

ПУЛЬСАЦИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО МОМЕНТА МНОГОФАЗНЫХ ВЕНТИЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ В АВАРИЙНЫХ РЕЖИМАХ РАБОТЫ

П.Г. Вигриянов

(Филиал Южно-Уральского государственного университета, г. Златоуст)

Приведены результаты расчётов пульсаций электромагнитного момента многофазных управляемых вентильных двигателей (ВД) с гальванически развязанными фазами обмотки якоря в нормальных и аварийных режимах работы. Проведена количественная оценка величины пульсаций токовой составляющей электромагнитного момента для четырёх видов отказов элементов силовой части ВД при постоянной частоте вращения и регулировании угла управления коммутацией в пределах одного межкоммутационного интервала. Предложены аппроксимирующие зависимости относительных пульсаций электромагнитного момента от числа фаз двигателя для отстающей, нейтральной и опережающей коммутаций.

Ключевые слова: многофазные вентильные двигатели, электромагнитный момент, пульсации момента, отказ элементов, обрыв ключа коммутатора, короткое замыкание ключа коммутатора, обрыв фазы электромеханического преобразователя, короткое замыкание фазы электромеханического преобразователя.

Применение управляемых вентильных двигателей (ВД) в следящих системах с широким диапазоном регулирования или в непосредственном приводе высококачественных магнитофонов и дисководов требует тщательного исследования величины пульсаций электромагнитного момента в зависимости от числа фаз и способов их коммутации, величины индуктивности обмотки, формы фазных ЭДС, угла управления коммутацией [1 – 3]. В научной и технической литературе чаще всего рассматриваются конкретные варианты исполнения ВД и проводится исследование влияния одного из этих факторов на характеристики исправной машины.

В машинах малой мощности обычно пренебрегают индуктивным сопротивлением фаз обмотки [1], и оценивается величина пульсаций ЭДС для номинального режима работы в зависимости от схемы соединения и числа фаз обмотки. Оценка проводится только для одной частоты вращения.

Повышенные требования по надёжности двигателя и величине пульсаций электромагнитного момента могут быть удовлетворены путём увеличения числа фаз электромеханического преобразователя. При этом критериями оптимальности выступают составляющие надёжности (безотказность и сохраняемость) в различных их сочетаниях и соответствующие этим составляющим показатели надёжности (чаще всего это вероятность безотказной работы (например $p = 0,9990 - 0,99999$), наработка до отказа (например 15 000 – 20 000 ч), средний срок сохраняемости (например 12 – 20 лет). Выполнить такие требования по надёжности двигателя при современном уровне развития электромашиностроения для исправного состояния машины невозможно, однако они могут быть обеспечены, если допустить в многофазных ВД отказ одного или нескольких элемен-

тов. Для определения работоспособного состояния двигателя при отказах необходимо иметь количественную оценку энергетических параметров, выходных координат двигателя. Величина пульсаций токовой составляющей электромагнитного момента часто является критерием оценки работоспособности многофазных ВД и определяет выбор схемы соединения, способа питания, числа фаз обмотки якоря электромеханического преобразователя и алгоритмов коммутации.

Постановка задачи

Требуется оценить величину пульсаций электромагнитного момента управляемых многофазных ВД с гальванически развязанными фазами обмотки якоря при полной коммутации для исправной машины и при отказах элементов силовой части.

Число фаз обмотки якоря n будем выбирать, исходя из условия получения минимального уровня пульсаций токовой составляющей электромагнитного момента. По этой причине число фаз должно быть нечётным, а их количество будем варьировать от трёх до одиннадцати. При рассмотрении вопроса будем пользоваться результатами расчёта мгновенных значений координат многофазных ВД в нормальных и аварийных режимах работы с помощью пакета программ, разработанного на основе методики, изложенной в [6].

Сначала рассмотрим поведение мгновенного значения электромагнитного момента на примере исправной трёхфазной машины в случае, когда пренебрегаем индуктивным сопротивлением обмотки якоря (идеализированный ВД) при различных значениях угла управления коммутацией θ_y . Для исследования поведения электромагнитного момента исправного двигателя достаточно рассмотреть

