

РАСЧЕТ АЛГОРИТМОВ КОММУТАЦИИ МНОГОФАЗНЫХ ВЕНТИЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

П.Г. Вигриянов

Отличительной особенностью работы вентильного двигателя является дискретное перемещение магнитного поля обмотки якоря при непрерывном вращении ротора с постоянной частотой. Это приводит к необходимо-

сти исследования физических процессов на периоде их повторяемости. При неизменной частоте вращения ротора таким периодом является промежуток времени между двумя смежными переключениями силовых ключей коммутатора. А этому промежутку времени соответствует однозначно определенный угол поворота ротора, который принято называть межкоммутационным интервалом (МКИ).

Составление алгоритмов коммутации в машинах с малым числом фаз обычно проводится в такой последовательности. Сначала задают исходное состояние преобразователя энергии. Порядок подключения фаз обмотки на рассматриваемом МКИ записывается в виде вектора напряжений, число координат которого равно числу фаз обмотки якоря (n). Порядок подключения фаз обмотки на следующем такте коммутации записывается в виде другого вектора напряжений, обеспечивающих новое положение вектора результирующего магнитного потока. Этот процесс описываем до тех пор, пока ротор не повернется на 360 электрических градусов. Совокупность векторов напряжения на всех N тактах коммутации будет составлять алгоритм коммутации. Обычно алгоритм коммутации записывают в виде матрицы, где столбцы матрицы означают векторы напряжений на каждом такте МКИ, а строки отражают изменение состояний координат вектора при переходе от одного МКИ к другому. Записывая состояние всех фаз в столбец последовательно для каждого такта коммутации, получим алгоритм коммутации в матричной форме.

Такой способ составления алгоритмов коммутации применяется для разработки логической части схемы управления ключами коммутатора. Но для формального описания алгоритмов коммутации при исследовании электромагнитных процессов многофазных ВД он не удобен, поскольку при изменении числа фаз обмотки якоря приходится каждый раз составлять такую матрицу размером $n \times N$. Но это только это только для случая, когда в работе принимают участие все фазы обмотки якоря. Такую коммутацию назовем полной [1]. На практике часто применяют алгоритмы коммутации, когда в работе машины принимают участие не все фазы обмотки якоря, а только их часть. Такую коммутацию назовем неполной. При неполной коммутации одна или несколько фаз могут быть отключены на одном из участков МКИ или целиком на всем интервале. Это приводит к тому, что пути тока в течение одного МКИ различны, а электромеханический преобразователь двигателя представляет систему с переменной структурой, которая описывается в разные интервалы времени разными электрическими состояниями. Поэтому при неполной коммутации алгоритм состоит из двух матриц размером $n \times N$, каждая из которых описывает порядок подключения фаз обмотки якоря на соответствующем участке МКИ [2]. Например, в трехфазном двигателе при шеститактной 120-градусной коммутации.

$$\|U_1^{(k)}\| =$$

T=1	2	3	4	5	6
-1	-1	+1	+1	+1	-1
+1	-1	-1	-1	+1	+1
+1	+1	+1	-1	-1	-1

$$\|U_2^{(k)}\| =$$

T=1	2	3	4	5	6
-1	-1	0	+1	+1	0
+1	0	-1	-1	0	+1
0	+1	+1	0	-1	-1

Задача ещё более усложняется при анализе аварийных режимов работы, когда добавляется еще третья матрица, учитывающая неисправность машины.

Такой подход к получению алгоритмов коммутации занимает много времени даже при неизменном числе фаз двигателя. Необходимость варьирования числом фаз при полной коммутации, а также изменение структуры ЭМП при неполной коммутации приводят к необходимости расчета алгоритма коммутации даже в исправной машине. Для решения этой задачи необходимо в первую очередь выявить особенности работы исправного ВД, а затем на их основе найти способ математического описания процессов коммутации в машинах с любым числом фаз обмотки якоря.

Теперь, когда связь между процессами на смежных интервалах установлена, обратимся к способу описания порядка подключения фаз обмотки сначала на одном интервале, а затем и всех следующих за полный цикл изменения электромагнитных процессов. Сначала рассмотрим полную коммутацию.

Порядок подключения фаз обмотки на любом интервале удобно представить в виде ряда RT. Тогда совокупность этих рядов за полный цикл будет составлять алгоритм коммутации. Сначала нужно задать номер и полярность подключения той фазы RN, которая будет занимать первую позицию ряда. При полной коммутации это место может занимать любая фаза, удобнее на первое место ставить переключаемую фазу.

