

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ОТКАЗОВ НА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДЕВЯТИФАЗНОГО ВЕНТИЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ

П.Г. Вигриянов

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

E-mail: vpg_postbox@mail.ru

Получены энергетические характеристики девятифазного вентильного двигателя в исправном состоянии и аварийных режимах работы. Проведена их количественная оценка и установлена степень влияния отказов на величину потребляемой и электромагнитной мощностей, электромагнитного КПД. Рассмотрены варианты компенсации последствий отказов путем изменения угла управления коммутацией и величины напряжения питания. Предложено использовать полученные параметры в качестве критериев оценки работоспособности вентильных двигателей в аварийных режимах работы.

Ключевые слова:

Вентильный двигатель, энергетические характеристики, отказы.

Key words:

Valve engine, power characteristics, failures.

Двигатели систем автоматики являются одним из основных элементов систем управления и регулирования и применяются в качестве силовых и преобразующих элементов. Требования, предъявляемые к вентильным двигателям (ВД) автоматических устройств, разнообразны. Они зависят от назначения, условий работы и тех функций, которые двигатель выполняет. Но требования по надежности двигателей всегда находились в числе основных. Одним из направлений улучшения характеристик и повышения надежности ВД в настоящее время является использование электромеханического преобразователя (ЭМП) с увеличенным числом фаз. Оно совпадает с общим стремлением к увеличению числа фаз ЭМП [1]. Повышенные требования по надежности не всегда могут быть достигнуты только путем увеличения числа фаз. Они могут быть также удовлетворены при условии возникновения одного или нескольких отказов в исполнительном элементе электропривода.

Исследование ВД при повышенных требованиях к их надежности не ограничивается анализом характеристик исправной машины. Необходимо выявить наиболее характерные отказы в каждой части функциональной схемы вентильных двигателей и провести количественную оценку влияния каждого из них на энергетические характеристики машины.

На практике работоспособность электропривода обеспечивают за счет резервирования двигателей, работающих на одну нагрузку, либо путем применения нескольких многофазных двигателей с симметричной расщепленной обмоткой [2]. При отказе одного из них работоспособное состояние обеспечивают оставшиеся исправные двигатели. Количество двигателей определяется их типом, особенностями конструкции и последствиями отказа в машине. Неблагоприятным вариантом является такой отказ в двигателе, при котором этой машиной создается тормозной момент, а отключение её невозможно. Оставшиеся двигатели должны

обеспечить полезный момент нагрузки и в дополнение к этому ещё компенсировать тормозной момент.

Увеличение числа фаз ВД не только обеспечивает структурную избыточность ЭМП и полупроводникового коммутатора (ПК), но и дает возможность управления коммутационными процессами, то есть создает алгоритмическую избыточность. Совокупность этих двух факторов позволяет обеспечить работоспособное состояние многофазного двигателя и снизить степень влияния отказа силовой части на выходные координаты машины путем изменения величины питающего напряжения, угла управления коммутацией или алгоритмов коммутации фаз обмотки. Для выбора способа воздействия (или совокупности нескольких способов) необходимо, прежде всего, выяснить влияние каждого отказа при отсутствии каких либо изменений в условиях работы. Для этого рассмотрим влияние отказов силовой части ВД на характеристики двигателей при заданном способе питания. С точки зрения повышения надежности наиболее перспективным способом питания является гальваническая развязка фаз. В такой машине каждая фаза представляет собой независимый электрический контур, сохраняя при этом электромагнитные связи со всеми остальными электрическими контурами.

Анализ характерных отказов элементов датчика положения ротора, ПК и ЭМП проведен в работе [3], где показано, что отказ любого элемента схемы в конечном итоге приводит к нарушению режимов работы элементов силовой части ВД. Подавляющее большинство отказов двигателя может быть сведено к четырем видам отказов силовой части машины: обрыв и короткое замыкание силового ключа полупроводникового коммутатора, обрыв и короткое замыкание фазы электромеханического преобразователя. Рассмотрим влияние этих отказов на характеристики девятифазного ВД, в котором реализован алгоритм полной нейтральной коммутации.