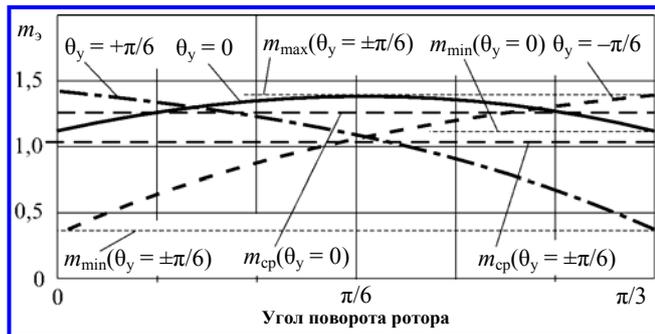


Рис. 1. Диаграммы электромагнитного момента для запаздывающей ($\theta_y = -\pi/6$), нейтральной ($\theta_y = 0$) и опережающей ($\theta_y = +\pi/6$) коммутаций идеализированного ($\xi = 0$) трёхфазного ВД при $V = 0,4$

физические процессы на одном межкоммутационном интервале (МКИ), длительность которого при реверсивном питании нечётного числа фаз обмотки определяется как $\Delta = \pi/n$.

На рис. 1 приведены диаграммы моментов для случаев нейтральной ($\theta_y = 0$), отстающей и опережающей коммутаций. Максимальную величину угла управления коммутацией (и опережающей, и отстающей) принимаем равной половине МКИ ($\theta_y = \pm\pi/6$). Закон распределения индукции по расточке машины принимаем синусоидальным. Максимального значения при нейтральной коммутации электромагнитный момент исправного двигателя достигает в середине МКИ. Это соответствует положению индуктора, при котором вектор его магнитного поля перпендикулярен вектору поля обмотки якоря. Кривая момента симметрична относительно этого положения ротора (индуктора). Пунктирной линией показано среднее на МКИ значение момента m_{cp} при нейтральной коммутации. Неравномерность электромагнитного момента обычно оценивается коэффициентом пульсации равным отношению амплитуды переменной составляющей момента к его среднему значению. Величина отклонения мгновенного значения момента считается одинаковой, что справедливо, если кривая момента симметрична относительно среднего значения. В реальных вентильных двигателях, особенно в аварийных ре-

жимах работы, такой симметрии не наблюдается. В таких случаях неравномерность электромагнитного момента будем оценивать по разности максимального m_{max} и минимального m_{min} моментов:

$$\Delta m = m_{max} - m_{min}$$

или по отношению этой разности к среднему моменту m_{cp} , выраженному в процентах:

$$\Delta m, \% = 100(m_{max} - m_{min})/m_{cp}.$$

Так даже в идеализированном двигателе при нейтральной коммутации отклонение мгновенного значения момента от его среднего значения (см. рис. 1) в большую и меньшую сторону отличаются по величине ($\Delta m_{max} = +0,11$; $\Delta m_{min} = -0,16$). При относительной частоте вращения $V = 0,4$ среднее значение электромагнитного момента на межкоммутационном интервале составляет $m_{cp} = 1,288$, а величина пульсаций $\Delta m = 0,268$ (или 20,8%). В случаях запаздывающей ($\theta_y = -\pi/6$) или опережающей ($\theta_y = +\pi/6$) коммутации электромагнитный момент монотонно убывает или монотонно возрастает. В обоих случаях среднее значение момента в трёхфазной машине уменьшается до $m_{cp} = 1,036$, и неравномерность электромагнитного момента увеличивается до $\Delta m = 0,985$ (или 95%). С увеличением числа фаз эти закономерности сохраняются, но снижается влияние угла управления коммутацией при его изменении в пределах одного МКИ ($\theta_y = \pm\Delta/2$). Например в одиннадцатифазной машине при запаздывающей и опережающей коммутации ($\theta_y = \pm\pi/22$), по сравнению с нейтральной, среднее значение момента уменьшается с $m_{cp} = 4,789$ до $m_{cp} = 4,507$, а пульсации электромагнитного момента увеличиваются с $\Delta m = 0,072$ (1,5%) до $\Delta m = 0,535$ (11,9%) при регулировании угла управления коммутацией в пределах МКИ. Если принять величину угла управления такой же, как в трёхфазной машине ($\theta_y = \pm\pi/6$), то момент уменьшается до $m_{cp} = 3,854$, а неравномерность момента увеличивается до $\Delta m = 0,95$ (24,6%).

