

ОСНОВНЫЕ АЛГОРИТМЫ РАСЧЕТА ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ МНОГОФАЗНЫХ ВЕНТИЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ МАЛОЙ МОЩНОСТИ С ИЗМЕНЯЕМОЙ СТРУКТУРОЙ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

П. Г. Вигриянов

Предложены основные алгоритмы общей методики исследования, позволяющие реализовать решение систем дифференциальных уравнений, описывающих электромагнитные процессы в многофазных вентильных двигателях с изменяемой структурой электромеханического преобразователя в штатных и аварийных режимах работы.

Ключевые слова: многофазный вентильный двигатель, электромагнитные процессы, изменяемая структура электромеханического преобразователя, математические модели, алгоритмы коммутации, штатные режимы работы, отказы вентильного двигателя, аварийные режимы работы.

Одним из перспективных путей реализации системного подхода к проектированию вентильных электроприводов повышенной надежности является применение в качестве исполнительного элемента привода многофазного вентильного двигателя (ВД). Однако, выбор схемы ВД, кроме расчета показателей надежности (вероятность безотказной работы $p = 0,9990 - 0,9999$; срок сохраняемости до 100 000 ч; наработка до отказа 12 000 – 15 000 ч), требует обязательного знания энергетических характеристик и (или) мгновенных значений координат исполнительного элемента для машин с разным числом фаз и широким набором алгоритмов коммутации.

В работе [1] предложена методика исследования электромагнитных процессов многофазных ВД в штатных и аварийных режимах работы по мгновенным значениям фазных координат.

Программная реализация методики имеет несколько различных вариантов. Практические исследования вариантов, направленные на разработку оптимальных математических моделей, позволили определить набор алгоритмов, с помощью которых появилась возможность исследования электромагнитных процессов по мгновенным значениям фазных координат как в штатных, так и аварийных режимах работы. Оптимальным будем считать такой вариант реализации программы расчета, который позволяет адаптироваться к изменениям в структуре электромеханического преобразователя (ЭМП) и, вместе с этим, вычислительный процесс должен оставаться абсолютно устойчивым во всем диапазоне изменения его параметров.

Рассмотрим основные алгоритмы, необходимые для реализации этой методики, представляющие особый интерес.

Первой задачей расчета является определение порядка подключения фаз ЭМП на каждом из тактов периода повторяемости электромагнитных

процессов при различных способах коммутации. Коммутацию назовем полной, если в преобразовании энергии участвуют все фазы ЭМП (n), и неполной, если в преобразовании участвуют только часть фаз (m).

Для полной определенности физических процессов необходимо принять дополнительные допущения. За положительное направление принимаем вращение ротора против часовой стрелки. Кроме указания количества фаз n , необходимо ввести обозначение каждой из них. Обычно применяют буквенные обозначения. В нашем случае вместо буквенного удобнее применить цифровое обозначение фаз. При этом считаем, что магнитные оси фаз ЭМП расположены равномерно по расточке машины. Нумерация фаз ведется в положительном направлении.

С учетом принятых допущений алгоритм коммутации будет представлять собой ряд целых натуральных чисел со знаком плюс или минус. Число обозначает номер фазы, а знак – подключение начала фазы ЭМП к шине той или иной полярности.

Рассматривать будем только те алгоритмы коммутации, при которых эффективность преобразования энергии будет максимальной (реверсивное питание фаз обмотки ЭМП, симметричная коммутация), а пульсации электромагнитного момента минимальными (нечетное число фаз).

Расчет алгоритмов симметричной коммутации для любого числа фаз ЭМП исправного ВД (рис. 1) предлагается проводить путем введения специальной коммутационной функции SDB [2]. Физический смысл функции заключается в том, что она связывает номера фаз ЭМП, в которых электромагнитные процессы на смежных межкоммутационных интервалах (МКИ) протекают одинаково. Достоинством функции является то, что она представлена только одним числом.

Для алгоритмов полной симметричной коммутации достаточно задать в исходных данных (1) число фаз ЭМП « n » и дополнительно число работающих фаз « m » в случае неполной коммутации (2). После этого рассчитывается номер подключаемой фазы RN (неполная коммутация), или переключаемой (полная коммутация) фазы (4). Эта последовательность выбрана не случайно. При таком выборе однозначно определено начальное значение тока в подключаемой фазе и конечное значение тока в отключаемой фазе (они равны нулю.) После расчета коммутационной функции SDB , числа тактов коммутации T (6) организуется два цикла. Внутренний цикл (15, 16, 3, 5, 7) по числу фаз создан для последовательного расчета членов ряда $R^T(i)$, за исключением первого. Внешний цикл по номеру такта организуется с целью расчета и вывода (9) параметров этого ряда на каждом такте коммутации. На первом такте первому члену ряда присваивается значение RN (12), а на каждом следующем такте он рассчитывается (13) с помощью специальной коммутационной функции.

Таким образом, рассчитывается порядок подключения фаз ЭМП на каждом из $2n$ тактов периода повторяемости электромагнитных процессов исправного ВД. Алгоритм может быть использован как самостоятельно при расчете алгоритмов коммутации, так и в более сложных программах, где необходимо знать порядок подключения фаз обмотки ЭМП на любом из тактов коммутации как в штатных, так и в аварийных режимах работы.