Математические модели и общая методика расчета энергетических параметров многофазных ВД (в исправном состоянии и при отказах элементов силовой части) по мгновенным значениям координат приведены в работе [3]. На основе этой методики разработаны пакеты программ [4–6] расчета энергетических характеристик многофазных ВД в нормальных и аварийных режимах работы. Расчет проводится в относительных единицах. Относительные значения потребляемой мощности P_1 , электромагнитной мощности P_3 и электромагнитного КПД μ_s исправного двигателя определяются на одном межкоммутационном интервале (МКИ) по выражениям

$$P_1 = \frac{1}{\Delta} \int_0^{\Delta} F_1 du_p; \quad P_3 = \frac{1}{\Delta} \int_0^{\Delta} F_2 du_p; \quad \mu_s = \frac{P_3}{P_1}.$$

Здесь Δ – длительность МКИ; θ_p – угол поворота ротора в электрических радианах. Функция F_1 – сумма мгновенных значений токов, потребляемых от всех источников питания; функция F_2 – сумма произведений относительных мгновенных значений фазных токов и ЭДС.

В качестве базовых величин напряжения, тока и мощности приняты: номинальное фазное напряжение двигателя, фазный ток короткого замыкания и мощность, потребляемая одной фазой при коротком замыкании:

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

где r – активное сопротивление фазы обмотки якоря.

Влияние параметров обмотки якоря на энергетические показатели учитываем с помощью коэффициента ξ , который по своей сути является относительным индуктивным сопротивлением эквивалентного контура при базовой частоте вращения.

Поскольку частота вращения ротора двигателя изменяется от нуля до частоты идеального холостого хода, то введем относительное индуктивное сопротивление контура при текущей частоте вращения τ . Обе эти величины связаны между собой

$$\tau = \frac{\omega_p L}{r} = \left(\frac{\omega_6 L}{r} \right) \left(\frac{\omega_p}{\omega_6} \right) = \sigma V,$$

где L – индуктивность фазы обмотки якоря с учетом взаимной индуктивности от других фаз [7]; ω_6 – базовая частота вращения ротора (частота вращения, соответствующая режиму идеального холостого хода); ω_p – текущая частота вращения; V – относительная угловая частота вращения, которая определяется по выражению

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

Здесь E_m – амплитуда ЭДС первой (основной) гармоники фазы.

Расчет энергетических параметров при отказах проводится путем интегрирования мгновенных значений координат на периоде повторяемости

(Δ_n) электромагнитных процессов

$$P_1 = \frac{1}{\Delta_n} \left[\sum_{T=T_n}^{T_k} \left(\int_0^{u_0} F_1 du_p + \int_{u_n}^{\Delta} F_1' du_p \right) \right];$$

$$P_3 = \frac{1}{\Delta_n} \left[\sum_{T=T_n}^{T_k} \left(\int_0^{u_0} F_2 du_p + \int_{u_n}^{\Delta} F_2' du_p \right) \right].$$

Здесь T_n , T_k и T – соответственно начальный, конечный и текущий такты периода повторяемости электромагнитных процессов; θ_0 – угол поворота ротора, при котором происходит изменение структуры ЭМП, обусловленное отказом элементов силовой части ВД (определяет границы участков МКИ). На каждом из тактов периода повторяемости электромагнитных процессов рассчитываем составляющие потребляемой и электромагнитной мощности по каждому из участков МКИ. Функции $F_1(F_1')$ – это суммы мгновенных значений токов, потребляемых от всех источников питания на первом (втором) участках МКИ. Функции $F_2(F_2')$ представляют собой суммы произведений относительных мгновенных значений фазных токов и ЭДС, которые работают на первом (втором) участках МКИ.

В аварийных режимах работы в первую очередь при заданной относительной частоте вращения определяются мгновенные значения координат исправного ВД на первом МКИ. Далее на алгоритм коммутации исправной машины накладывается метка соответствующего отказа элемента силовой части, и определяются границы периода повторяемости электромагнитных процессов (начальный T_n и конечный T_k такты коммутации). При этом последовательно вычисляются мгновенные значения фазных координат на каждом участке МКИ и каждом МКИ в соответствии с изменением структуры ЭМП, которое вызывается отказом. После этого по мгновенным значениям фазных координат рассчитываются энергетические параметры ВД (P_1, P_3) на периоде повторяемости электромагнитных процессов путем применения одного из методов численного интегрирования.

Электромагнитный КПД при отказах элементов и для исправной машины определяется одинаково.

Задавая несколько значений относительной частоты вращения и рассчитывая энергетические параметры, получаем энергетические характеристики (рисунки) для интересующих нас режимов работы ВД.

Полагаем, что относительные индуктивные сопротивления фаз обмотки якоря ВД остаются неизменными ($\xi=0,25$). Рассмотрим четыре вида отказов: обрыв силового ключа ПК (ОК), обрыв фазы ЭМП (ОФ), короткое замыкание силового ключа ПК (КК) и короткое замыкание фазы ЭМП (КФ). Сравнивать полученные характеристики будем с энергетическими характеристиками двигателя в исправном (И) состоянии.

