

# ОБЩАЯ МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ УСТАНОВИВШИХСЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ МНОГОФАЗНЫХ ВЕНТИЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ МАЛОЙ МОЩНОСТИ В ШТАТНЫХ И АВАРИЙНЫХ РЕЖИМАХ РАБОТЫ

Вигриянов П. Г.

Южно-Уральский государственный университет, г. Златоуст, Россия,  
vpg\_postbox@mail.ru  
Томский политехнический университет, г. Томск, Россия,

**Аннотация:** Рассматриваются основные вопросы исследования физических процессов многофазных вентильных двигателей малой мощности. Предложена общая методика исследования установившихся электромагнитных процессов в двигателях повышенной надежности с постоянной и изменяемой структурой электромеханического преобразователя для штатных и аварийных режимов работы.

**Ключевые слова** – многофазный вентильный двигатель, установившиеся электромагнитные процессы, штатные режимы, аварийные режимы, надежность.

систем автоматики различного назначения с повышенным ресурсом работы в РФ не может удовлетворять предъявляемым в настоящее время требованиям к космической технике по массе и ресурсу космических аппаратов [2]. Попытки использования традиционных методов обеспечения повышенной надежности при одновременном выполнении совокупности показателей надежности не дают положительных результатов.

Возникает научная проблема – необходимость разработки исполнительных элементов систем автоматических устройств, способных обеспечить необходимый уровень надежности в различных сочетаниях её составляющих.

## I. ВВЕДЕНИЕ

Разработка систем авиационной и космической техники научного, оборонного, социального и хозяйственного назначения требует увеличения важности выполняемых функций, роста сложности аппаратуры и повышения требований к надежности автономных объектов [1].

Жесткие требования к надежности предъявляются при разработке и создании исполнительных элементов электроприводов систем автоматики космической и медицинской техники, атомной промышленности, когда вместе с заданием среднего времени безотказной работы машины (до 20.000 – 100.000 часов), наработкой до отказа (5.000-10.000 час.) или назначенным сроком службы (15-20 лет) определена высокая вероятность ее безотказной работы ( $p=0,999-0,9999$ ). Исследования, проведенные ФГПУП «ВНИИМЭМ», показали, что существующее положение дел по производству электродвигателей

## II. ПРИМЕНЕНИЕ СИСТЕМНОГО ПОДХОДА К ИССЛЕДОВАНИЯМ И ПРОЕКТИРОВАНИЮ

Положительное решение этой проблемы становится возможным, если при разработке бесконтактных электроприводов реализовать системный подход к проектированию технических систем [3]. В связи с этим уже на этапе предварительного проектирования необходимо учитывать современный уровень развития технологии электромашиностроения и электроники, проанализировать различные варианты схем исполнения машины, возможные отказы элементов и исследовать их влияние на работоспособность двигателя, предусмотреть оптимальные способы резервирования, мероприятия по диагностике технического состояния и управлению надежностью ВД. Перспективным вариантом в этом направлении является применение бесконтактных электроприводов

на основе многофазных вентильных двигателей (ВД) постоянного тока.

Но даже применение современных высококачественных материалов, элементов, конструкций и технологий производства в электромашиностроении не дает желаемой величины показателей безотказности и долговечности ВД. В таких случаях повышенные требования по надежности работы могут быть получены, если при наличии отказов элементов схемы ВД он сохранит работоспособность. Для этого число фаз ЭМП нужно выбрать таким, чтобы отказ любого элемента приводил только к повреждению двигателя, сохраняя его работоспособное состояние [4-5].

Таким образом, выбор схемы машины и числа фаз ЭМП при проектировании ВД нужно проводить исходя из условия обеспечения его работоспособности при наличии отказов элементов схемы.

В настоящее время имеется математический аппарат, позволяющий рассчитать составляющие показатели надежности для выбранной элементной базы и схемы исполнения ВД. Однако для определения работоспособности ВД этого недостаточно. Необходима количественная оценка выходных координат двигателя в штатных и аварийных режимах работы при выбранной схеме соединения обмотки якоря, способе питания и алгоритме коммутации фаз обмотки. Таким образом, для реализации данного подхода к проектированию исполнительных элементов бесконтактных электроприводов необходимо развитие теории и инженерных методов исследования установившихся электромагнитных процессов в ЭМП многофазных ВД в штатных и аварийных режимах работы.