Так при исследовании электромагнитных процессов исправной машины при неполной коммутации каждый МКИ необходимо разбивать на два участка, имеющих разную структуру ЭМП. Это связано с тем, что ток в отключаемой фазе, обладающей индуктивностью, спадает до нуля какое-то время через обратный вентиль противоположного силового ключа стойки полупроводникового коммутатора. По этой причине на первом участке МКИ в работе участвует $(m + 1)$ фаза, на втором участке – m фаз, а это приводит к необходимости расчета алгоритмов для каждого из участков.

Порядок подключения фаз при возникновении отказа рассчитывается в два этапа: сначала для исправного состояния машины, а затем на алгоритм коммутации исправной машины накладывается отказ в виде метки. Отказ любого элемента схемы ВД в конечном итоге приводит к нарушению функционирования силового канала машины, включающего в себя полупроводниковый коммутатор (ПК) и электромеханический преобразователь. Все отказы элементов схемы ВД сводятся к

четырем видам: «обрыв силового ключа ПК», «короткое замыкание силового ключа ПК», «обрыв фазы ЭМП», «короткое замыкание фазы ЭМП».

В аварийных режимах неисправности в ЭМП и неисправности в ПК указываются метками NOF и NKF . Единичное значение меток означает соответственно обрыв и короткое замыкание силового ключа ПК, нулевое – обрыв и короткое замыкание фазы.

В зависимости от вида неисправности изменяются соответствующим образом знаки и (или) модули членов ряда $R1$ ($R2$) и величины напряжений контуров. Следует отметить, что в аварийных режимах работы возможно изменение структуры ЭМП два раза на одном МКИ. Первое изменение обусловлено алгоритмом коммутации исправной машины, второе – местом и видом отказа.

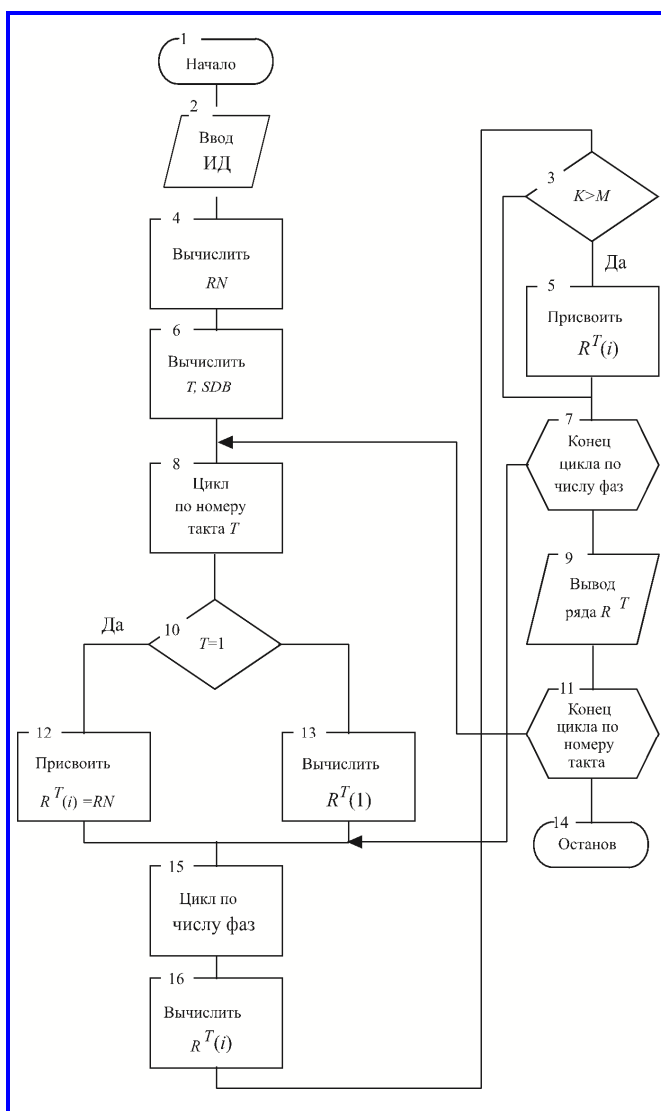


Рис. 1. Схема расчета алгоритмов симметричной коммутации исправного многофазного вентильного двигателя

При решении систем дифференциальных уравнений наибольшие затруднения вызывает определение начальных и граничных условий, что связано с громоздкостью получаемых выражений при полной коммутации и с отсутствием аналитических методов решения трансцендентных уравнений, которые необходимо решать для нахождения граничных условий при неполной коммутации. Кроме того, при отказах элементов часто возникают неопределенные состояния ЭМП, а также приходится решать вопросы, связанные с однозначностью по-

лучаемых результатов и устойчивостью применяемых численных методов решения.

Рассмотрим алгоритмы расчета начальных токов для полной и неполной симметричной коммутации исправной машины.