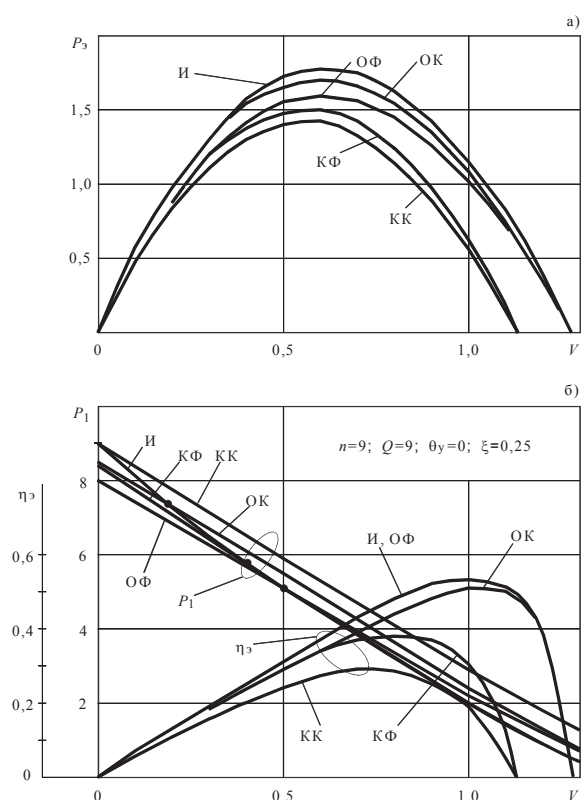


Рисунок. Характеристики исправного (И) трехфазного ВД в случае полной нейтральной коммутации и при отказах ОК, ОФ, КК, КФ (для $\xi=0,25$)

Согласно полученным характеристикам (рисунок, а) величина электромагнитной мощности двигателя при всех указанных отказах меньше, чем в исправной машине для всего диапазона частот вращения. Каждая кривая имеет явно выраженный максимум электромагнитной мощности ($P_3^{\max}$). Положение этой точки смещается в область низких частот вращения при отказах «короткое замыкание». По степени роста влияния на величину $P_3^{\max}$ отказы располагаются в такой последовательности: обрыв ключа ПК; обрыв фазы ЭМП; короткое замыкание фазы ЭМП и короткое замыкание ключа ПК. Для трехфазного ВД максимальная электромагнитная мощность для указанной последовательности отказов составляет соответственно 94, 89, 84 и 79 % от максимальной мощности, развиваемой исправной машиной.

Самым неблагоприятным видом отказа является короткое замыкание пары силовых ключей ПК на шину источника питания. Ток в фазе, коммутируемой отказавшим ключом, будет пульсирующим, а его величина зависит от величины фазной ЭДС, которая определяется частотой вращения индуктора. В этом случае вопрос о способе исключения отказа решается совместно с вопросами защиты силовых ключей ПК от сквозных токов и ограничения пусковых токов. В результате принимается решение о способе исключения отказавшего ключа из работы двигателя. Обычно предусматривается последовательное соединение каждого ключа

с защитным отключающим элементом, разрывающим электрическую цепь отказавшего ключа. Такое решение позволяет отказ «короткое замыкание ключа» ПК свести к «отказу обрыв ключа» ПК, влияние которого на энергетические параметры в машинах с любым числом фаз обмотки якоря ЭМП в 3 раза меньше.

Следующим по степени влияния видом отказа является короткое замыкание фазы ЭМП. Способ исключения отказа в данном случае решается путем применения специальных конструктивных вариантов исполнения обмотки, повышения качества изоляционных материалов и более совершенной технологии производства. Суть специальных конструктивных вариантов заключается в возможности обеспечения разрыва цепи короткозамкнутой фазы в случае возникновения отказа. Таким образом, отказ короткое замыкание фазы ЭМП может быть сведен к отказу обрыв фазы ЭМП, обладающему меньшим влиянием на энергетические параметры ВД.

Вместе с изменением электромагнитной мощности в случаях отказов типа «короткое замыкание» снижается верхняя граница диапазона частот вращения на 12 % по сравнению с исправной машиной. Поэтому отказы типа «короткое замыкание» приводят к уменьшению рабочего диапазона частоты вращения, чего в большинстве электроприводов иметь не желательно. И по этой причине следует избегать появления отказов типа «короткое замыкание».

