

Определение периода повторяемости электромагнитных процессов в аварийных режимах работы многофазных вентильных двигателей малой мощности

ВИГРИЯНОВ П.Г.

Филиал ЮУрГУ, Златоуст, Россия

Возрастающие требования к показателям надежности технических систем приводят к необходимости применения новых подходов к проектированию электрических машин и электропривода как электротехнического комплекса, одним из которых является системный подход. Для обеспечения совокупности повышенных показателей надежности предложено использовать многофазные вентильные двигатели, обладающие структурной и алгоритмической избыточностью. Показано, что для реализации вариантов схем вентильных двигателей кроме показателей надежности необходима количественная оценка его энергетических возможностей в штатных и аварийных режимах работы. Важнейшим этапом практической реализации вычислительного процесса при количественной оценке энергетических возможностей является определение периода повторяемости электромагнитных процессов. Рассмотрены основные вопросы определения периода повторяемости квазиустановившихся электромагнитных процессов электромеханического преобразователя энергии многофазных вентильных двигателей малой мощности при проектировании систем повышенной надежности. Это позволило реализовать численное решение систем дифференциальных уравнений, описывающих физические процессы в вентильных двигателях с изменяемой структурой электромеханического преобразователя в штатных и аварийных режимах работы.

К л ю ч е в ы е с л о в а: многофазный вентильный двигатель, электромагнитные процессы, изменяемая структура электромеханического преобразователя, штатные и аварийные режимы работы

Планами Российской Федерации на освоение ближнего и дальнего космоса, а также с целью укрепления национальной безопасности предусматривается на первом этапе опережающее создание ключевых технологий, элементов и целевых приборов для космических комплексов, позволяющих создавать ракетно-космическую технику мирового уровня [1].

Вопросам обеспечения надежности при проектировании, изготовлении и эксплуатации электрических машин как общепромышленного применения [2, 3], так и машин систем автоматики всегда уделялось большое внимание [4]. В этих работах авторы ограничиваются рассмотрением лишь трехфазных двигателей переменного тока. Публикаций о повышении надежности двигателей за счет обеспечения структурной избыточности очень мало [5]. Однако несмотря на значительные усилия в области повышения надежности электрических машин и электроприводов в целом, за последние 35 лет уровень надежности остается недостаточно высоким и не удовлетворяет всё возрастающим требованиям. Такое положение привело к пониманию необходимости применения новых подходов к проектированию электрических машин и электропривода как электротехнического комплекса, одним из которых является системный подход [6, 7].

Для устройств систем автоматики [8, 9] жесткие требования предъявляются, в первую очередь, к показателям составляющих надежности. Двигатели систем автоматики относятся к неремонтируемым устройствам. Для оценки надежности таких машин чаще всего используются показатели нескольких её составляющих [7, 9].

Разработка вентильных двигателей (ВД) позволила получить более высокие показатели составляющих надежности электроприводов систем автоматики по сравнению с классическими исполнительными двигателями постоянного тока и управляемыми асинхронными двигателями [4]. Однако практическое применение ВД с малым числом фаз показало, что, например, для обеспечения работоспособности авиационных механизмов приходится использовать несимметричные и аварийные режимы работы. Но и в этих случаях не всегда удается получить заданные показатели надежности [11].

Особенностью повышенных требований по надежности механизмов автономных объектов является необходимость одновременного обеспечения нескольких составляющих показателей надежности. Чаще всего это вероятность безотказной работы $p = 0,9900 - 0,9999$; наработка до отказа 5000 – 20000 ч; назначенный ре-

сурс 110000 – 350000 включений при суммарном времени работы 250 – 5500 ч (или назначенный срок службы 14 – 20 лет); средний срок сохраняемости 9 – 20 лет.

Выполнить такие требования можно в том случае, если допустить возникновение в процессе эксплуатации одного или нескольких отказов элементов, которые приведут устройство в поврежденное состояние, но не вызовут потери его работоспособности. При этом нужно не только рассчитать показатели составляющих надежности, но и иметь количественную оценку мгновенных значений координат и интегральную оценку энергетических параметров машины.

Для эффективного использования в этом направлении новых методов резервирования необходим соответствующий математический аппарат анализа характеристик ВД, адекватно отражающий свойства реального объекта и позволяющий учесть многообразие технических требований, предъявляемых к нему в условиях мелкосерийного и уникального производства встраиваемых в готовый механизм исполнительных элементов [10, 13].

