

2. Inderka R.B., De Doncker R.W. DITC – Direct instantaneous torque control of switched reluctance drives. – IEEE Transactions on Industry Applications, 2003, vol. 39, № 4.

3. Красовский А.Б., Бычков М.Г. Исследование пульсаций момента в вентильно-индукторном электроприводе. – Электричество, 2001, № 10.

4. Adrian David Cheok, Tan Siew Chong, Wang Zhongfang. Real-time computer-based torque measurement of switched reluctance motors. – INT. J. Electronics, 2002, vol. 89, № 9.

5. Kaewthai S., Kittiratsatcha S.A. Torque estimation method for a switched reluctance machine. – IEEE International Conf. on Power Electronics and Drives Systems, 2005, vol. 2.

6. Hossain S.A., Husain I., Klode H. et al. Four-quadrant and zero-speed sensorless control of a switched reluctance motor. – IEEE Transactions on Industry Applications, 2003, vol. 39, № 5.

7. Кузнецов С.А. Учет нелинейных свойств вентильно-индукторных машин в алгоритмах управления. – Системы управления и информационные технологии, 2008, № 4 (34).

8. Бычков М.Г. Основы теории, управление и проектирование вентильно-индукторного электропривода: Автореф. дис... докт. техн. наук. – М.: МЭИ, 1999.

9. Красовский А.Б., Кузнецов С.А., Трунин Ю.В. Моделирование магнитных характеристик вентильно-индукторных машин. – Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Естественные науки, 2007, № 4 (27).

10. Красовский А.Б. Получение максимальной выходной мощности вентильно-индукторного электропривода средствами управления. – Электричество, 2002, № 9.

[11.09.12]

Авторы: Красовский Александр Борисович окончил факультет электрификации и автоматизации промышленности и транспорта Московского энергетического института в 1977 г. Докторскую диссертацию «Имитационные модели в теории и практике вентильно-индукторного электропривода» защитил в МЭИ в 2004 г. Профессор, заведующий кафедрой электротехники и промышленной электроники Московского государственного технического университета (МГТУ) им. Н.Э. Баумана.

Кузнецов Сергей Александрович окончил кафедру «Оборудование и технологии прокатки» МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2006 г. Кандидатскую диссертацию «Разработка регулятора момента системы управления вентильно-индукторного двигателя» защитил в МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2010 г. Доцент кафедры электротехники и промышленной электроники МГТУ им. Н.Э. Баумана.

* * *

Особенности исследования электромагнитных процессов вентильных двигателей с изменяемой структурой электромеханического преобразователя при отказах элементов силовой части

ВИГРИЯНОВ П.Г.

Предложена методика исследования электромагнитных процессов многофазных вентильных двигателей при отказах элементов типа «обрыв» и «короткое замыкание» в силовой части двигателя. Практическая реализация вычислительного процесса позволила получить количественную оценку энергетических параметров двигателя в аварийных режимах работы и сократить время на его разработку.

Ключевые слова: многофазный вентильный двигатель, электромагнитные процессы, отказы элементов

Вентильные двигатели систем автоматики по сравнению с коллекторными двигателями постоянного тока или асинхронными двигателями обладают большей надежностью и долговечностью. Однако эти вопросы достаточно полно рассмотрены применительно к вентильным двигателям с малым числом фаз обмотки якоря, отдельным способам питания и алгоритмам коммутации фаз [1], что ограничивает возможности выбора вариантов исполнения электропривода. Вместе с тем в ряде приводов авто-

A procedure for studying the electromagnetic processes in multiphase converter-fed motors arising when open-circuit and short-circuit faults of elements in the motor's power part occur is proposed. The proposed procedure was practically implemented, and its use made it possible to quantitatively estimate the power parameters of the motor in emergency modes of its operation and decrease the time taken for designing it.

Key words: multiphase converter-fed motor, electromagnetic processes, failures of elements

номных объектов (навигационное оборудование, системы жизнеобеспечения) вентильные двигатели с малым числом фаз не могут обеспечить требуемых параметров надежности и долговечности [2, 3].