Проведенный анализ методов исследования физических процессов ВД позволил выявить особенности научной проблемы и обосновать выбор метода исследования ЭМП с изменяющейся структурой в исправном состоянии и при отказах отдельных элементов.

К основным особенностям проблемы следует отнести:

- необходимость использования только численных методов;
- изменение структуры ЭМП при работе машины, что дополнительно требует решения вопросов устойчивости решений систем дифференциальных уравнений любого высокого порядка и однозначности получаемых результатов при широком диапазоне изменения параметров схемы ЭМП;
- неопределенность структуры ЭМП в штатных режимах при неполной коммутации и аварийных режимах работы.

Исходными данными для реализации общей методики является существующий ряд особенностей в конструкции ЭМП и повторяющихся закономерностей при работе ВД.

Многофазные ВД обладают широким набором алгоритмов коммутации фаз обмотки якоря. Если в преобразовании энергии участвуют все фазы обмотки ( $n$ ), то такой алгоритм называют *полной* коммутацией, в противном случае имеем набор алгоритмов *неполной*

коммутации. Из этого набора рассмотрим только те алгоритмы, в которых при выбранном числе работающих фаз ( $m$ ) эффективность преобразования энергии будет максимальной [6].

Для исследования установившихся физических процессов ВД выбран метод исследования по мгновенным значениям координат, который обладает наибольшей точностью расчетов и базируется на том, что электромагнитные процессы на всех межкоммутационных интервалах (МКИ) протекают одинаково. Необходимо лишь найти единый способ математического описания этой связи для различных вариантов схем соединения (замкнутые и разомкнутые обмотки, гальванически развязанные фазы), способов питания (от одного, двух и  $n$  источников) и алгоритмов коммутации (полная и неполная) фаз обмотки якоря.

Рассмотрим основные принципы построения и требования к общей методике исследования физических процессов ЭМП многофазных ВД.

1. Алгоритмы управления коммутацией фаз обмотки якоря ЭМП для различных схем соединения должны рассчитываться, а не составляться. Должен быть реализован единый подход к расчету алгоритмов коммутации на всех тактах полной и неполной коммутации.

2. При расчетах алгоритмов коммутации необходимо реализовать автоматический последовательный переход от одного такта (участка МКИ) коммутации к другому такту (участку МКИ) на периоде повторяемости электромагнитных процессов с учетом изменения структуры ЭМП.

3. Методика расчета должна позволять проводить исследование электромагнитных процессов в штатных режимах при изменяющейся в процессе работы структуре ЭМП.

4. Обеспечить способ учета отказов элементов двигателя при расчетах алгоритмов коммутации.

5. Методика должна обеспечить формализацию составления и решения систем дифференциальных уравнений, описывающих электромагнитные процессы в ЭМП с любым числом фаз в штатных режимах работы и при отказах элементов схемы ВД; математический аппарат должен иметь форму, удобную для программирования.

6. Найти способ описания отказа и учет его влияния на мгновенные значения координат на каждом такте периода повторяемости физических процессов.

7. Методика должна быть единой для предложенных схем соединения фаз обмоток, способов их питания, алгоритмов полной и неполной коммутации.

8. Решение должно обеспечивать абсолютную устойчивость вычислительного процесса для штатных и аварийных режимов работы ВД.

Первым шагом в реализации общей методики следует изменить форму записи алгоритмов коммутации. Если ранее на каждом такте коммутации состояние фаз записывалось в виде матрицы, то теперь предлагается записывать порядок подключения фаз на каждом такте коммутации в виде замкнутого ряда чисел, количество которых определяется числом фаз обмотки якоря. Подключение начала фазы к шине той

или другой полярности учитывается знаками плюс или минус. Нулем обозначим ту фазу, которая не принимает участия в работе преобразователя при неполной коммутации на данном интервале (или на одном из его участков).