Одним из путей обеспечения совокупности повышенных показателей составляющих надежности является применение многофазных ВД, обладающих структурной, алгоритмической и функциональной избыточностью. Наличие избыточности дает возможность сохранить работоспособность машины при отказах её отдельных элементов. Но для реализации таких вариантов исполнения схемы ВД необходимо получить количественную оценку его энергетических возможностей при различных алгоритмах управления коммутацией фаз обмотки якоря в штатных и аварийных режимах работы [13].

Электромагнитные процессы в электромеханическом преобразователе (ЭМП) исправного ВД повторяются на каждом межкоммутационном интервале (МКИ), который может иметь в зависимости от применяемого алгоритма коммутации один или два участка [13, 14]. Поэтому исследование мгновенных значений фазных координат и энергетических параметров ВД в исправном состоянии проводится на одном МКИ.

В аварийных режимах работы исследование физических процессов усложняется, а их протекание необходимо проводить на периоде повторяемости электромагнитных процессов, который представляет собой совокупность нескольких следующих друг за другом МКИ. Трудность заключается в том, что необходимо не только знать порядок подключения фаз на каждом МКИ, но и в том, каким образом учитывать изменение структуры ЭМП, обусловленное как алгоритмом коммутации, так и типом возникшего отказа.

Цель работы. Определение периода повторяемости физических процессов представляет собой сложную самостоятельную задачу, поскольку определение границ участков на каждом МКИ и на периоде повторяемости электромагнитных процессов в аварий-

ных режимах работы требует решения трансцендентных уравнений. Решение системы дифференциальных уравнений, описывающей переходные процессы в электромеханическом преобразователе, возможно только численными методами [15]. Изменение структуры ЭМП в штатных и аварийных режимах работы требует математического описания алгоритмов коммутации и формализации этого описания с целью реализации вычислительного процесса. Таким образом, исследование электромагнитных процессов в ЭМП вентильных двигателей в штатных и аварийных режимах необходимо проводить по мгновенным значениям координат с помощью математической модели с применением численных методов.

Для разработки математической модели исследования физических процессов в электромеханических преобразователях ВД повышенной надежности необходима методика расчета периода повторяемости электромагнитных процессов в штатных и аварийных режимах работы. При этом математическая модель должна позволять варьировать число фаз ЭМП и алгоритмы коммутации в каждом варианте исполнения схемы ВД.

Методика определения периода повторяемости электромагнитных процессов. При неполной коммутации в работе участвует только часть фаз, структура ЭМП изменяется, а МКИ делится на два участка, границу которых еще требуется определить путем численного решения трансцендентного уравнения. Теоретически возможны различные результаты решения: уравнение не имеет корней (на рассматриваемом МКИ), уравнение имеет один или несколько корней. Причем физический смысл имеет только первый корень. По этой причине алгоритм решения трансцендентного уравнения должен быть выполнен так, чтобы изменение независимой координаты (угла поворота ротора) исключало пропуск первого корня. Например, шаг изменения угла задавать малым и контролировать изменение знака тока в отключаемой фазе. Это является признаком наличия корня уравнения. После этого значение независимой переменной нужно уточнить, используя метод половинного деления.

Затухание тока в отключаемой фазе приводит к изменению числа работающих фаз, а значит, к изменению структуры ЭМП. Этот факт заставляет изменять алгоритм коммутации фаз обмотки якоря ЭМП, следовательно, и изменять систему дифференциальных уравнений на втором участке МКИ.

В исправной машине (в штатных режимах работы) связь между фазными координатами на смежных МКИ обычно составляется вручную и записывается в виде матрицы состояний, в которой число столбцов определяет число тактов коммутации за полный цикл изменения электромагнитных процессов (один оборот ротора или 2π рад), а число строк – число фаз двигателя [16]. При вариации числа фаз двигателя такое описание за-

нимает много времени и неудобно с точки зрения формализации вычислительного процесса.