Последующие члены могут располагаться в порядке возрастания, убывания или каком-либо другом, но определяющим фактором здесь является упрощение вычислительных операций и обеспечение формального описания всего набора алгоритмов коммутации исправного двигателя (полная и неполная коммутация). С этой целью предлагается так располагать члены ряда, чтобы каждый следующий член мог определяться через предыдущий член и величину специальной коммутационной функции SDB [2]. В этом случае с помощью этой функции устанавливаем связь между положениями магнитных осей фаз внутри интервала. При составлении порядка подключения фаз на каждом такте (ряд RT) модуль каждого последующего члена ряда получается путем суммирования модуля предыдущего члена с коммутационной функцией SDB, а знак меняется:

$$R_{(i)}^T = -\text{sign}\left[R_{(i-1)}^T\right] \left[\left| R_{(i-1)}^T \right| \pm \text{SDB} \right], \quad (1)$$

где $i = 2, 3, \dots, n$ – порядковый номер члена ряда RT .

Знаки минус или плюс во вторых скобках обозначают соответственно положительное и отрицательное направление вращения ротора.

Зная первый член ряда RN на первом такте, можно найти первый член каждого последующего такта. Причем на каждом последующем такте коммутации модуль первого члена ряда определяется путем суммирования коммутационной функции SDB с модулем первого члена предыдущего такта, а знак меняется:

$$R_{(1)}^T = -\text{sign}\left[R_{(1)}^{(T-1)}\right] \left[\left| R_{(1)}^{(T-1)} \right| \pm \text{SDB} \right], \quad (2)$$

где знаки минус и плюс соответствуют положительному и отрицательному направлению вращения поля якоря.

При неполной коммутации одна или несколько фаз обмотки не принимают участия в преобразовании энергии. Число фаз, подключенных к источнику питания на каждом МКИ после окончания коммутационных процессов, обозначим m . Поскольку при неполной коммутации всегда $m < n$, то в каждой строке алгоритма коммутации присутствуют нулевые члены ряда. В таком случае при расчетах алгоритмов коммутации возможна потеря информации о состоянии фаз, что приводит к возникновению неопределенности при расчете последующих членов ряда на текущем такте, а также при переходе к следующему такту коммутации.

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 .

Особенностью неполной коммутации является заложенное в алгоритм работы двигателя изменение структуры ЭМП в течение МКИ. Такая особенность дополнительно требует на каждом участке интервала однозначного определения положения в алгоритме коммутации как подключаемой, так и отключаемой фазы обмотки. Причем положение этих фаз должно определяться расчетным путем.

После анализа совокупности всех требований предлагается расчет алгоритмов неполной коммутации для каждого участка МКИ проводить по тем же соотношениям, что и при полной коммутации. Но на втором участке последние $(n - m)$ членов должны быть равны нулю. На первом участке того же МКИ фаз на одну больше, но изменяется полярность питающего напряжения отключаемой фазы, так как она через обратный вентиль подключается к шине противоположной полярности. При таком подходе к расчету каждого такта на первом месте ряда должна находиться подключаемая к источнику фаза, а последняя ненулевая фаза будет отключаемая.

Величина специальной коммутационной функции остается такой же, как и при полной коммутации.

Например, для пятифазного двигателя при работе трех фаз алгоритм коммутации будет иметь вид, приведенный в таблице. На первое место в первом такте коммутации, ставим подключаемую к источнику питания фазу ($R_N = -4$). Расчет членов ряда на каждом из тактов проводим по (1), а первые члены последующего ряда по (2).

Алгоритм неполной коммутации пятифазного ВД ($m = 3$)

Номер такта коммутации	Первый член ряда $R_{(1)}^T$	Подключение фаз на 1-м участке T -го такта. Ряд $R_{(i)}^T$	Подключение фаз на 2-м участке T -го такта. Ряд $R_{(i)}^T$
1	-4	-4, 1, -3, -5, 0	-4, 1, -3, 0, 0
2	2	2, -4, 1, +3, 0	2, -4, 1, 0, 0
3	-5	-5, 2, -4, -1, 0	-5, 2, -4, 0, 0
4	3	3, -5, 2, +4, 0	3, -5, 2, 0, 0
5	-1	-1, 3, -5, -2, 0	-1, 3, -5, 0, 0
6	4	4, -1, 3, +5, 0	4, -1, 3, 0, 0
7	-2	-2, 4, -1, -3, 0	-2, 4, -1, 0, 0
8	5	5, -2, 4, +1, 0	5, -2, 4, 0, 0
9	-3	-3, 5, -2, -4, 0	-3, 5, -2, 0, 0
10	1	1, -3, 5, +2, 0	1, -3, 5, 0, 0

Библиографический список

1. Вигриянов, П.Г. Алгоритмы управления коммутацией секций исполнительного элемента дискового магнитной памяти / П.Г. Вигриянов, С.Г. Воронин // Межвуз. сб. тр. – Рязань: Изд-во РРТИ, 1986. – С. 95–99.
2. Вигриянов, П.Г. Электромагнитные процессы многофазных вентильных двигателей: моногр. / П.Г. Вигриянов. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2007. – 143 с.