Полученные результаты позволяют уже на этапе проектирования электропривода оценить возможность работы его исполнительного элемента с различными вариантами исполнения ЭМП и в случаях отказов силовой части предусмотреть, в частности, меры, предупреждающие возможность появления отказов, оказывающих наибольшее снижение электромагнитной мощности. Исключение возможности отказов типа «короткое замыкание» путем сведения их к отказам типа «обрыв» является одним из вариантов сохранения работоспособного состояния многофазных ВД. Например, исключив возможность отказов типа «короткое замыкание» в нашем двигателе, получаем, что снижение максимальной электромагнитной мощности при отказах типа «обрыв» не будет превышать 11 %.

Зависимость относительного значения потребляемой мощности от относительной частоты вращения $P_1=f(V)$ по своей сути является электрохимической характеристикой двигателя (рисунок, б), поскольку в относительных единицах относительное среднее значение тока, потребляемого из сети (i_{cp}), равно относительному значению потребляемой мощности ($P_1=i_{cp}$). Электрохимическая характеристика необходима при проектировании и исследовании электромагнитных процессов, поскольку в ВД всегда протекают переходные процессы, в которых не достигается установившегося состояния. Величина индуктивности определяет величину постоянной времени эквивалентной об-

мотки якоря и зависит от частоты вращения. Соотношение между этой постоянной и длительностью МКИ существенно влияет на коммутационные процессы и среднее значение потребляемого тока, определяет величину пульсаций электромагнитного момента и использование объема машины.

Пересечение прямой с осями абсцисс и ординат определяет соответственно величины угловой частоты вращения идеального холостого хода двигателя и начального пускового тока двигателя, которые выражены в относительных единицах.

При отказе короткое замыкание ключа ПК среднее значение потребляемого двигателем тока больше, чем в исправном двигателе для всего диапазона частот вращения. Только при неподвижном роторе эти токи равны. Для остальных отказов величина начального пускового тока меньше, чем в исправном двигателе. Затем, по мере увеличения частоты вращения, среднее значение потребляемого двигателем тока увеличивается, сравнивается с током исправного двигателя при определенной частоте вращения, и затем превышает его. Различными будут только частоты вращения, при которых сравниваются токи. При обрыве ключа ПК это происходит раньше ($V=0,2$), затем следует отказ короткое замыкание фазы ЭМП ($V=0,4$), и при обрыве фазы ЭМП ($V=0,5$). Таким образом, по степени влияния на величину среднего потребляемого тока отказы располагаются в такой последовательности: обрыв фазы ЭМП, короткое замыкание фазы ЭМП, обрыв ключа ПК, короткое замыкание ключа ПК.

Иначе влияют отказы на электромагнитный КПД (рисунок, б). Так, при обрыве фазы ЭМП кривая КПД не отличается от КПД исправного двигателя, поскольку вместе с уменьшением электромагнитной мощности уменьшаются и электрические потери в обмотке якоря двигателя. При обрыве силового ключа ПК в коммутируемой фазе токи протекают только на половине тактов периода повторяемости, точно также как и в исправной машине. Поскольку на второй половине тактов периода повторяемости электромагнитных процессов фаза ЭМП не участвует в преобразовании энергии, то величина электромагнитной мощности, а следовательно и электромагнитного КПД, снижается (рисунок, б). Дополнительных потерь, которые приводили бы к уменьшению КПД при этом отказе в силовой части ВД, не возникает. Для этих двух отказов диапазон рабочих частот вращения двигателя по сравнению с диапазоном частот машины в исправном состоянии не изменяется.

При коротком замыкании фазы ЭМП или ключа ПК величина электромагнитного КПД снижается в большей мере. С одной стороны, это вызвано уменьшением МДС якоря, создающей активный вращающий момент. С другой стороны, переменный или пульсирующий ток отказавшей фазы создает свое пульсирующее магнитное поле, которое также взаимодействует с магнитным полем индуктора, в результате чего создается тормозной мо-

мент. При коротком замыкании фазы ЭМП величина пульсирующего поля определяется в основном величиной фазной ЭДС, которая, в свою очередь, пропорциональна частоте вращения. Кроме этого, ток отказавшей фазы оказывается сдвинутым по фазе относительно тока исправной машины на π электрических радиан. При коротком замыкании ключа ПК на одной половине тактов периода повторяемости электромагнитных процессов фазный ток протекает точно так же, как и при работе исправной машины.