В работе [13] для многофазных машин предложено не составление алгоритмов коммутации фаз вручную, а проведение их расчета. Для реализации этого предложения нужно вместо буквенного обозначения фаз ввести цифровое. Тогда порядок расположения магнитных осей фаз обмотки будет определять номер соответствующей фазы. За первую фазу может быть принята любая из них, направление расположения магнитных осей фаз по расточке машины удобнее задавать так, чтобы оно совпадало с направлением вращения ротора. При этом порядок подключения фаз обмотки ЭМП (алгоритм коммутации) представляет собой ряд натуральных чисел со знаком «плюс» или «минус». Знак указывает полярность шины источника питания, к которой подключается начало каждой фазы. Такая форма записи позволяет просто переходить от алгоритма коммутации на одном МКИ к алгоритму коммутации на смежном МКИ путем перемещения членов ряда на одну позицию вправо или влево, в зависимости от направления вращения ротора. При полной коммутации число членов ряда равно числу фаз ВД. При неполной коммутации фазы, не участвующие в работе, обозначаются нулем, а число ненулевых членов ряда равно числу работающих фаз. При таком порядке записи алгоритмов просто рассчитывать алгоритмы на смежных участках МКИ при неполной коммутации. Для этого достаточно обнулить последний ненулевой член ряда, представляющий собой номер отключаемой от источника питания фазы.

Такой подход к расчету алгоритмов коммутации дает возможность последовательного определения порядка подключения фаз на любом участке МКИ при любом числе МКИ, т. е. при неограниченном угле поворота ротора.

Кроме того, предложенная форма записи алгоритмов коммутации позволяет полностью использовать информацию о состоянии координат в коммутируемых фазах в штатных режимах работы. Это определяет положение ротора, при котором происходит изменение структуры ЭМП: ток в отключаемой фазе должен уменьшиться до нуля в течение МКИ; начальное значение тока в подключаемой фазе равно нулю.

Эта информация является необходимой при решении систем дифференциальных уравнений, поскольку определяет конечные и начальные значения фазных координат. Кроме того, нарушение первого условия используется для проверки выполнения принятого алгоритма неполной коммутации.

В аварийных режимах работы полный цикл изменения электромагнитных процессов (период повторяемости электромагнитных процессов) продолжается в течение нескольких МКИ, следующих друг за другом, и зависит от числа фаз ЭМП и типа отказа элементов схемы. На алгоритм работы исправной машины не-

обходимо наложить условия отказа. Принимая самые жесткие требования к надежности машины, потребуем обеспечения работоспособности машины при отказе любого элемента в любой функциональной части двигателя: в ЭМП; полупроводниковом коммутаторе (ПК) или датчике положения ротора. По условиям протекания эти отказы отличаются друг от друга. Однако общим у них является тот факт, что все они в конечном итоге сказываются на работе элементов силового канала ВД: силовых ключах ПК и фазах обмотки ЭМП. Это позволяет исследовать физические процессы в аварийных режимах работы двигателей, рассматривая отказы только в этих элементах силового канала.

Поскольку по характеру сигналов ВД является дискретным устройством, то в работе [13] предложено все виды отказов элементов схемы свести по характеру отказов к двум видам: обрыв и короткое замыкание. В зависимости от места возникновения отказы каждого вида делятся на типы: обрыв силового ключа ПК; обрыв фазы ЭМП; короткое замыкание силового ключа ПК; короткое замыкание фазы ЭМП.

При определении периода повторяемости электромагнитных процессов в аварийных режимах работы будем рассматривать только эти четыре типа отказов. Приступая к рассмотрению этого вопроса, следует отметить, что хорошо было бы использовать имеющийся математический аппарат исследования физических процессов штатных режимов работы для исследования аварийных режимов. Этому способствует тот факт, что состояние отказавшего элемента силовой части принципиально не отличается от состояния этих элементов в исправной машине (как для силовых ключей ПК, так и для фаз ЭМП). Возможны два варианта расчета.

Вариант первый. В общем случае физические процессы в ЭМП имеют полный цикл изменения при повороте ротора на 2π рад. С теоретической точки зрения можно ввести неисправность на первом МКИ и последовательно провести расчет мгновенных значений координат для каждого участка каждого МКИ периода повторяемости электромагнитных процессов. Затем сравнить конечные и начальные значения всех фазных координат.

Однако практическая реализация вычислительного процесса сталкивается с необходимостью решения таких вопросов, как задание момента возникновения отказа; для каждого участка каждого МКИ периода повторяемости необходимо иметь математическое описание физических процессов с учетом типа неисправности; выбор метода численного интегрирования; оценка достоверности полученных решений.

Такой подход вносит элемент недостоверности в полученные результаты, и его желательно избегать при проведении исследований ВД для новых вариантов схемных решений и(или) при предельных параметрах фаз обмотки. Основные причины кроются в громоздкости математического описания электромагнитных

процессов для всего периода повторяемости, точности расчета фазных токов и точности определения границ участков на каждом из МКИ периода повторяемости. Особая трудность – определение момента изменения структуры ЭМП, вызванного отказом какого-либо элемента.