Форма фазного тока при отсутствии индуктивного

Таблица 1

Электромагнитный момент идеализированных ВД при $V = 0,4$

Величина момента на МКИ	Число фаз двигателя, n					Примечание
	3	5	7	9	11	
Максимальная m_{max}	1,400	2,236	3,094	3,871	4,827	$\xi = 0$; $\theta_y = 0$
Средняя m_{cp}	1,288	2,177	3,048	3,919	4,789	
Минимальная m_{min}	1,132	2,078	2,981	3,959	4,755	
Пульсации Δm	0,268	0,158	0,113	0,087	0,072	
Пульсации $\Delta m, \%$	20,8	7,25	3,70	2,22	1,50	

сопротивления определяется формой результирующего фазного напряжения, которое определяется как разность между питающим напряжением и ЭДС вращения. Форма кривой электромагнитного момента и величина его пульсаций полностью зависит от формы и пульсаций фазных токов.

В табл. 1 приведены результаты обработки расчётов момента для машин с разным числом фаз для случая нейтральной коммутации при одинаковой частоте вращения. Увеличение числа фаз ведёт к пропорциональному увеличению среднего электромагнитного момента двигателя и пропорциональному уменьшению величины пульсаций момента, выраженной в относительных единицах. Если величину пульсаций оценивать в процентах, то пульсации уменьшаются пропорционально квадрату числа фаз.

В работе [6] показано, что подавляющее большинство отказов элементов схемы многофазных ВД можно свести к четырём видам отказов элементов силовой части двигателя: обрыв силового ключа полупроводникового коммутатора (ОК); короткое замыкание силового ключа полупроводникового коммутатора (КК); обрыв фазы электромеханического

преобразователя (ОФ); короткое замыкание фазы электромеханического преобразователя (КФ). По характеру проявления отказов их можно разделить на два вида: отказы типа «обрыв» (это ОК и ОФ) и отказы типа «короткое замыкание» (КК и КФ).

Математические модели многофазных ВД с возбуждением от постоянных магнитов аналогичны математическим моделям шаговых двигателей с активным ротором, которые приведены в работе [5]. Методика расчёта мгновенных значений координат многофазных ВД в исправном состоянии и при отказах элементов силовой части приведена в работе [6]. Расчёт проводится в относительных единицах. За базовую величину электромагнитного момента принят максимальный пусковой момент двигателя, приходящийся на одну фазу.

Рассмотрим пульсации управляемых ВД в исправном состоянии и для четырёх видов отказов элементов силовой части при регулировании угла управления коммутацией в пределах одного МКИ при одинаковой величине индуктивности фаз обмотки якоря для одной частоты вращения. Индуктивность удобно учитывать при помощи коэффициента ξ , который по своей сути является