Алгоритм расчета начальных токов при полной коммутации (рис. 2) можно разделить на три части: подготовка данных, расчет тока в первой фазе и определение всех остальных значений начальных токов и последовательности индексов ряда R .

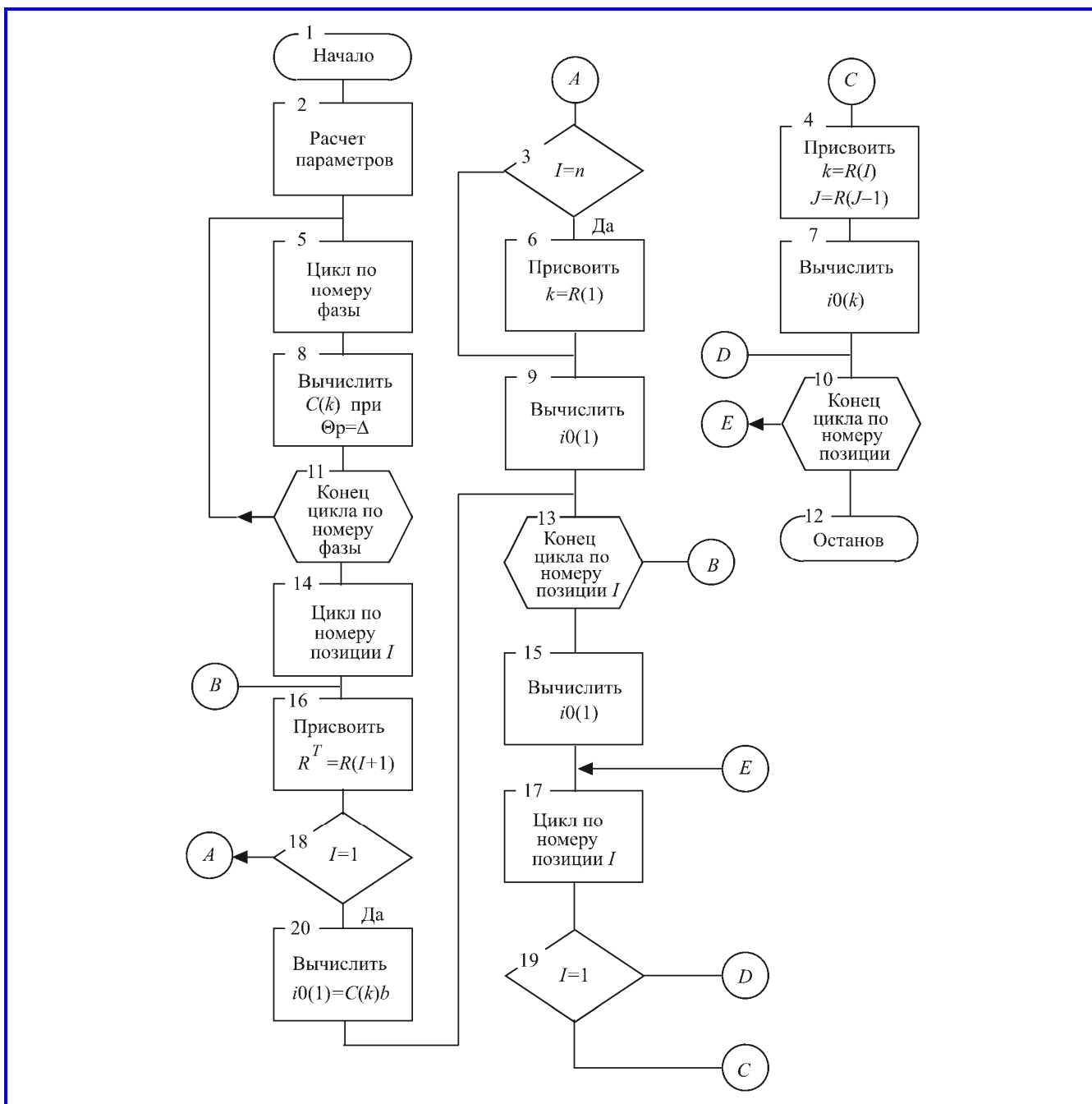


Рис. 2. Схема алгоритма расчета начальных токов при полной коммутации

После запуска программы проводится подготовка данных, включающая в себя расчет необходимых параметров МКИ, ряда R (2), коэффициентов $C_{(k)}$ для угла поворота ротора, соответствующего концу МКИ (5, 8, 11). Определение тока в первой фазе упрощается за счет того, что вычисление производится [1] по рекуррентной формуле

$$i_{0(l)} = C_{(k)} - i_{0(l)} \cdot b,$$

где индекс « k » последовательно принимает значения номеров фаз, стоящих в ряду $R1$.

Цикл по номеру позиции ряда R (17, 19, 4, 7, 10) образован для расчета начальных токов остальных фаз.

Определение начальных токов при полной коммутации используется не только при исследовании ВД в исправном состоянии, но и при аварийных режимах работы для определения периода повторяемости электромагнитных процессов, где полученные результаты расчета используются в качестве исходных данных.