Увеличение числа фаз обмотки якоря и использование алгоритмов неполной коммутации позволяет за счет обеспечения структурной и алгоритмической избыточности электромеханического преобразователя повысить надежность работы вентильного двигателя [4, 5].

Необходима разработка методики исследования электромагнитных процессов многофазных вентильных двигателей с изменяемой структурой электромеханического преобразователя в аварийных режимах работы. Такие режимы возникают при внезапных отказах элементов полупроводникового коммутатора (ПК), электромеханического преобразователя (ЭМП) или датчика положения ротора и оказывают существенное влияние на работу силового канала двигателя.

В [6] проведен анализ отказов элементов, входящих в состав ЭМП, ПК и датчика положения ротора. Показано, что подавляющее большинство отказов могут быть сведены к двум основным типам отказов силовой части вентильного двигателя: «обрыв» и «короткое замыкание». Отказы этих типов (в зависимости от места их появления в силовой части вентильного двигателя) в свою очередь можно разделить на четыре вида: обрыв силового ключа ПК («обрыв ключа ПК»); обрыв фазы обмотки якоря ЭМП («обрыв фазы ЭМП»); короткое замыкание силового ключа ПК («замыкание ключа ПК»); короткое замыкание фазы ЭМП («замыкание фазы ЭМП»).

По статистическим данным [7] для машин систем автоматики в 70% случаев отказов наблюдается обрыв обмотки, в 30% – замыкание, если в процессе эксплуатации нагрузки не превышали допустимых уровней.

Рассмотрим особенности расчета установившихся электромагнитных процессов для отказов, обусловленных одним неисправным элементом. При анализе физических процессов многофазного вентильного двигателя принимаем во внимание следующие особенности его работы: тип и вид отказа; положение ротора, соответствующее его появлению. Особое значение для разработки математической модели многофазного вентильного двигателя в аварийных режимах имеют: способ учета отказа в алгоритме коммутации фаз обмотки; способ определения участков с постоянной структурой электромеханического преобразователя; порядок определения периода повторяемости электромагнитных процессов для заданного вида отказа; способ учета защиты силовых ключей ПК.

Для достижения поставленной задачи воспользуемся методикой исследования электромагнитных процессов исправных вентильных двигателей с изменяемой структурой электромеханического преобразователя на одном межкоммутационном интервале (МКИ) [6]. Аварийные режимы работы вентильных двигателей получаем путем последовательного перехода от квазиустановившегося режима работы исправной машины на одном МКИ к квазиустановившемуся режиму работы неисправной маши-

ны на периоде повторяемости электромагнитных процессов: в аварийных режимах возможно применить способ определения участков МКИ с постоянной структурой, который был использован при исследовании режимов работы исправной машины. Основанием для принятия такого решения является сходство состояний любой фазы ЭМП в исправном двигателе и его аварийных режимах: фаза либо подключена к источнику питания, либо отключена от него. Дополнительными задачами исследования аварийных режимов являются изменения состояния ЭМП при отказах разного типа.

Так, при отказах типа «обрыв» на периоде повторяемости электромагнитных процессов имеем следующие особенности работы ЭМП. На каждом такте коммутации необходимо дополнительно установить факт изменения состояния фазы ЭМП, в канале которой имеется отказ элемента, что зависит от вида отказа и положения текущего такта на периоде повторяемости. При обрыве фазы ЭМП или коммутации неисправного ключа ПК структуры ЭМП текущего и предыдущего тактов одинаковы. При отказе «обрыв ключа ПК» и коммутации исправного ключа стойки изменение структуры ЭМП происходит точно так же, как и при работе исправной машины.

Поскольку порядок подключения фаз обмотки вычисляется на каждом такте коммутации, то место возникновения отказа удобно задать путем специальной метки (рис. 1.), численно равной номеру отказавшей фазы (или стойки коммутатора), и наложения этой метки на алгоритм коммутации исправной машины. При реверсивном питании фаз метка указывает на характер отказа и содержит информацию об отказе одного из трех элементов: фазы обмотки якоря ЭМП (модуль метки) и двух ключей стойки коммутатора (знак соответствует полярности шины источника питания, к которой подключается начало фазы). При нереверсивном питании фаз обмотки якоря каждая фаза коммутируется только одним ключом, поэтому знак перед меткой «обрыв ключа» *НОК* учитывать не нужно.