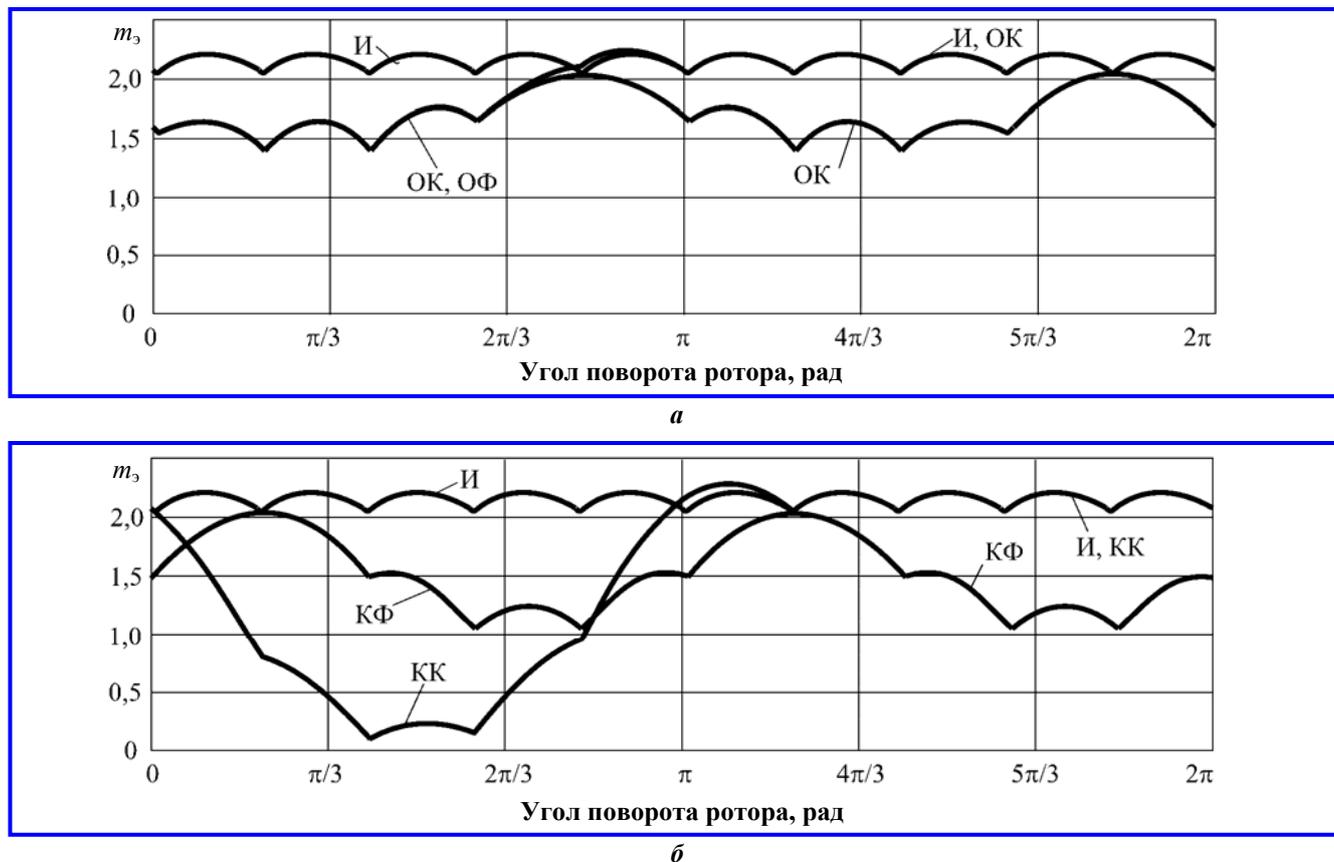
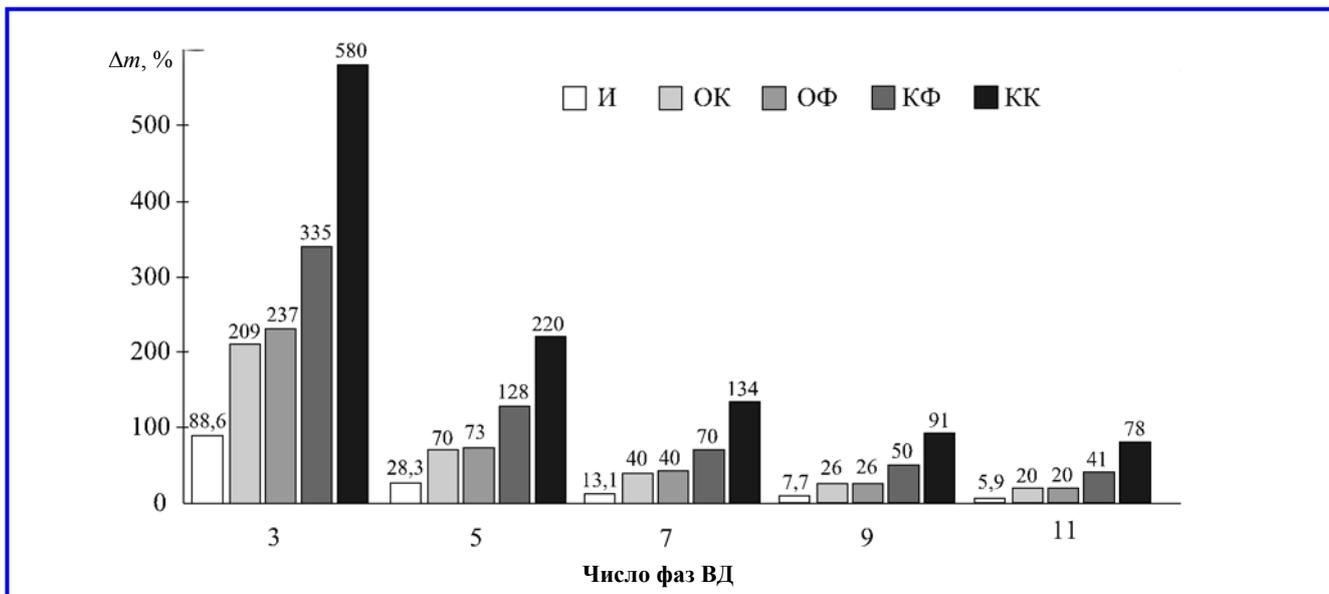
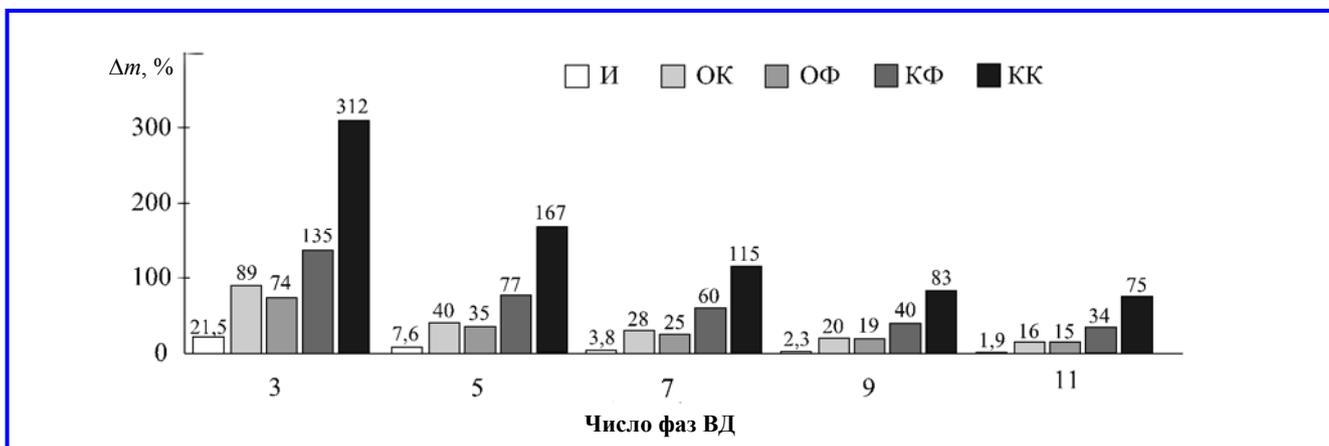