Наибольшей неприятностью данного варианта решения является тот факт, что вычислительный процесс может сходиться, но физический смысл при полученных результатах расчета теряется.

Предложенный вариант может быть использован для машин с относительно малым числом фаз при ограниченном наборе алгоритмов коммутации. Практическая реализация данного варианта требует организации вычислительного процесса в режиме диалога.

К недостаткам варианта относятся большие затраты времени на исследование физических процессов и необходимость глубокого знания оператором схем построения вентильных двигателей, численных методов решения дифференциальных и трансцендентных уравнений.

Вариант второй. Наиболее рациональным с практической точки зрения является другой вариант определения периода повторяемости электромагнитных процессов. Основная идея состоит в следующем. Сначала рассчитываем алгоритм коммутации и мгновенные значения координат ВД для штатного режима работы (двигатель в исправном состоянии). Это позволяет получить достоверные значения фазных координат, которые используются для дальнейшего расчета в качестве начальных условий. Для расчета алгоритмов коммутации и мгновенных значений координат используем математический аппарат, применяемый для штатных режимов. После этого необходимо перейти к квазиустановившемуся режиму работы в аварийном режиме с заданным типом отказа. Для этого требуется провести сначала расчет алгоритма коммутации и соответствующий расчет мгновенных значений координат на нескольких следующих друг за другом МКИ. При этом значение независимой переменной (угла поворота ротора) выходит за пределы одного интервала. Формально применить это математическое описание нельзя, поскольку в штатных режимах работы интегрирование проводится в пределах одного интервала. Однако вопрос может быть решен, если ввести новую независимую координату, которая будет изменяться в тех же пределах, что и независимая координата в штатных режимах работы, т. е. в пределах одного текущего МКИ. Назовем эту координату относительной. Теперь на каждом текущем МКИ расчет мгновенных значений координат проводим, используя математический аппарат, соответствующий работе исправной машины только в относительных координатах. Результаты электромагнитного расчета сохраняются в массивах фазных координат (начиная с первого) в реальных текущих координатах, которые можно назвать абсолютными. Следует отметить, что, приступая к расчетам текущего

МКИ в аварийных режимах, расчет алгоритмов коммутации проводится в два этапа. Сначала рассчитывается алгоритм коммутации исправной машины, затем на него накладывается метка, соответствующая типу отказа. Введение отказа на некоторых МКИ может привести к дополнительному изменению структуры ЭМП, т.е. количество участков на этих интервалах увеличивается. Однако переход от одного участка к другому реализуется точно так же, как это делали в исправной машине. Кроме того, необходимо учитывать особенности функционирования элементов силового канала. К ним относится, во-первых, определение числа фаз, участвующих в преобразовании энергии. Если их число меньше минимально допустимого (что зависит от числа, схемы соединения и способа питания фаз обмотки ЭМП), то двигатель отключен от источника питания. Это режим прерывистых токов.

Во-вторых, силовые ключи одной стойки коммутатора не могут быть открытыми одновременно, поэтому в схеме коммутатора всегда имеется защита от режима сквозных токов.

В аварийных режимах на некоторых тактах коммутации возникает ситуация, когда нужно открывать один исправный ключ стойки при замкнутом накоротко втором ключе. Такое состояние должно быть исключено, значит, в расчетах алгоритмов коммутации включение исправного ключа должно быть запрещено, а это приводит к дополнительному изменению алгоритма коммутации и структуры преобразователя.

Построение алгоритмов расчета позволяет автоматически учитывать тип отказа и сократить время вычислительных операций за счет грамотно выбранного момента введения метки типа отказа исходя из наибольшей вероятности его возникновения. После этого следует проводить расчеты алгоритмов и фазных координат, контролируя при этом переходные процессы в неисправной фазе. Как только они закончатся, то следующий такт коммутации (или МКИ) будет являться первым тактом периода повторяемости электромагнитных процессов.

Так, отказ типа обрыв ключа ПК удобно задать на первом же такте, считая, что он возникает в силовом ключе, отключающем фазу от источника питания. Поскольку ток затухает в течение текущего МКИ, то следующий за ним интервал является первым интервалом периода повторяемости.