При обрыве одного силового ключа стойки коммутатора второй продолжает по-прежнему работать, поэтому фаза ЭМП отключается лишь только на тех тактах, на которых должен был работать неисправный ключ.

При обрыве фазы ЭМП состояние ключей никак не влияет на ее работу, так как электрическая цепь фазы оказывается разомкнутой.

При отказах типа «короткое замыкание» на периоде повторяемости электромагнитных процессов особенности работы силового канала двигателя следующие. При любом способе питания разомк-



Рис. 1. Метки неисправностей при отказах элементов силовой части

нутой обмотки якоря в схеме ПК всегда предусматривается защита от сквозных токов в стойке каждой фазы, которая запрещает одновременное открытое состояние ключей. В противном случае источник питания будет замкнут накоротко, что недопустимо. По этой причине короткое замыкание одного из силовых ключей ПК приводит к запрету отпирания второго ключа стойки; при таком отказе оба ключа находятся в закрытом состоянии. Тогда при коротком замыкании одного из силовых ключей стойки ПК состояние фазы ЭМП будет таким же, как и в исправном двигателе, на тех тактах коммутации, где должен быть открытым отказавший ключ. На остальных тактах коммутации, на которых отказавшая фаза должна была отключиться от источника или подключиться исправным ключом к шине другой полярности, она остается подключенной к шине той же полярности, что и на предыдущих тактах. Таким образом, при коротком замыкании любого из силовых ключей одной стойки ПК напряжение на отказавшей фазе в течение всех тактов периода повторяемости остается неизменным.

При коротком замыкании фазы ЭМП оба ключа стойки также необходимо закрыть, чтобы не допустить возможного протекания сквозного тока. Напряжение на отказавшей фазе на всех тактах периода повторяемости равно нулю. Остальные фазы коммутируются, как и в исправном двигателе. Отличительной особенностью этого режима является то, что неисправная фаза не влияет на значения фазных напряжений других фаз на всех тактах коммутации периода повторяемости.

Таким образом, наряду с изменением структуры ЭМП, предусмотренным алгоритмом коммутации исправного двигателя, на некоторых тактах периода повторяемости могут появляться дополнительные изменения структуры преобразователя, обусловленные каким-либо отказом. Следовательно,

исследование необходимо проводить на периоде повторяемости электромагнитных процессов вентильного двигателя.

При разработке алгоритмов расчета электромагнитных процессов в аварийных режимах работы ВД реализуем следующий подход:

на первом такте периода повторяемости электромагнитных процессов определить число и полярность подключения фаз в соответствии с алгоритмом коммутации исправной машины;

задать номер такта коммутации, в течение которого возникает отказ, установить его вид и место возникновения;

на втором и последующих тактах периода повторяемости электромагнитных процессов внести изменения в алгоритм коммутации в соответствии с видом отказа;

определить последовательность расчета фазных токов на каждом участке МКИ для первого и последующих тактов периода повторяемости с учетом их состояния на предыдущем участке;

найти период повторяемости электромагнитных процессов;

рассчитать мгновенные значения координат и при необходимости энергетические параметры на периоде повторяемости электромагнитных процессов.

Момент времени, соответствующий возникновению отказа, можно задать любым, но будет правильнее определить его исходя из особенностей работы вентильного двигателя. Так, силовые ключи коммутатора чаще всего отказывают в моменты переключения, поскольку в это время на них выделяется большая мощность, чем в любом устойчивом состоянии.

Отказ вида «обрыв ключа ПК» задаем в момент отключения на текущем T -м такте того ключа, который был подключен на первом такте коммутации. Этот ключ работает m тактов исправно, а в

момент его выключения происходит обрыв. Обрыв фазы электромеханического преобразователя задается также в момент отключения ключа на T -м такте. Такой подход удобен в том случае, когда возникает необходимость контроля фазных токов или мгновенных значений электромагнитного момента при переходе машины от исправного режима к установившемуся аварийному.