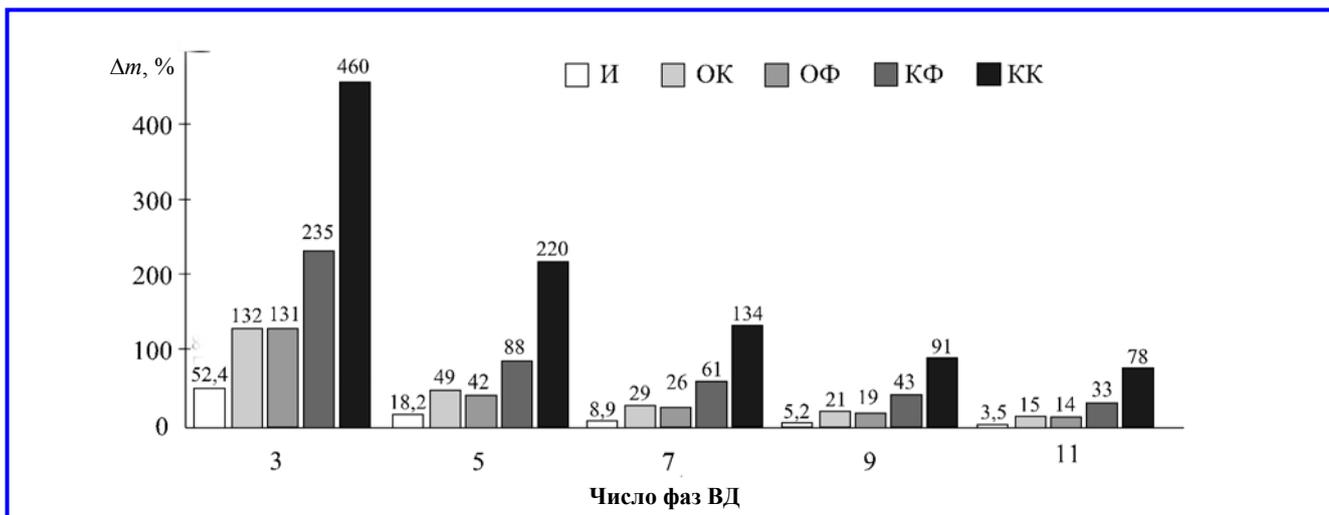
Рис. 2. Диаграммы токовой составляющей электромагнитного момента пятифазного ВД на периоде повторяемости электромагнитных процессов в исправном состоянии и отказах элементов силовой части типа «обрыв» и: а – типа «короткое замыкание»; б – при $V = 0,4$; $\xi = 0,25$; $\theta_y = 0$



a



b



v

Рис. 3. Пульсации токовой составляющей электромагнитного момента ВД в исправном состоянии (И) и отказах элементов силовой части ОК, ОФ, КК, КФ в случаях коммутаций: *a* – отстающей; *b* – нейтральной; *v* – опережающей ($\xi = 0,25$)

относительным индуктивным сопротивлением фазы обмотки якоря при базовой частоте вращения.