Предложенный вариант определения периода повторяемости электромагнитных процессов позволяет получить математическую модель многофазного ВД, адаптированную к изменению структуры ЭМП в штатных и аварийных режимах работы.

Предложенная методика определения периода повторяемости электромагнитных процессов в аварийных режимах работы позволяет получить математические модели и рассчитать мгновенные значения фазных координат, а также получить интегральные ха-



Мгновенные значения фазных координат на периоде повторяемости электромагнитных процессов семифазного вентильного двигателя при неполной коммутации пяти фаз

Phase coordinates instantaneous values at the repeatability period of electromagnetic processes of a seven-phase AC converter-fed motor with incomplete commutation of five phases

рактические, по которым оценивается энергетическая эффективность многофазного ВД повышенной надежности с целью определения его работоспособности.

Реализация методики. Второй вариант предложенной методики определения периода повторяемости реализован в [17]. Расчет проводился для семифазного ВД при неполной коммутации пяти фаз. Преобразователь питается от одного источника ($Q = 1$), относительная индуктивность фазы обмотки якоря $\xi = 0,5$; относительная частота вращения ротора $V = 0,25$; тип отказа – обрыв силового ключа в одной из стоек полупроводникового коммутатора.

На рисунке приведены зависимости мгновенных значений токов в исправной фазе (зеленый цвет) и фазе с отказавшим силовым ключом (красный цвет). Фазные координаты приводятся в относительных единицах [13]. При указанном варианте неполной коммутации в исправной машине каждая из семи фаз поочередно подключается в течение пяти тактов к шине одной полярности, затем два такта отключена от источника, после чего подключаются к шине другой полярности (зеленая кривая). В качестве отказавшего принят ключ, отключающий начало четвертой фазы от отрицательной шины источника питания. Ток в этой фазе затухает до нуля в течение одного такта (одного МКИ), а следующий за ним такт является первым тактом периода повторяемости, который имеет длительность 360° (2π рад) или 14 тактов коммутации. Четвертая фаза (красная кривая) подключена к положительной шине источника питания исправным ключом стойки коммутатора только в течение пяти тактов, а остальное время она не принимает участия в работе ЭМП.

Для наглядности оценки полученного результата (по току в неисправной фазе) на рисунке приведены 16 тактов коммутации, первые 14 из которых составляют период повторяемости. Последние два такта приведены для сравнения с двумя начальными тактами периода повторяемости.

Предложенная методика определения периода повторяемости электромагнитных процессов в аварий-

ных режимах работы многофазных ВД малой мощности использована при разработке программного обеспечения исследования физических процессов в ЭМП. На основе полученных результатов разработаны и изготовлены макетные образцы машин. Достоверность результатов расчета подтверждена данными экспериментальных исследований макетных образцов ВД с различным числом фаз [18].

Выводы. Обоснована необходимость применения математического моделирования и расчета алгоритмов коммутации, численных методов решения трансцендентных уравнений и систем дифференциальных уравнений, описывающих электромагнитные процессы в штатных и аварийных режимах работы многофазных ВД.

Рассмотрены два варианта определения периода повторяемости электромагнитных процессов многофазных ВД в аварийных режимах работы. Первый вариант рекомендуется применять при работе в диалоговом режиме на начальных этапах разработки программного обеспечения с целью накопления опыта решения неоднозначных вычислительных операций, второй – в автоматическом режиме.

Предложенная методика позволяет получить математические модели и на их основе исследовать энергетические характеристики ВД по мгновенным значениям координат в аварийных режимах работы, необходимых для оценки работоспособности ВД систем автоматики повышенной надежности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федеральная космическая программа России на 2016–2025 годы (Утверждена постановлением Правительства РФ от 23.03.2016 г. № 230) [Электрон. ресурс] URL: <https://www.roscosmos.ru/22347/> (дата обращения 30.03.2021).
2. Муравлев О.П., Ведяшкин М.В. Эксплуатационная надежность асинхронных двигателей мостовых кранов. – Известия высших учебных заведений. Электромеханика, 2011, № 6, с. 38–41.
3. Михайлов И.Ю., Муравлев О.П., Федянин А.Л. Инженерный анализ эксплуатационной надежности электрического оборудования троллейбуса. – Вестник Кузбасского государственного технического университета, 2016, № 3(115), с. 85–92.

4. Юферов Ф.М. Электрические машины автоматических устройств. М.: Высшая школа, 1988, 479 с.