Для реализации этого положения предложено применять специальную коммутационную функцию (*SDB*), которая связывает фазные координаты на смежных МКИ при симметричной коммутации [6].

Вторым шагом предлагается члены ряда при полной коммутации записывать в определенной последовательности, определяемой особенностями протекания физических процессов в ЭМП на смежных МКИ. При неполной коммутации желательнее получить аналогичные последовательности для каждого участка интервала. Достигается это за счет предложенного способа формального описания и расчета алгоритмов управления коммутацией фаз ВД с любым числом фаз обмотки якоря для штатных режимов работы при постоянной и изменяющейся структуре ЭМП.

Третьим шагом в математическом описании является выявление возможности простой модификации электрического состояния фаз при неполной коммутации на текущем МКИ (или его участке) с целью получения электрического состояния фаз следующего МКИ (или его участка), причем изменения в записи алгоритмов при переходе от одного участка к другому должны быть минимальными.

Одним из основных требований является обеспечение единого подхода к расчету алгоритмов как полной, так и неполной коммутации. Этому требованию и подчиняется принятый ранее порядок расчета каждого последующего члена ряда при полной коммутации через предыдущий член и специальную коммутационную функцию *SDB*. Точно также рассчитывается порядок подключения фаз при неполной коммутации. Особенностью неполной коммутации является заложенное в алгоритм работы двигателя изменение структуры ЭМП в течение МКИ. Такая особенность дополнительно требует на каждом участке МКИ однозначного определения положения в алгоритме коммутации как подключаемой, так и отключаемой фазы обмотки. Причем положение этих фаз должно определяться расчетным путем. Для удобства модификации алгоритмов коммутации предложено на первом месте ряда располагать подключаемую к источнику питания фазу, а на последнем месте – отключаемую.

В работе [6] показано, что подавляющее число отказов элементов схемы может быть сведено к четырем видам отказов силового канала ВД:

- обрыв силового ключа полупроводникового коммутатора;
- короткое замыкание силового ключа полупроводникового коммутатора;
- обрыв фазы ЭМП;
- короткое замыкание фазы ЭМП.

Расчет алгоритмов коммутации в аварийных режимах работы проводится так же, как и для штатных режимов. Дополнительно на алгоритм штатного

режима накладывается метка, указывающая вид и место отказа элемента силового канала.

Рассмотрим сначала методику расчета физических процессов при неполной коммутации [7]. Для исследования установившихся электромагнитных процессов составляется система дифференциальных уравнений в естественных фазных координатах. Число уравнений системы определяется числом независимых контуров для выбранной схемы ВД. Причем при использовании алгоритмов неполной коммутации число независимых контуров на каждом МКИ изменяется. Это приводит к необходимости описания физических процессов на каждом из участков МКИ и определению границ каждого участка.

В методике расчета предлагается переход к относительным единицам и определенному порядку записи уравнений в системе. В качестве базисных величин удобно использовать номинальное напряжение питания двигателя, ток короткого замыкания фазы и частоту идеального холостого хода. При этом происходит замена независимой переменной: время заменяется углом поворота ротора.

При записи системы уравнений на первом месте следует размещать контур, содержащий подключаемую к источнику фазу. Каждое следующее уравнение определяется величиной специальной коммутационной функции. Тогда на последнем месте будет расположено уравнение контура, содержащего отключаемую фазу.

Определение границ участков сводится к решению системы уравнений относительно тока отключаемой фазы и определению угла его затухания. Поскольку ток описывается трансцендентным уравнением, то следует обратить внимание на однозначность и достоверность получаемого решения.

Для формализации математического описания предлагается предварительно аналитически вычислить промежуточные интегралы, тогда при вычислениях фазных координат достаточно подставить полученные расчетным путем пределы изменения независимой переменной. Такой подход позволяет получить рекуррентные соотношения и формализовать решение системы уравнений при любом числе независимых контуров.

Исследование физических процессов при полной коммутации фаз обмотки якоря можно проводить, используя классическую теорию электрических машин или предлагаемую методику исследования электромагнитных процессов при неполной коммутации [8]. Следует только отметить, что полная коммутация является частным случаем неполной коммутации, при которой отключаемая фаза является подключаемой к источнику фазой.