Относительная угловая частота вращения определяется по выражению

$$V = \frac{E_m}{U_n},$$

где E_m – амплитуда ЭДС первой (основной) гармоники фазы; U_n – номинальное напряжение питания двигателя.

Исследование пульсаций электромагнитного момента исправной машины проводилось на одном МКИ. В случаях отказов элементов силовой части ВД необходимо рассматривать изменение мгновенного значения момента на периоде повторяемости электромагнитных процессов. Индекс фазы, в которой (или в канале которой) произошёл отказ, задаётся по-разному и зависит от числа фаз ВД, алгоритма коммутации и вида отказа. Например в пятифазном ВД удобно считать, что отказ «обрыв ключа полупроводникового коммутатора» возникает в том ключе, который отключается от шины источника питания. После этого определяем последовательно конечные и начальные значения фазных токов на каждом такте коммутации, начальный и конечный такты периода повторяемости. Для рассматриваемого отказа седьмой такт коммутации будет первым тактом периода повторяемости электромагнитных процессов, а последним тактом является шестнадцатый. В общем случае место появления отказа задаётся, исходя из условия выполнения минимума вычислительных операций.

Для того, чтобы иметь представление о законе изменения момента в аварийных режимах работы многофазных ВД, приведём пример для одного из рассматриваемых двигателей. Мгновенные значения относительного электромагнитного момента пятифазного ВД в исправном состоянии и при отказах элементов силовой части двигателя приведены на рис. 2. Эти зависимости наглядно показывают закон изменения мгновенных значений токовой составляющей электромагнитного момента ВД и позволяют провести количественную оценку пульсаций по интересующим разработчика величинам.

Для двигателей с другим числом фаз обмотки якоря получаем аналогичные зависимости, которые имеют только количественное отличие от приведённых в примере.

Для оценки величины пульсаций момента управляемых двигателей проведён расчёт, и получены зависимости мгновенных значений электро-

магнитного момента при трёх значениях угла управления коммутаций. На рис. 3 приведены гистограммы относительных пульсаций токовой составляющей электромагнитного момента $\Delta m, \%$ для случаев отстающей (рис. 3, а), нейтральной (рис. 3, б), и опережающей (рис. 3, в) коммутаций для двигателей с нечётным числом фаз от трёх до одиннадцати. Максимальную величину угла управления (и опережающей, и отстающей) для каждого двигателя принимаем равной половине МКИ ($\theta_y = \pm \Delta/2$). Относительная угловая частота вращения $V = 0,4$. Относительное индуктивное сопротивление фазы обмотки якоря $\xi = 0,25$.

Сначала проведём оценку относительной величины пульсаций момента $\Delta m, \%$ при нейтральной коммутации (см. рис. 3, б). Наименьшими пульсациями обладают ВД при отказе «обрыв фазы ЭМП», затем отказы располагаются в такой последовательности: «обрыв ключа ПК», «короткое замыкание фазы ЭМП», «короткое замыкание ключа ПК». Для трёхфазных двигателей величины пульсаций при этих отказах составляют, соответственно, 74, 89, 135 и 312 %. С увеличением числа фаз ЭМП такая закономерность влияния отказов на пульсации момента сохраняется, только величина пульсаций становится меньше. Так в одиннадцатифазной машине при указанной последовательности отказов получены пульсации 15, 16, 34 и 75 %.

При отказах типа «обрыв» величины пульсаций меньше на 46 – 238 %, чем при отказах типа «короткое замыкание». Внутри каждого типа отказов также имеется различие. Так в трёхфазном ВД величина пульсаций при обрыве ключа на 15% больше, чем при обрыве фазы. Большее отличие имеем при отказах типа «короткое замыкание»: при «коротком замыкании ключа ПК» величина пульсаций на 238% больше, чем при отказе «короткое замыкание фазы ЭМП». Увеличение числа фаз обмотки якоря ЭМП приводит к уменьшению этой разницы для каждого типа отказов. Так в машинах с числом фаз 5, 7, 9 и 11 различие в величинах пульсаций при отказах типа «обрыв» сокращается, соответственно, до 5, 3, 1 и 1 %. Это позволяет сделать вывод о том, что уже в семифазном двигателе оба отказа имеют практически одинаковую величину пульсаций. При отказах типа «короткое замыкание» различие также будет уменьшаться, и в ВД с числом фаз 5, 7, 9 и 11 составляет 90, 55, 43 и 41 %.