При неполной коммутации кроме начальных условий необходимо дополнительно определить границу участков МКИ путем решения уравнения относительно тока в отключаемой фазе. Поскольку уравнение содержит экспоненциальные и гармонические составляющие от аргумента (угла поворота ротора θ_p), то возможны такие варианты решения: уравнение не имеет решения в пределах одного МКИ; уравнение имеет несколько решений; уравнение имеет единственное решение. Первый вариант свидетельствует о нарушении алгоритма коммутации при заданных условиях расчета (повышенная частота вращения ротора, большая индуктивность фаз обмотки ЭМП). Второй вариант решения свидетельствует о наличии нескольких корней уравнения, однако физический смысл имеет только первый корень. Третий вариант является частным случаем второго варианта.

Практические исследования мгновенных значений фазных координат при изменении индуктивности и частоты вращения показали, что в подавляющем большинстве случаев имеет место второй вариант протекания процессов. В соответствии с этим, алгоритм расчета угла положения ротора θ_0 (рис. 3), соответствующего моменту затухания тока в отключаемой фазе построен, так, чтобы найти первый корень уравнения. Для этого первоначально производим изменение угла с шагом Δx (2, 3, 18) до тех пор, пока ток в отключаемой фазе $I(L) = I_2$ не изменит знака (10). Как только знак тока изменится, можно уточнить значение угла θ_0 (8, 11, 14, 16, 19)

методом половинного деления. Вычисления продолжают до тех пор, пока абсолютная величина тока в отключаемой фазе не станет меньше заданной ошибки вычисления ε . Нужно отметить, что при каждом изменении угла θ_0 следует обращение в подпрограмму расчета токов при неполной коммутации $NYNK$ (рис. 4), поэтому одновременно с нахождением угла θ_0 мы определяем начальные токи фаз на первом участке МКИ. Начальные токи для второго участка определяются как фазные токи первого участка, рассчитанные при значении угла поворота ротора $X = \theta_p$ (9, 12, 15, 17).

Каждое обращение к подпрограмме $NYNK$ (рис. 4) сопровождается вычислением переменных коэффициентов $C_{(k)}$ (5, 7, 9, 10, 13, 14) при угле поворота ротора, соответствующем моменту затухания тока $X = \theta_0$ и $C'_{(k)}$ (17, 19, 21, 22, 4), при угле поворота ротора, соответствующем концу МКИ $X = \Delta$, после чего находятся начальные токи (3, 6, 8, 11, 12, 15, 18) всех работающих фаз, величина тока $I(L)$ в отключаемой фазе и управление передается в вызывающую программу.

Величина угла θ_0 контролируется (см. рис. 2) блоком 4. Если в течение МКИ ток в отключаемой фазе не успевает затухнуть до нуля, то выдается сообщение (5) об отсутствии корней уравнения при заданных параметрах двигателя.

После нахождения начальных токов рассчитываются мгновенные значения фазных координат. Определение начальных контурных токов и их мгновенных значений производится по такому же алгоритму, а при необходимости делается переход к фазным значениям координат.

В отличие от традиционных алгоритмов численного решения систем дифференциальных уравнений, в предложенных алгоритмах присутствует только один итерационный цикл при численном решении трансцендентного уравнения, исключить который для принятой методики решения принципиально невозможно. Такое построение алгоритмов расчета позволяет значительно уменьшить время расчета начальных условий.

Рассмотренные алгоритмы позволяют производить расчет мгновенных значений фазных координат ВД в исправном состоянии (на одном МКИ) при полной и неполной коммутации. Полученные результаты расчета используются в качестве исходных данных при исследовании аварийных режимов работы для определения периода повторяемости электромагнитных процессов. Суть заключается в том, что на начальном МКИ проводится расчет фазных координат исправного двига-

теля. Затем накладывається метка отказа на алгоритм коммутации исправной машины и рассчитывается электромагнитные процессы на следующем МКИ с учетом заданного отказа. При контроле величины фазных координат последовательно проводятся расчеты на следующих МКИ до тех пор, пока не установится процесс в аварийном режиме рабо-

ты. Этот факт устанавливается сравнением начальных значений фазных токов предыдущих МКИ с токами расчетного интервала. При этом получается абсолютно устойчивый вычислительный процесс, а также исключается вопрос определения физического смысла полученного результата при сходящемся вычислительном процессе.

