирована на получение конкретных результатов исследований электромагнитных процессов, их анализ, применимость для оптимального проектирования ВД. Но она дает возможность решать такие задачи, поскольку позволяет устанавливать зависимость между переменными (ограничения) и пределы изменения искомым переменных (граничные условия). Таким образом, с ее помощью можно получить две из трех составляющих математической модели задачи поиска оптимального решения. Определение целевой функции (или критерия оптимальности) при постановке задачи оптимизации будет зависеть от построения схемы ВД и условий работы привода.

Предложенные в статье идеи были реализованы и при исследовании ВД с другими способами питания обмотки якоря: от двух источников, соединенных разноименными шинами, подключенными к средней точке обмотки; для гальванически развязанных фаз.

Предлагаемая методика была применена при разработке пакета программ расчета энергетических параметров многофазных ВД при неполной коммутации. Для примера результаты расчета проиллюстрированы зависимостями на рис. 2. В одном варианте на каждом такте коммутации к источнику питания подключаются три фазы обмотки ( $m=3$ ), во втором – пять ( $m=5$ ). На характеристиках все переменные даны в относительных единицах. При расчете энергетических параметров двигателя относительное индуктивное сопротивление фазы обмотки удобно представить в виде

$$\tau = \frac{\omega_p L}{r} = \frac{\omega_6 L \omega_p}{r \omega_6} = \xi V,$$

где  $\omega_6$  – базовое значение частоты вращения (соответствующее режиму идеального холостого хода);  $\xi$  – относительное индуктивное сопротивление фазы при  $\omega_6$ .

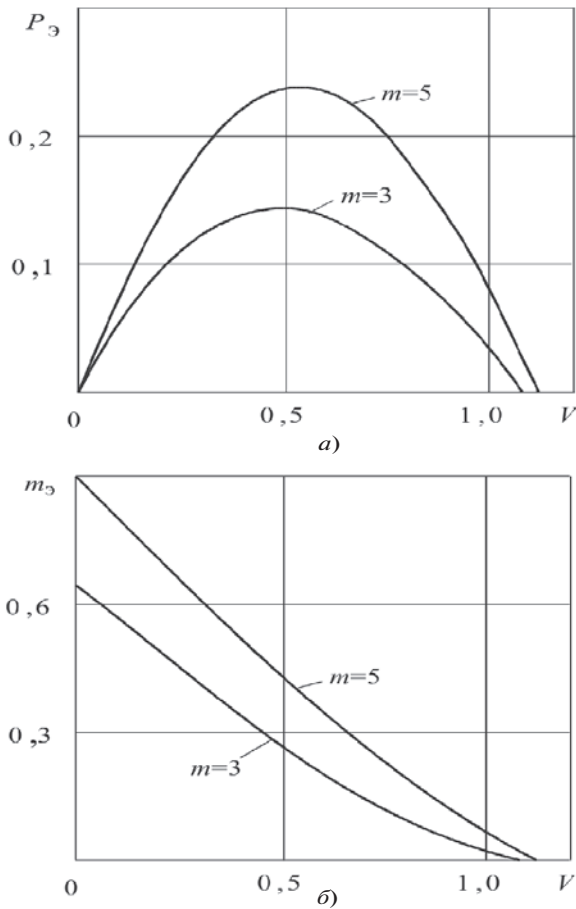


Рис. 2. Зависимость электромагнитной мощности от частоты вращения (а) и механические характеристики (б) семифазного двигателя при неполной коммутации трех и пяти фаз ( $\xi = 0,5$ )

В первую очередь при заданной частоте вращения вычисляется угол поворота ротора  $\theta_0$ , соответствующий моменту затухания тока в отключаемой фазе, т.е. определяются границы первого и второго участков МКИ, затем вычисляются контурные и фазные координаты. По мгновенным значениям фазных координат рассчитываются энергетические параметры ВД ( $P_1, P_э, \mu_э$ ) и среднее значение электромагнитного момента  $m_э$  на одном МКИ каким-либо из методов численного интегрирования, например методом Симпсона.

Поскольку в случаях неполной коммутации ( $m < n$ ) структура ЭМП изменяется в течение МКИ, то интегрирование ведется по каждому участку отдельно. Потребляемая  $P_1$  и электромагнитная  $P_э$  мощности исправной машины в относительных единицах находятся по выражениям:

$$P_1 = \frac{1}{\Delta} \left( \int_0^{\theta_0} F_1 d\theta_p + \int_{\theta}^{\Delta} F_1' d\theta_p \right);$$

$$P_э = \frac{1}{\Delta} \left( \int_0^{\theta_0} F_2 d\theta_p + \int_{\theta}^{\Delta} F_2' d\theta_p \right),$$

где  $\Delta$  – длительность МКИ;  $\theta_0$  – угол поворота ротора, соответствующий границе участков МКИ.

Относительные значения среднего электромагнитного момента и электромагнитного КПД:

$$m_э = \frac{P_э}{V}; \quad \eta_э = \frac{P_2}{P_1}.$$

При питании разомкнутой обмотки от одного источника подынтегральные функции  $F_1$  и  $F_1'$  представляют собой сумму токов тех фаз, которые подключены к положительной (или отрицательной) шине источника питания; функции  $F_2$  и  $F_2'$  равны сумме произведений относительных мгновенных значений токов и ЭДС тех фаз, которые работают на данном участке МКИ.