В случаях отказов типа «короткое замыкание» пульсации момента в 1,5 – 4 раза больше, чем при отказах типа «обрыв ключа». Причём такое соотношение не зависит от числа фаз обмотки, несмотря на то, что величины пульсаций при этом уменьшаются.

При отказах типа «обрыв» величина пульсаций не превышает 100%. Это означает, что знак момента на периоде повторяемости электромагнитных процессов не изменяется. Величина минимального момента зависит от числа фаз, вида отказа и имеет наименьшее значение в машине с меньшим числом фаз. Если в трёхфазном ВД она составляет 11%, то в пяти-, семи-, девяти- и одиннадцатифазных возрастает до 60, 72, 80 и 84 % в случаях обрыва ключа ПК. В случае обрыва фазы величина минимального момента несколько больше и составляет для рассматриваемого числа фаз ВД, соответственно, 26, 65, 75, 81 и 85 % от величины среднего момента.

В случаях отказов «короткое замыкание» знак момента на периоде повторяемости (для принятых исходных данных) изменяется в трёхфазных машинах, а в пятифазных – это наблюдается только при коротком замыкании ключа. В девяти- и одиннадцатифазных машинах знак момента уже не изменяется, что говорит о меньшем влиянии отказа одной фазы на электромагнитный момент ВД.

В трёхфазных машинах мгновенное значение минимального момента более чем в два раза меньше его среднего значения, в пяти- и семифазных машинах его величина существенно уменьшается и составляет, соответственно, 67 и 15 %.

Изменение угла управления коммутацией в сторону отставания или опережения приводит к увеличению пульсаций момента. Регулирование осуществляем в пределах одного МКИ, а предельную величину угла управления задаём равной половине МКИ при любом направлении регулирования. Результаты расчётов пульсаций момента для предельных значений угла управления коммутацией приведены на рис. 3, а (отстающая коммутация) и рис. 3, в (опережающая коммутация). В случаях отстающей коммутации, по сравнению с нейтральной, величина пульсаций при одинаковых видах отказов увеличивается в 2,3; 3,2; 2,5 и 1,85 раза в трёхфазном двигателе. Причём наибольшие отличия относятся к отказам «обрыв фазы ЭМП», затем следуют «обрыв ключа ПК», «короткое замыкание фазы ЭМП» и «короткое замыкание ключа ПК». Как и при нейтральной коммутации, с увеличением числа фаз обмотки якоря величина пульсаций в случаях отстающей коммутации уменьшается и в одиннадцатифазной машине составляет уже 1,25; 1,33, 1,32 и 1,08. Но при любом числе фаз величина пульсаций при отстающей коммутации всегда больше, чем при нейтральной коммутации.

Величины пульсаций при обрыве фазы ЭМП и

обрыве ключа ПК близки друг к другу уже в трёхфазной машине и практически одинаковы при большем числе фаз обмотки. Наибольшее влияние на рост пульсаций электромагнитного момента оказывают отказы типа «короткое замыкание». Так при коротком замыкании фазы ЭМП величина пульсаций увеличивается почти в 2,5 раза, а при коротком замыкании ключа ПК в 1,8 раза. С увеличением числа фаз влияние этих отказов становится меньше, и для одиннадцатифазного ВД составляет 1,32 и 1,4 раза.

В случаях опережающей коммутации пульсации момента увеличиваются в меньшей степени, чем при отстающей коммутации. По сравнению с нейтральной коммутацией это увеличение для отказов ОФ, ОК, КФ и КК, соответственно, составляет 1,77; 1,5; 1,74 и 1,47 в трёхфазной машине (см. рис. 3, в). При опережающей коммутации величина пульсаций (по сравнению с отстающей коммутацией) для этих отказов в той же машине меньше на 77 – 120 %. С ростом числа фаз это соотношение уменьшается до 21 – 40 % в пятифазной машине, а в одиннадцатифазной машине составляет 4 – 7 %.