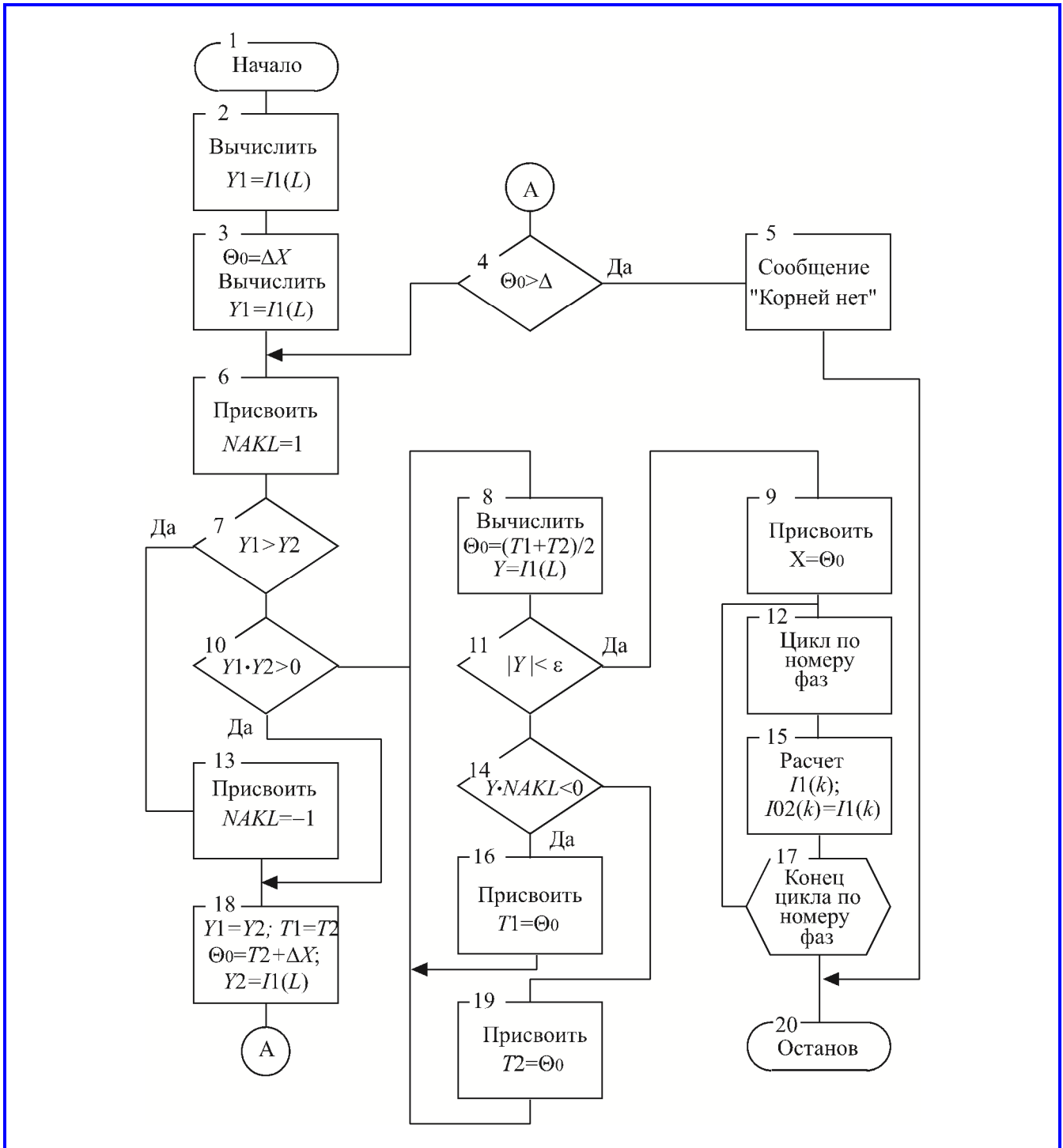


Рис. 3. Схема алгоритма расчета угла затухания тока в отключаемой фазе при неполной коммутации