Таким образом, методика обеспечивает формализацию записи и решения систем дифференциальных уравнений, описывающих установившиеся электромагнитные процессы многофазных ВД в исправном состоянии при полной и неполной коммутации.

Методику исследования установившихся электромагнитных процессов в штатных режимах работы можно распространить и на исследование

процессов в аварийных режимах работы. Это возможно потому, что состояния силовых ключей полупроводникового коммутатора и фаз обмотки якоря ЭМП в штатных и аварийных режимах аналогичны [9].

Но в отличие от штатных режимов исследование физических процессов проводится не на одном МКИ, а на периоде повторяемости электромагнитных процессов, который содержит несколько МКИ. Кроме того, в результате отказов элементов появляются дополнительные изменения структуры ЭМП.

С учетом этого при расчете установившихся электромагнитных процессов в аварийных режимах работы ВД реализуем следующий подход:

– на первом такте задаем количество и полярность подключения фаз в соответствии с алгоритмом коммутации исправной машины, рассчитываем фазные координаты;

– задаем номер такта коммутации, в течение которого возникает отказ, его вид и место возникновения;

– определяем начальный и конечный такты периода повторяемости;

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

– проводим расчет мгновенных значений фазных координат на каждом участке МКИ для первого и последующих тактов периода повторяемости с учетом их состояния на предыдущем участке;

– при необходимости рассчитываем энергетические параметры ВД на периоде повторяемости электромагнитных процессов.

### III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, предлагаемая методика является общей, поскольку реализует единый подход для расчета установившихся электромагнитных процессов для предложенных схем соединения фаз обмоток, способов их питания и алгоритмов полной и неполной коммутации в штатных и аварийных режимах работы.

На основе общей методики разработано алгоритмическое и программное обеспечение. На программные комплексы получено 9 свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ. Комплексы были использованы при разработке бесконтактных электроприводов повышенной надежности на основе ВД. Ресурсные испытания опытных образцов, проведенные на предприятии

Заказчика, подтвердили улучшение показателей надежности электроприводов на основе многофазных ВД и правильность принятых технических решений.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Козлов, Д.И. Конструирование автоматических космических аппаратов. – М.: Машиностроение, 1996.
2. Путников, В.В. Бесконтактные электродвигатели постоянного тока с повышенной наработкой для космических аппаратов / В.В. Путников, А.В. Путников, В.Б. Уваров // Электротехника. – 2007. – № 2. – С. 18-23.
3. Надежность и эффективность в технике. Методология. Организация. Терминология: справочник / под ред. А.И. Рембезы. – М.: Машиностроение, 1986. – Т.1. – 224 с.
4. Андрианова, Р.А. Оценка вероятности безотказной работы многосекционных вентильных двигателей / Р.А. Андрианова, С.Г. Воронин // Электротехника. – 1989. – № 9. – С. 27-30.
5. Воронин, С.Г. Обеспечение работоспособности электропривода с синхронным двигателем при единичных отказах в силовом канале / С.Г. Воронин, П.О. Шабуров, Д.А. Курносов // Электричество. – 2010. – № 11. – С. 39-42.
6. Вигриянов, П.Г. Электромагнитные процессы многофазных вентильных двигателей: монография / П.Г. Вигриянов. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2007. – 143 с.
7. Вигриянов, П.Г. Общая методика исследования электромагнитных процессов вентильного двигателя с изменяемой структурой электромеханического преобразователя коммутации / П.Г. Вигриянов // Электричество. – 2012. – № 8. – С. 44-51.
8. Вигриянов, П.Г. Общая методика исследования электромагнитных процессов вентильного двигателя при полной коммутации / П.Г. Вигриянов // Электротехника. – 2012. – № 10. – С. 31-35.
9. Вигриянов, П.Г. Особенности исследования электромагнитных процессов вентильных двигателей с изменяемой структурой электромеханического преобразователя при отказах элементов силовой части / П.Г. Вигриянов // Электричество. – 2012. – № 12. – С. 46-50.