Если такой необходимости нет, то отказ «обрыв ключа» удобно задать на первом такте коммутации для отключаемой от источника фазы, ток в которой затухает до нуля. Тогда период повторяемости электромагнитных процессов начинается со второго такта и будет продолжаться $2n$ последующих тактов. При этом на первой половине тактов периода повторяемости обрыв ключа не влияет на работу двигателя, поскольку согласно алгоритму коммутации фаза подключается к источнику питания вторым ключом стойки инвертора. На оставшихся тактах периода повторяемости фаза не подключается к источнику и не участвует в преобразовании энергии.

Момент возникновения отказа типа «обрыв фазы ЭМП» удобнее задать на первом такте коммутации. Отказавшей будем считать ту фазу, которая отключается от источника питания. В отличие от предыдущего отказа цепь оказывается разомкнутой на всех тактах периода повторяемости и фаза не принимает участия в преобразовании энергии.

Отказ вида «замыкание ключа ПК» удобно задать на первом такте в момент подключения фазы обмотки к источнику питания того ключа, который был закрыт на предыдущем такте. Тогда коммутационные процессы, обусловленные появлением отказа, заканчиваются в течение первого такта коммутации, период повторяемости электромагнитных процессов начинается со следующего второго такта. При этом отказ ключа на первых m тактах соответствует его состоянию в исправной машине, а начиная с $(m+1)$ -го такта запрещается включение противоположного ключа стойки ПК, и напряжение фазы электромеханического преобразователя на следующих тактах не изменяется, т.е. остается таким же, как и на первом такте коммутации.

Появление отказа вида «короткое замыкание фазы ЭМП» можно задать любой фазе и на любом такте коммутации при условии, что оба ключа стойки ПК закрыты, а напряжение на неисправной фазе равно нулю. Однако удобнее всего отказ задавать в коммутируемой фазе (подключаемой или отключаемой) на первом такте коммутации, поскольку они уже выделены при расчете алгоритма коммутации. Варианты отличаются только длительностью протекания переходных процессов, обусловленных появлением отказа. При необходи-

мости контроля фазных токов или мгновенных значений электромагнитного момента в процессе перехода от исправного состояния к аварийному отказ удобнее задать в отключаемой фазе. Если выбираем подключаемую фазу, то получаем минимальную длительность переходных процессов, обусловленных отказом.

Предложенный алгоритм расчета электромагнитных процессов в аварийных режимах работы вентильных двигателей реализован для трех способов питания обмотки якоря: от одного источника; от двух источников, связанных разноименными шинами и подключенных к средней точке разомкнутой обмотки; для гальванически развязанных фаз. Отличия в алгоритмах расчета учитывают особенности каждого способа питания, что используется при расчете фазных напряжений и определении минимального числа фаз, при котором возможно функционирование двигателя с отказом каждого вида. Минимальное число фаз определяется с помощью диагностики состояния двигателя на алгоритмическом уровне (анализа текущих алгоритмов коммутации).

Следует отметить, что моменты времени, соответствующие возникновению отказов, учитывают не только особенности работы вентильного двигателя, но и являются удобными с точки зрения получения алгоритмов вычислительных операций при расчете мгновенных значений координат на периоде повторяемости электромагнитных процессов.

Предлагаемая методика была использована при разработке пакетов программ (расчета мгновенных значений координат и энергетических параметров) многофазных вентильных двигателей для полной и неполной коммутации в аварийных режимах работы. В качестве примера результатов расчета приведены зависимости электромагнитной мощности P_{Σ} от частоты вращения V (рис. 2,а) и механические характеристики (рис. 2,б) исправного двигателя (I), при отказе «обрыв ключа ПК» (OK) и «обрыв фазы ЭМП» ($O\Phi$), «короткое замыкание ключа ПК» (KK), «короткое замыкание фазы ЭМП» ($K\Phi$). На характеристиках все переменные даны в относительных единицах.

Двигатель имеет пятифазную ($n=5$) разомкнутую обмотку якоря; фазы гальванически развязаны; в исправном состоянии работают три фазы ($m=3$); относительное индуктивное сопротивление фазы при частоте идеального холостого хода $x=0,25$; m_{Σ} — среднее значение электромагнитного момента на периоде повторяемости электромагнитных процессов.