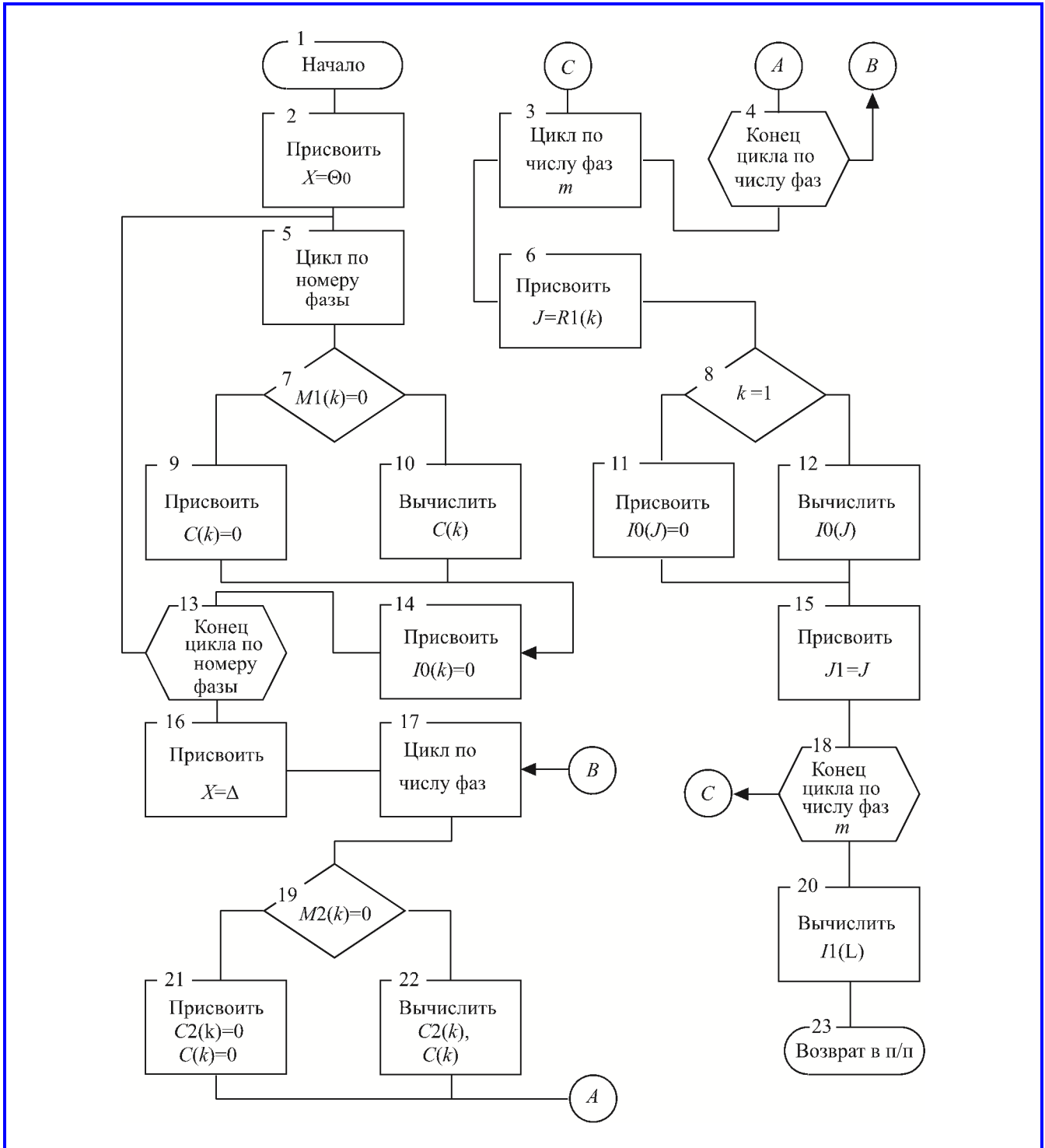


Рис. 4. Схема алгоритма расчета начальных токов при неполной коммутации

Для оценки эффективности преобразования энергии в штатных и аварийных режимах работы необходимо иметь интегральные значения энергетических параметров ВД: потребляемой мощности, электромагнитной мощности и электромагнитного КПД. Они рассчитываются по известным мгновен-

ным значениям координат с помощью одного из методов численного интегрирования, например метода Симпсона.

Для штатных режимов работы исправного двигателя интегрирование ведется на одном МКИ, для аварийных режимов – на периоде повторяемости

электромагнитных процессов. При неполной коммутации интегрирование проводится для участков, границы которых определены при расчете начальных и граничных значений токов.

Схема алгоритма расчета энергетических характеристик исправного многофазного ВД по мгновенным значениям координат для полной и неполной коммутации приведена на рис. 5.