На второй половине тактов напряжение источника питания суммируется с фазной ЭДС, в результате чего результирующее напряжение будет гораздо больше, чем при работе исправной машины или машины с коротким замыканием фазы. Кроме существенного роста величины фазного тока на этих тактах изменяется и фазовый сдвиг по отношению к фазовому сдвигу тока исправной машины. В итоге величина электромагнитного КПД при коротком замыкании ключа ПК оказывается меньше, чем величина электромагнитного КПД при коротком замыкании фазы (рисунок, б). Для этих двух отказов диапазон рабочих частот вращения двигателя по сравнению с диапазоном частот машины в исправном состоянии составляет 88 %. Положение максимума КПД перемещается в область более низких частот вращения до 0,82 при коротком замыкании фазы ЭМП и 0,73 при коротком замыкании ключа ПК.

Так, при отказах обрыв фазы ЭМП, обрыв ключа ПК, короткое замыкание фазы ЭМП и короткое замыкание ключа ПК величина максимального электромагнитного КПД составляет соответственно 100, 92, 72 и 54 % от КПД исправной машины.

Теперь, когда выяснили влияние отказов на характеристики ВД, можно предложить некоторые варианты компенсации последствий отказов. Для этого необходимо включить ВД в систему управления надежностью вентильного привода или объекта в целом. Так, в управляемом ВД имеется возможность регулирования угла управления коммутацией θ_v . При плавном изменении θ_v в сторону опережающей коммутации в реальных двигателях ($\xi > 0$) электромагнитная мощность сначала увеличивается, достигает максимального значения, а затем уменьшается. При известной величине относительного индуктивного сопротивления величина этого угла легко определяется по виду семейства характеристик $P_g = f(V)$, каждая из которых получена для конкретной величины угла управления. Для нашего двигателя при отказах ОК, ОФ, КФ, КК величина $P_g^{\max}$ может быть увеличена соответственно до 96,9; 91,1; 85,9; 80,8 % при величине угла управления коммутацией +8, +9, +9, +9 градусов. Таким образом, $P_g^{\max}$ увеличивается на 2,1...2,7 %. Наиболее действенным фактором влияния на энергетические характеристики двигателя является изменение величины питающего напряжения. Если в электроприводе имеется возможность регулирования напряжения питания (как один из возмож-

ных вариантов — всех фаз одновременно), то для всех рассмотренных отказов можно восстановить величину P_{max} исправного двигателя, при увеличенном напряжении питания (нашего двигателя при отказах ОК, ОФ, КФ, КК соответственно на 3, 6, 11, 12 %).

Полученные энергетические параметры (P_1, P_3) могут быть использованы в качестве обоснованных критериев при оценке работоспособности ВД в аварийных режимах работы. Для этого необходимо заранее оговорить, какое состояние считается неработоспособным.

Выводы

1. Проведена количественная оценка влияния видов отказов элементов силовой части на энерге-

тические характеристики девятифазного вентильного двигателя с гальванически развязанными фазами обмотки якоря.

2. Предложены варианты исключения наиболее неблагоприятных видов отказов на этапе проектирования вентильных двигателей, которые оказывают большее влияние на снижение энергетических параметров.
3. Показаны возможности компенсации последствий отказов путем изменения угла управления коммутацией и величины питающего напряжения.
4. Предложено использовать полученные энергетические параметры в качестве критериев оценки работоспособности многофазных вентильных двигателей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сидельников Б.В. Перспективы развития и применения бесконтактных регулируемых электродвигателей // Известия вузов. Электромеханика. — 2005. — № 2. — С. 14–20.
2. Ведяшкин М.В., Глухов Д.М., Муравлева О.О. Математическое моделирование надежности многофазного асинхронного электропривода // Известия вузов. Электромеханика. — 2008. — № 6. — С. 22–25.
3. Вигриянов П.Г. Электромагнитные процессы многофазных вентильных двигателей: монография. — Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2007. — 143 с.
4. Вигриянов П.Г. Пакет программ для расчета энергетических характеристик многофазного вентильного двигателя. — Челябинск: ЦНТИ. Информационный листок, 1988. — № 88. — 39 с.
5. Вигриянов П.Г. Пакет программ для расчета энергетических характеристик многофазного вентильного двигателя при неисправности типа «обрыв». — Челябинск: ЦНТИ. Информационный листок, 1988. — № 88. — 61 с.
6. Вигриянов П.Г. Пакет программ для расчета энергетических характеристик многофазного вентильного двигателя при неисправности «короткое замыкание». — Челябинск: ЦНТИ. Информационный листок, 1988. — № 88. — 62 с.
7. 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. — С. 54–58.

Поступила 26.12.2011 г.