Учет особенностей работы многофазных вентильных двигателей при отказах элементов и полу-

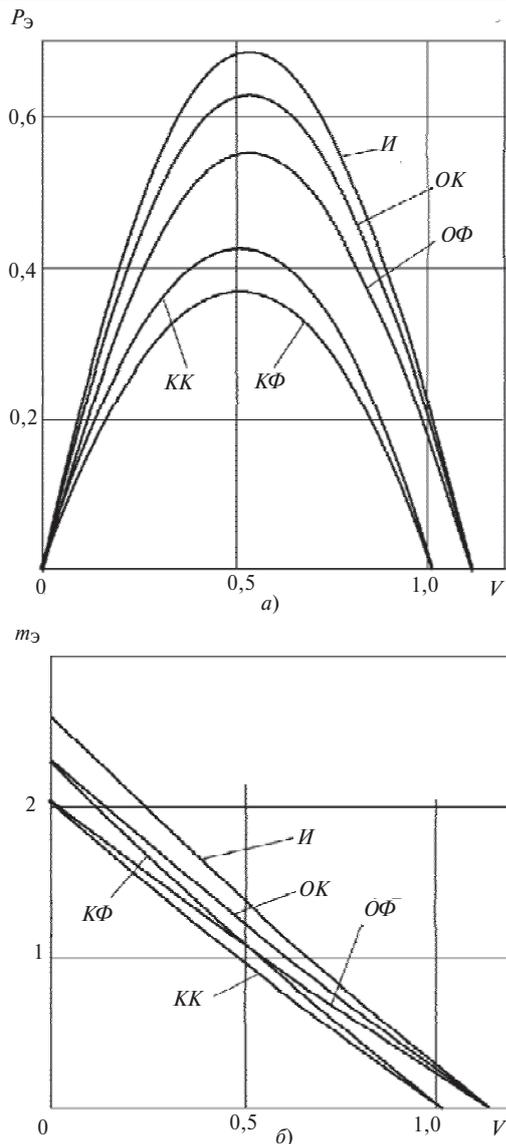


Рис. 2. Зависимость электромагнитной мощности от частоты вращения (а) и механические характеристики (б) исправного двигателя при неполной коммутации трех фаз при отказах элементов силовой части

ченные количественные оценки энергетических параметров позволяют на 25% сократить время разработки вентильных двигателей и на 30% уменьшить объем макетирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лозенко В.К. Математическая модель вентильного двигателя с возбуждением от постоянных магнитов для исследования несимметричных и аварийных режимов работы. — Межвуз. сб. трудов «Применение постоянных магнитов в электромеханических системах». — М.: МЭИ, 1985, вып. 67.
2. Справочник по электрическим машинам, т. 1/Под общ. ред. И.П. Копылова и Б.К. Клокова. — М.: Энергоатомиздат, 1988.
3. Тезисы докладов (Семинар проблем энергетики АН СССР «Методы повышения надежности электромеханических элементов бесконтактных силовых электроприводов», 14–15 октября 1987 г.)/Р.А. Андрианова, С.Г. Воронин, С.А. Петрищев, В.М. Рублев. — Куйбышев: Изд-во КуАИ, 1987.
4. Сидельников Б.В. Перспективы развития и применения бесконтактных регулируемых электродвигателей. — Изв. вузов. Электромеханика, 2005, № 2.
5. Козаченко В.Ф. Основные тенденции развития встроенных систем управления двигателями и требования к контроллерам. — СНИП NEWS, 1999, № 1.
6. Вигриянов П.Г. Электромагнитные процессы многофазных вентильных двигателей: монография. — Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2007.
7. Белецкий В.В. Теория и практические методы резервирования радиоэлектронной аппаратуры. — М.: Энергия, 1977.

[09.07.12]

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

* * *

Уважаемые читатели!

Номера журнала «ЭЛЕКТРИЧЕСТВО» за 2010–2011 гг., а также ксерокопии статей с 1917 г. можно приобрести в редакции журнала

(Москва. Красноказарменная ул. 14, комн. 3-111, тел. (495) 362-7485)