Полученные результаты расчётов устанавливают зависимости между величиной пульсаций момента и числом фаз ВД при отказах элементов, которые необходимы при проектировании исполнительных элементов приводов повышенной надёжности. Для этого удобно пользоваться упрощёнными выражениями аппроксимирующих кривых в виде полиномов, которые связывают величину пульсаций электромагнитного момента в аварийных режимах работы с числом фаз, индуктивностью обмотки якоря двигателя, частотой вращения и углом управления коммутацией. Так для рассмотренных выше характеристик (см. рис. 3) получим зависимости относительных значений пульсаций момента от числа фаз ВД в нормальных и аварийных режимах работы (табл. 2).

Достоверность результатов

Достоверность полученных результатов подтверждена результатами экспериментальных исследований опытной партии образцов моментных одиннадцатифазных ВД. Относительная погрешность расчётных параметров ВД в аварийных режимах при отказах типа «обрыв» и «короткое замыкание» составила, соответственно, 8 – 14 % и 12 – 20 %.

Выводы и рекомендации

Полученные результаты использованы при проектировании исполнительных элементов вентильных

Таблица 2

Относительные пульсации электромагнитного момента двигателей с одинаковой индуктивностью фаз обмотки ($\xi = 0,25$) в нормальных и аварийных режимах для отстающей, нейтральной и опережающей коммутаций ($V = 0,40$)

Состояние ВД	Уравнение аппроксимирующей кривой	Коэффициент корреляции R^2
при отстающей коммутации		
И	$\Delta m, \% = 9,1286n^2 - 73,271n + 147,92$	0,957
ОК	$\Delta m, \% = 16,357n^2 - 145,44n + 340$	0,991
ОФ	$\Delta m, \% = 19n^2 - 168,8n + 390,4$	0,987
КФ	$\Delta m, \% = 30,571n^2 - 249,83n + 539,4$	0,965
КК	$\Delta m, \% = 52,071n^2 - 425,53n + 929,6$	0,966
при нейтральной коммутации		
И	$\Delta m, \% = 2,0929n^2 - 17,007n + 35,42$	0,967
ОК	$\Delta m, \% = 7,2143n^2 - 60,586n + 139,6$	0,967
ОФ	$\Delta m, \% = 5,7857n^2 - 48,614n + 113,8$	0,967
КФ	$\Delta m, \% = 9,2143n^2 - 79,586n + 203,4$	0,988
КК	$\Delta m, \% = 23n^2 - 194,4n + 475,4$	0,985
при опережающей коммутации		
И	$\Delta m, \% = 5,0429n^2 - 41,337n + 86,18$	0,965
ОК	$\Delta m, \% = 11,5n^2 - 100,7n + 235$	0,994
ОФ	$\Delta m, \% = 9,6429n^2 - 87,357n + 211,2$	0,984
КФ	$\Delta m, \% = 20,571n^2 - 169,03n + 374$	0,971
КК	$\Delta m, \% = 40,429n^2 - 330,57n + 731,8$	0,971

электроприводов повышенной надёжности для количественной оценки величины пульсаций электромагнитного момента в аварийных режимах работы.

Предложенные результаты расчётов позволяют исключить из процесса проектирования вентиляного привода этап физического моделирования многофазных ВД, что существенно сокращает затраты

времени и финансовых средств на разработку электроприводов повышенной надёжности.

Литература

1. Дубенский А. А. Бесконтактные двигатели постоянного тока / А. А. Дубенский. – М. : Энергия, 1967. – 144 с.
2. Балагуров В. А. Бесконтактные двигатели постоянного тока / В. А. Балагуров, В. М. Гридин, В. К. Лозенко – М. : Энергия, 1975. – 128 с.

3. Овчинников И. Е. Бесконтактные двигатели постоянного тока / И. Е. Овчинников, Н. И. Лебедев. – Л. : Наука, 1979. – 270 с.
4. Воронин С. Г. Исследование пульсаций момента тихоходных бесконтактных двигателей постоянного тока с дискретным датчиком положения ротора / С. Г. Воронин, В. А. Лифанов, Б. Г. Шумихин // *Электричество*. – 1977. – № 11. – С. 54 – 58.
5. Дискретный электропривод с шаговыми двигателями / под ред. М. Г. Чиликина. – М. : Энергия, 1971. – 624 с.
6. Вигриянов П. Г. Электромагнитные процессы многофазных вентильных двигателей: монография / П. Г. Вигриянов. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2007. – 143 с.

Поступила в редакцию 19.06.2012

Павел Георгиевич Вигриянов, канд. техн. наук, доцент,
т. (351) 366-58-69 (доб. *2111), e-mail: eapp@kaf_zb-susu.ru.