5. Однокопылов Г.И. Отказоустойчивый многофазный асинхронный электропривод с несинусоидальными токами. – Известия Томского политехнического университета, 2013, т. 322, № 4, с. 151–154.

6. Муравлев О.П. Системный подход к оценке качества при проектировании и изготовлении электрических машин. – Надежность и контроль качества, 1983, № 10, с. 30–36.

7. Надежность и эффективность в технике. Методология. Организация. Терминология: справочник/Под ред. А.И. Рембезы. М.: Машиностроение, 1986, т.1, 224 с.

8. Козлов Д.И., Аншаков Г.П., Агарков В.Ф. и др. Конструирование автоматических космических аппаратов. М.: Машиностроение, 1996. 447 с.

9. Путьников В.В., Путьников А.В., Уваров В.Б. Бесконтактные электродвигатели постоянного тока с повышенной наработкой для космических аппаратов. – Электротехника, 2007, № 2, с. 18–23.

10. Воронин С.Г., Шабуров П.О., Курносов Д.А. Обеспечение работоспособности электропривода с синхронным двигателем при единичных отказах в силовом канале. – Электричество, 2010, № 11, с. 39–42.

11. Лозенко В.К. Вентильные двигатели для авиационных механизмов: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. М.: Изд-во МЭИ, 1985, 35 с.

12. Сандалов В.М. Резервированные электроприводы на базе вентильных двигателей: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03. Челябинск, 2002, 22 с.

13. Вигриянов П.Г. Электромагнитные процессы многофазных вентильных двигателей. Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2007, 143 с.

14. Вигриянов П.Г. Особенности исследования электромагнитных процессов вентильных двигателей с изменяемой структурой электромеханического преобразователя при отказах элементов силовой части. – Электричество, 2012, № 12, с. 46–50.

15. Важнов А.И. Переходные процессы в машинах переменного тока. Л.: Энергия, 1980, 256 с.

16. Лутидзе Ш.И. Основы теории электрических машин с управляемыми полупроводниковыми коммутаторами. М.: Наука, 1968, 302 с.

17. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2012617499 РФ. Расчет мгновенных значений координат многофазных вентильных двигателей малой мощности, питающихся от одного источника, для вариантов неполной коммутации при неисправности типа «обрыв», реф. опубл. в Бюл. «Программы для ЭВМ», 2012, № 4(81), 360 с.

18. Вигриянов П.Г. Общая методика исследования электромагнитных процессов вентильного двигателя с изменяемой структурой электромеханического преобразователя коммутации. – Электричество, 2012, № 8, с. 44–51.

[25.11.2019]

Автор: Вигриянов Павел Георгиевич – доктор техн. наук, профессор кафедры «Электрооборудование и автоматизация производственных процессов» филиала Южно-Уральского государственного университета в г. Златоусте.



Determination of the Electromagnetic Processes Frequency Period in Emergency Operation Modes of Low-Power Multiphase AC Converter-Fed Motors

VIGRIYANOV Pavel G. (The Branch of National Research University - South Ural State University, Zlatoust, Russia) – Professor of the Electrical Equipment and Automation of Production Processes Dept., Dr. Sci. (Eng.).

Increasing requirements for the reliability indicators of technical systems lead to the need to apply new approaches to the design of electric machines and electric drives as an electrical complex, one of which is a systematic approach. To provide a set of increased reliability indicators, it is proposed to use multiphase AC converter-fed motors that differ in structural and algorithmic redundancy. It is shown in order to implement variants of AC converter-fed motor circuit, in addition to reliability indicators, a quantitative assessment of its energy capabilities in normal and emergency operating modes is necessary. The most important stage of the practical implementation of the numerical process in the quantitative assessment of energy capabilities is to determine the period of repeatability of electromagnetic processes. The main issues of determining the period of repeatability of quasi-steady-state electromagnetic processes of an electromechanical energy converter of low-power multiphase AC converter-fed motors in the design of systems of increased reliability are considered. This made it possible to implement the numerical solution of systems of differential equations describing the physical processes in AC converter-fed motors with a variable structure of the electromechanical converter in normal and emergency operating modes.