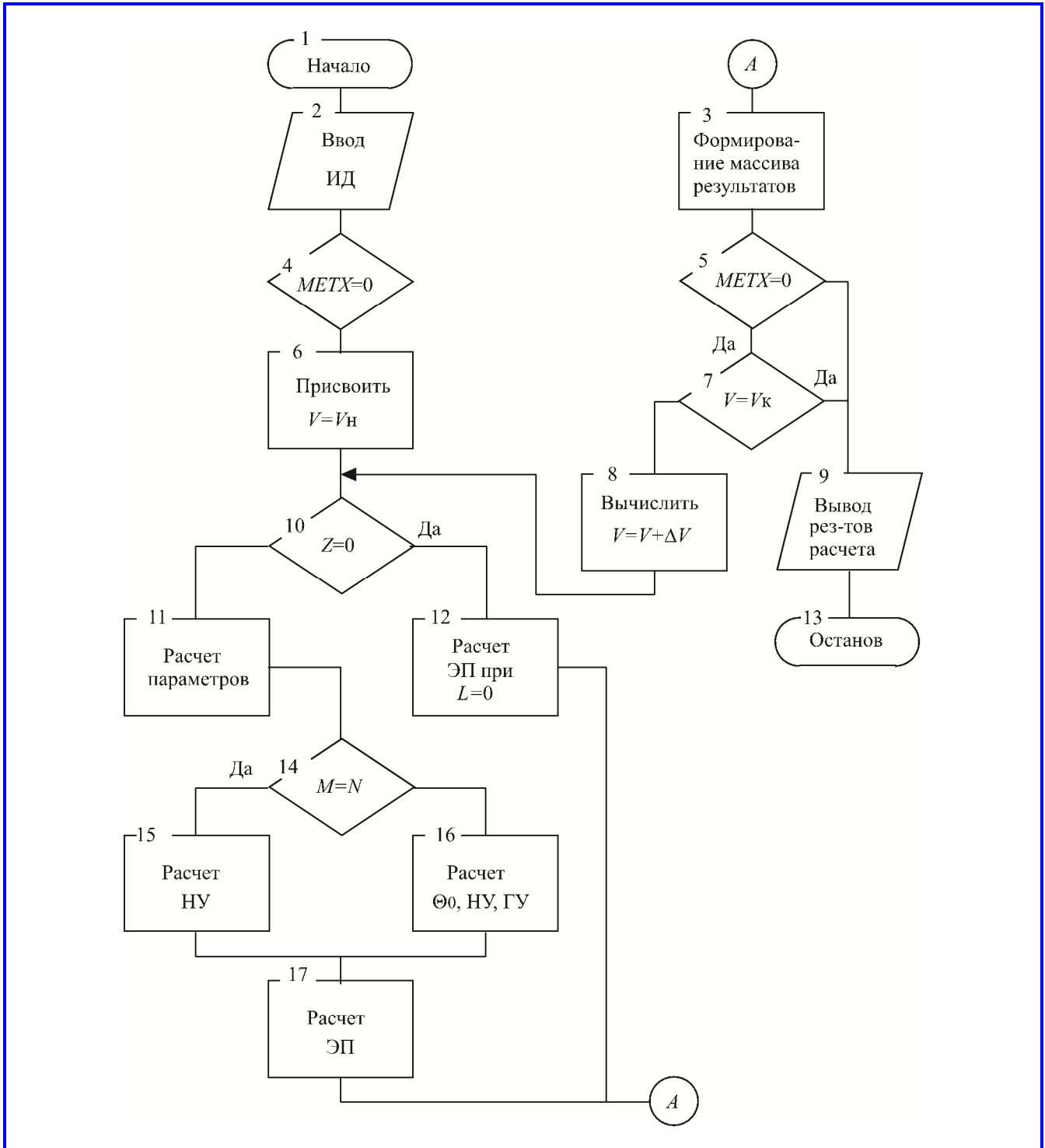


Рис. 5. Схема алгоритма расчета энергетических характеристик ВД при полной и неполной коммутации фаз обмотки ЭМП

При вводе исходных данных (2) кроме параметров машины указывается начальное V_n , конечное V_k значение относительной частоты вращения и шаг ее изменения ΔV , число работающих фаз m , величина индуктивности ξ фазы, угол регулирования θ , и величина фазного напряжения. При необходимости можно определить энергетические параметры для одной частоты вращения V , задав метку $METX = 1$.

Расчет характеристики ($METX = 0$) начинается с присвоения текущему значению частоты вращения V ее начальной величины V_n (6), после чего контролируется величина индуктивности ξ (7).

При $\xi > 0$ первоначально рассчитываются параметры (11), зависящие от частоты вращения, и определяется тип коммутации (14). При полной коммутации производится расчет начальных условий по (15), при неполной коммутации – начальных условий, угла затухания тока θ_0 и граничных условий по (16) одновременно. Расчет энергетических параметров (17) на МКИ производится путем численного интегрирования по мгновенным значениям координат, после чего они заносятся в массив результатов расчета (3). После контроля частоты вращения (7), если $V < V_k$, величина частоты вращения V увеличивается (8) и расчет повторяется, начиная с блока (10), в противном случае расчет заканчивается, и его результаты выводятся (9) в файл результатов расчета и экран монитора в виде графиков.

Если пренебрегаем индуктивными сопротивлениями фаз обмотки ($\xi = 0$), то расчет энергетических параметров (12) проводится по алгебраическим уравнениям, а формирование массива результатов и его вывод производится таким же образом, как и в первом случае.

Схемы алгоритмов расчета энергетических характеристик при отказах различного типа имеют подобную структуру, в которой одинаковыми являются ввод – вывод данных и расчет энергетических параметров. Особенностью расчета является тот факт, что интегрирование проводится по всем интервалам периода повторяемости с учетом изменения структуры ЭМП на каждом МКИ.

Отличительными особенностями предложенных алгоритмов является возможность получения решения систем уравнений, состоящих из любого числа (n) дифференциальных уравнений первого порядка и отсутствие требуется затрат времени на определение областей устойчивости в системах с изменяемой структурой (получены абсолютно устойчивые решения). Реализация предложенных

алгоритмов дает возможность исследовать электромагнитные процессы в штатных и аварийных режимах многофазных ВД, а также использовать цифровую модель машины в комплексных моделирующих стендах, применяемых при разработке сложных систем автоматического регулирования и управления.

Предложенные алгоритмы реализованы в среде объектно-ориентированного программирования Delphi5, язык программирования Object Pascal и Borland C++Builder 5 Enterprise Edition, язык программирования C++, при исследовании энергетических возможностей и расчете мгновенных значений координат ВД в штатных и аварийных режимах работы [3, 4] и подтвердили свою работоспособность.

Выводы

1. Предложена схема расчета алгоритмов коммутации фаз с помощью специальной коммутационной функции при постоянной и изменяющейся структуре ЭМП.

2. Предложен алгоритм расчета мгновенных значений тока в отключаемой фазе ЭМП при неполной коммутации, позволяющий определять границы участков МКИ как при работе исправного многофазного ВД, так и на всех МКИ периода повторяемости электромагнитных процессов в аварийных режимах работы.

3. Показано, что вместе с определением границ участков МКИ, обязательным при изменяющейся структуре ЭМП, одновременно проводится расчет начальных и граничных токов на всех МКИ периода повторяемости электромагнитных процессов.