**Доказательства положений статьи.** Для проверки адекватности методики при полной и неполной коммутации обмотки сопоставлялись результаты, полученные по предложенной методике расчета, с результатами, найденными методом непосредственного интегрирования уравнений электромагнитных процессов на примере трехфазного двигателя с коммутацией  $180^\circ$  и  $120^\circ$  при одинаковых эквивалентных значениях индуктивностей фаз. Для этого относительные значения частоты вращения, мощности и индуктивных сопротивлений приведены к единой системе базовых величин. Относительная погрешность расчета потребляемой мощности  $P_1$  и электромагнитной мощности  $P_э$  при полной коммутации для  $\xi = 0,8$  не превышает 1,2%, при неполной коммутации – 2%.

Методика является основой, на которой были разработаны пакеты прикладных программ для исследования электромагнитных процессов многофазных ВД в нормальных и аварийных режимах работы. По программам были рассчитаны энергетические характеристики многофазных ВД с числом фаз от 3 до 33. Достоверность результатов расчета подтверждена данными экспериментальных исследований макетных образцов двигателей с числом фаз 3, 6, 11, что говорит о состоянии предложенной методики исследования и принятой математической модели.

Примером применения методики служат разработка вентильного привода повышенной надежности и создание опытной серии бесконтактных электроприводов предприятием «ЦСКБ ПРОГРЕСС» (г. Самара). В качестве исполнительных элементов резервированного электропривода рассматривалось применение трехфазных и шестифазных ВД. Обмотки якоря двигателей с гальванически развязанными фазами были выполнены распределенными, с укороченным шагом и скосом пазов, что обеспечивало синусоидальность формы

фазных ЭДС. Ресурсные испытания подтвердили расчетные показатели вероятности безотказной работы и наработки на отказ испытуемых двигателей. После комплексных испытаний концепция построения приводов принята предприятием за базовую в перспективных разработках.

Результаты выполненных по данной методике расчетов в совокупности с техническими решениями были использованы предприятием ВНИИЭМ (г. Миасс) при разработке опытной серии вентильных электроприводов специализированных механизмов. Так, в безредукторном варианте электропривода был использован 11-фазный ВД, удовлетворяющий показателям безотказности и долговечности, энергетическим параметрам и уровню пульсаций электромагнитного момента. Обмотка якоря двигателя выполнена сосредоточенной, магниты имели прямоугольную форму, форма ЭДС – трапецеидальная.

Применение общей методики позволяет при разработке вентильного привода проводить обоснованный выбор алгоритмов неполной коммутации на основе анализа получаемых энергетических параметров, а также определять ограничения и граничные условия, необходимые в дальнейшем для поиска оптимального решения вариантов исполнения вентильного привода. При этом время разработки многофазных ВД может быть сокращено на 35% и на 40% уменьшен объем макетирования привода.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Балагуров В.А., Гридин В.М., Лозенко В.К. Бесконтактные двигатели постоянного тока. — М.: Энергия, 1975.
2. Овчинников И.Е., Лебедев Н.И. Бесконтактные двигатели постоянного тока. — Л.: Наука, 1979.
3. Воронин С.Г., Лифанов В.А., Шумихин Б.Г. Исследование пульсаций момента тихоходных бесконтактных двигателей постоянного тока с дискретным датчиком положения ротора. — Электричество, 1977, № 11.
4. Дубенский А.А. Бесконтактные двигатели постоянного тока. — М.: Энергия, 1967.
5. Вигриянов П.Г., Воронин С.Г. Алгоритмы управления коммутацией секций исполнительного элемента дискового магнитной памяти. — Межвуз. сб. трудов. — Рязань: Изд-во РРТИ, 1986.
7. Дискретный электропривод с шаговыми двигателями/Под ред. М.Г. Чиликина. — М.: Энергия, 1971.
6. Высоцкий В.Е. Операторно-рекуррентные модели вентильных двигателей-генераторов с позиционно-зависимым управлением. — Изв. вузов. Электромеханика, 2005, № 6.
8. Вигриянов П.Г. Электромагнитные процессы многофазных вентильных двигателей. — Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2007.

[24.04.12]

*Автор: Вигриянов Павел Георгиевич в 1975 г. окончил факультет автоматики и электромеханики Томского политехнического института (ТПИ). В 1989 г. защитил в ТПИ кандидатскую диссертацию «Работоспособность и характеристики многофазных вентильных двигателей». Доцент кафедры «Электрооборудование и автоматизация производственных процессов» Южно-Уральского государственного университета, филиал в г. Златоусте.*

\* \* \*

## ЧИТАТЕЛЯМ, ПОДПИСЧИКАМ, РЕКЛАМОДАТЕЛЯМ ЖУРНАЛА «ЭЛЕКТРИЧЕСТВО»

Подписка в России и странах СНГ принимается в отделениях связи.

Для желающих представить в журнал статью сообщаем, что правила подготовки рукописей публикуются в №№ 6 и 12 каждого года.

Реклама в черно-белом изображении может быть размещена на страницах журнала и на его обложке, а также в виде вкладки.

Возможно размещение рекламы в цветном изображении (стоимость по договоренности).

При повторении той же рекламы в следующем номере — скидка 10%. При публикации той же рекламы в третьем и последующих номерах — скидка 20%. Стоимость оплаты рекламных статей — по договоренности. Последний срок представления рекламного материала — за 1,5 месяца до выхода номера из печати (обычно номер выходит в середине каждого месяца).

Адрес для переписки: 101000 Москва, Главпочтамт, а/я 648

тел./факс: (7-495)362-7485

E-mail: l.s.kudinova@rambler.ru