Key words: multiphase AC converter-fed motor; electromagnetic processes; variable structure of the electromechanical converter; normal and emergency operating modes

REFERENCES

1. **Federal'naya kosmicheskaya programma Rossii na 2016–2025 gody** (*Utverzhdena postanovleniyem Pravitel'stva RF ot 23.03.2016 No.230*) Federal Space Program of Russia for 2016–2025 (Approved by the Decree of the Russian Federation Government on 23.03.2016 No. 230) [Electron Resource] URL: <https://www.ros-cosmos.ru/22347/> (Date of Appeal 30.03.2021).
2. **Muravlev O.P., Vedyashkin M.V.** *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Elektromekhanika – in Russ. (Russian Electromechanics)*, 2011, № 6, pp. 38–41.
3. **Mikhailov I.Yu., Muravlev O.P., Fedyanin A.L.** *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – in Russ. (Bulletin of the Kuzbass State Technical University)*, 2016, No. 3(115), pp. 85–92.
4. **Yuferov F.M.** *Elektricheskiye mashiny avtomaticheskikh ustroystv* (Electric machines of automatic devices). M.: Vysshaya shkola, 1988, 479 p.
5. **Odnokopylov G.I.** *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta – in Russ. (Bulletin of the Tomsk Polytechnic University)*, 2013, vol. 322, No. 4, pp. 151–154.
6. **Muravlev O.P.** *Nadezhnost' i kontrol' kachestva – in Russ. (Reliability and quality control)*, 1983, No. 10, pp. 30–36.
7. **Nadezhnost' i effektivnost' v tekhnike. Metodologiya. Organizatsiya. Terminologiya: spravochnik/Pod red. A.I. Rembezy** (Reliability and efficiency in engineering. Methodology. Organization. Terminology: reference guide / Ed. by A.I. Rembeza). M.: Mashinostroyeniye, 1986, vol.1, 224 p.
8. **Kozlov D.I., Anshakov G.P., Agarkov V.F., etc.** *Konstruirovaniye avtomaticheskikh kosmicheskikh apparatov* (Design of automatic spacecraft). M.: Mashinostroyeniye, 1996, 447 p.
9. **Putnikov V.V., Putnikov A.V., Uvarov V.B.** *Elektrotekhnika – in Russ. (Electrical Engineering)*, 2007, No. 2, pp. 18–23.
10. **Voronin S.G., Shaburov P.O., Kurnosov D.A.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2010, No. 11, pp. 39–42.
11. **Lozenko V.K.** *Ventil'nyye dvigat'yeli dlya aviatsionnykh mekhanizmov: avtoref. dis. ... d-ra tekhn. nauk* (AC converter-fed motors for aircraft mechanisms: abstract of the dis. ... Dr. Sci. (Eng.)). M.: Izd-vo MEI, 1985, 35 p.
12. **Sandalov V.M.** *Rezervirovannyye elektroprivody na baze ventil'nykh dvigateley: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk* (Redundant electric drives based on AC converter-fed motors: abstract of the dis. ... Dr. Sci. (Eng.)). Chelyabinsk, 2002, 22 p.
13. **Vigriyanov P.G.** *Elektromagnitnyye protsessy mnogofaznykh ventil'nykh dvigateley* (Electromagnetic processes of multiphase AC converter-fed motors). Chelyabinsk: Izd-vo YuUrGU, 2007, 143 p.
14. **Vigriyanov P.G.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2012, No. 12, pp. 46–50.
15. **Vazhnov A.I.** *Perekhodnyye protsessy v mashinakh peremennogo toka* (Transient processes in AC machines). L.: Energiya, 1980, 256 p.
16. **Lutidze Sh.I.** *Osnovy teorii elektricheskikh mashin s upravlyayemyimi poluprovodnikovymi kommutatorami* (Fundamentals of the theory of electrical machines with controlled semiconductor switches). M.: Nauka, 1968, 302 p.
17. **Svidetelstvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM 2012617499 RF. Raschet mgnovennykh znacheniy koordinat mnogofaznykh ventil'nykh dvigateley maloy moshchnosti pitayushchihsya ot odnogo istochnika dlya variantov nepolnoy kommutatsii pri neispravnosti tipa "obryv", ref. opubl. v byul. «Programmy dlya EVM»** (Certificate of state registration of the computer program 2012617499 of the Russian Federation. Calculation of instantaneous values of coordinates of low-power multiphase AC converter-fed motors powered from a single source for incomplete switching options in case of a fault of the «breakage» type, ref. publ. in the Bulletin «Computer programs»), 2012, No. 4(81), 360 p.
18. **Vigriyanov P.G.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2012, No. 8, pp. 44–51.

[25.11.2019]