4. Совокупность рассматриваемых алгоритмов позволила разработать абсолютно устойчивые цифровые модели, адаптированные к изменению структуры ЭМП в процессе работы многофазного ВД в штатных и аварийных режимах работы.

5. На основе предложенных алгоритмов разработано программное обеспечение предназначенное для исследования электромагнитных процессов в аварийных режимах работы и получения количественной оценки мгновенных значений координат и (или) энергетической эффективности преобразования энергии, что необходимо при проектировании вентиляльных электроприводов повышенной надежности для оценки работоспособности многофазных ВД в аварийных режимах работы.

Адекватность представленных алгоритмов подтверждена вычислительными экспериментами, выполненными с помощью ряда программ, разработанных на основе рассмотренных алгоритмов. На

эти программы получены свидетельства о государственной регистрации [2 ... 4]. Ссылки на свидетельства приведены в тексте статьи. Результаты математического моделирования использованы при разработке ряда опытных образцов вентильного электропривода. Так, один из предложенных вариантов исполнения специализированных устройств был использован ГНП РКЦ «ЦСКБ-Прогресс» (г. Самара) при разработке конструкторской документации на бесконтактный силовой электропривод крышек специальной аппаратуры изделий 17Ф20. Изготовлена опытная партия электроприводов, которая успешно прошла комплексные испытания (включая ресурсные), проведенные на предприятии Заказчика. Испытания подтвердили технические характеристики электропривода и расчетные показатели составляющих надежности.

Литература

1. Вигриянов П. Г. Общая методика исследования электромагнитных процессов вентильного двигателя с изменяемой структурой электромеханического преобразова-

теля коммутации / П. Г. Вигриянов // Электричество. – 2012. – № 8. – С. 44 – 51.

2. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2012614305 Расчет специальной коммутационной функции и алгоритмов коммутации многофазных вентильных двигателей Российская Федерация : № 2012611849 : опублик. 14.05.12 / П. Г. Вигриянов – реф. опублик. в Бюл. «Программы для ЭВМ», 2012. – № 3(80). – С. 288.

3. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2012614307 Расчет энергетических характеристик многофазных вентильных двигателей малой мощности при неполной коммутации Российская Федерация : № 2012611851 : опублик. 14.05.12 / П. Г. Вигриянов – реф. опублик. в Бюл. «Программы для ЭВМ», 2012. – № 3(80). – С. 288.

4. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2012617498 Расчет мгновенных значений координат многофазных вентильных двигателей малой мощности с гальванически развязанными фазами обмотки якоря для вариантов неполной коммутации при неисправности типа «короткое замыкание» / П. Г. Вигриянов – реф. опублик. в Бюл. «Программы для ЭВМ», 2012. – № 4(81). – С. 360.

Поступила в редакцию 04.12.2019

Павел Георгиевич Вигриянов, доктор технических наук, профессор, т. (3513) 66-58-69 или 66-58-44 + 2111 (добавочный), e-mail: vpg_postbox@mail.ru. (Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)», филиал в г. Златоусте).

BASIC ALGORITHMS FOR CALCULATION OF ELECTROMAGNETIC PROCESSES OF LOW POWER MULTIPHASE GATE MOTORS WITH VARIABLE STRUCTURE OF ELECTROMECHANICAL CONVERTER

P. G. Vigriyanov

The basic algorithms of the General research methodology are proposed, allowing to implement the solution of systems of differential equations describing electromagnetic processes in multiphase gate motors with a variable structure of the Electromechanical Converter in normal and emergency modes of operation.

Key words: multiphase valve motor, electromagnetic processes, the variable structure of the Electromechanical transducer, mathematical model, switching algorithms, regular operating modes, valve motor failures, emergency operating modes.

References

1. Vigriianov P. G. General method of studying electromagnetic processes in AC converter-fed motors with variable structure electromechanical converter/ P. G. Vigriianov // Elektrichestvo. – 2012. – No. 8. – Pp. 44 – 51.
2. Certificate of official registration of computer program No. 2012614305 Calculation of special switching function and switching algorithms of multiphase AC converter-fed motors, Russian Federation: No. 2012611849 : published on May 14, 2012 / P. G. Vigriianov – abstract published in ‘Computer Programs’ Bulletin, 2012. – No. 3(80). – P. 288.
3. Certificate of official registration of computer program No. 2012614307 Calculation of energy performance of low-power multi-phase AC converter-fed motors at partial switching, Russian Federation: No. 2012611851 : published on May 14, 2012 / P. G. Vigriianov – abstract published in ‘Computer Programs’ Bulletin, 2012. – No. 3(80). – P. 288.

4. Certificate of official registration of computer program No. 2012617498 Calculation of instantaneous values of coordinates for low power multi-phase AC converter-fed motors with galvanically decoupled armature winding phases for partial switching options in case of short circuit failures/ P. G. Vigriianov – abstract published in ‘Computer Programs’ Bulletin, 2012. – No. 4(81). – P. 360.

***Pavel Georgievich Vigriyanov**, doctor of technical Sciences, professor,
tel.: (3513) 66-58-69 or 66-58-44 + 2111, e-mail : vpg_postbox@mail.ru.
(Branch of Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education
«South Ural State University (national research university)» in Zlatoust).*