

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДЕВЯТИФАЗНОГО ВЕНТИЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ ПРИ ПОЛНОЙ И НЕПОЛНОЙ КОММУТАЦИИ

П.Г. Вигриянов

Филиал Южно-Уральского государственного университета, г. Златоуст

E-mail: vpg_postbox@mail.ru

Показана возможность обеспечения алгоритмической избыточности в многофазных вентильных двигателях за счет применения алгоритмов неполной коммутации и необходимость расчета энергетических характеристик многофазных вентильных двигателей для полной и неполной коммутации. Приведены характеристики девятифазного вентильного двигателя, сделаны выводы о поведении электромагнитной мощности и электромагнитного КПД при изменении алгоритмов коммутации.

Ключевые слова:

Многофазный вентильный двигатель, энергетические характеристики, алгоритмы коммутации.

Key words:

Multiphase valve engine, power characteristics, switching algorithms.

Вентильные двигатели малой мощности являются основой бесконтактных приводов, которые занимают заметное место среди электроприводов в различных системах автоматики летательных аппаратов, роботов и манипуляторов, судов и автомобилей, а также в металлорежущих станках, медико-биологических и информационно-преобразовательных системах, бытовой технике [1–4].

Вентильный двигатель постоянного тока по принципу действия аналогичен машине постоянного тока, у которой роль щеточно-коллекторного аппарата выполняет полупроводниковый коммутатор, управляемый сигналами датчика положения ротора. В отличие от коллекторного двигателя электромеханический преобразователь вентильного двигателя имеет меньшее число секций (фаз) обмотки и переключение их сопровождается возникновением периодического переходного процесса, который зависит от способа коммутации, индуктивности обмоток и частоты вращения ротора машины.

Электромагнитные процессы и энергетические характеристики при разных алгоритмах коммутации в двигателях с малым (не более четырех) числом фаз подробно рассмотрены многими авторами. Каждый исследует физические процессы со своей точки зрения: получение максимального КПД двигателя [5], оценка пульсаций токовой составляющей электромагнитного момента для выбранного алгоритма коммутации, стабилизация частоты вращения, исследование энергетических параметров управляемых двигателей [2–4], получение заданного вида механической характеристики двигателя [6]. Однако количество рассматриваемых вариантов исполнения и алгоритмов коммутации в таких машинах весьма ограничено. Так для трехфазной машины обычно сравниваются энергетические параметры при 180-ти и 120-ти градусной коммутации. В первом случае в преобразовании энергии принимают участие все фазы обмотки якоря, и по принятой в работе [7] терминологии мы имеем полную коммутацию. Во втором случае

в преобразовании принимают участие две фазы из трех, поэтому здесь имеем один из вариантов неполной коммутации.

Вместе с тем одним из перспективных путей развития является применение электроприводов, выполненных на базе многофазных вентильных двигателей [4]. Но многие вопросы, касающиеся специфики работы многофазных вентильных двигателей, и обоснования выбора исполнения вентильного привода, слабо освещены в литературе. Одним из основных вопросов выбора исполнительного элемента вентильного привода является оценка его энергетических характеристик при различных алгоритмах коммутации фаз обмотки якоря электромеханического преобразователя.

Электромеханический преобразователь многофазного вентильного двигателя имеет симметричную структуру статора и ротора и мало конструктивно отличается от переменного полюсного шагового двигателя с активным ротором [8]. На каждую пару полюсов ротора приходится n одинаковых фаз, равномерно расположенных по окружности расточки статора, магнитные оси которых сдвинуты в пространстве относительно друг друга на $2\pi/n$ электрических радиан. Возбуждение осуществляется постоянными магнитами.

На этапе предварительного проектирования систем вентильного электропривода наиболее полную информацию об исполнительном элементе можно получить по его электромеханическим характеристикам и энергетическим параметрам. Для получения этих зависимостей существуют различные методы расчета, однако наибольшей точностью обладает метод исследования по мгновенным значениям переменных.

В многофазных машинах число возможных вариантов алгоритмов неполной коммутации существенно возрастает. Практическая реализация этих вариантов позволит обеспечить алгоритмическую избыточность и увеличить надежность работы вентильных двигателей. Основанием для выбора варианта неполной коммутации прежде всего служат

энергетические характеристики электромеханического преобразователя при одинаковой сложности исполнения полупроводникового коммутатора и выбранном способе питания обмотки якоря. При разомкнутой схеме соединения они зависят от числа фаз и способа питания обмотки якоря двигателя. Для двигателей с малым числом фаз в случае неревверсивного питания обмотки (при неполной коммутации) к источнику последовательно подключаются одна или несколько фаз. В связи с этим эффективность преобразования энергии в таких двигателях очень низка и находит ограниченное применение в вентильных электроприводах. Поскольку наибольшее распространение получили двигатели с реверсивным питанием обмотки якоря [5, 7], то в данной работе рассмотрим характеристики двигателей только при этом способе питания.

Алгоритмы неполной коммутации будем составлять исходя из условия максимальной эффективности преобразования энергии. Отсюда следует, что при заданном числе работающих фаз результирующая магнитодвижущая сила (МДС) обмотки якоря должна быть максимальной. При этом из всех возможных вариантов рассмотрим только такие варианты симметричной неполной коммутации, при которых положение вектора МДС обмотки якоря будет совпадать с положением вектора МДС обмотки при полной коммутации. Применение такого условия приводит к изменению величины вектора МДС обмотки якоря за счет изменения алгоритма коммутации, а его положение в пространстве совпадает с положением вектора МДС $\vec{F}_a$ при полной коммутации (рис. 1, а). В случае нечетного числа фаз обмотки якоря n такие алгоритмы неполной коммутации получаются путем уменьшения числа работающих фаз на две, начиная с полной коммутации. Тогда для многофазных вентильных двигателей с нечетным числом фаз минимальное число работающих фаз будет равно трем.

Необходимость варьирования числа фаз электромеханического преобразователя при полной коммутации и различных вариантах неполной коммутации требует разработки и применения общей методики исследования электромагнитных процессов вентильных двигателей при любом числе фаз обмотки якоря. В случае полной коммутации трудности возникают при разработке математических моделей электромеханического преобразователя, пригодных для численного моделирования. В случаях неполной коммутации дополнительные трудности вызывает изменение структуры электромагнитного поля в процессе работы, что приводит к необходимости решения вопросов устойчивости вычислительного процесса и однозначности получаемых решений.

Математические модели и общая методика расчета энергетических параметров многофазных вентильных двигателей при полной и неполной коммутации по мгновенным значениям координат приведены в работе [7]. Расчет проводится в относительных единицах.

Относительные значения потребляемой мощности P_1 , электромагнитной мощности P_2 и электромагнитного КПД η_2 исправного двигателя определяются на межкоммутационном интервале по выражениям

$$P_1 = \frac{1}{\Delta} \int_0^{\Delta} F_1 d\theta_p; \quad P_2 = \frac{1}{\Delta} \int_0^{\Delta} F_2 d\theta_p; \quad \mu_2 = \frac{P_2}{P_1}.$$

Здесь Δ – длительность межкоммутационного интервала; θ_p – угол поворота ротора; V – относительная угловая частота вращения. Функция F_1 – сумма мгновенных значений токов, потребляемых от всех источников питания; функция F_2 – сумма произведений относительных мгновенных значений фазных токов и ЭДС.

В качестве базовых величин напряжения, тока и мощности приняты: напряжение источника питания, фазный ток короткого замыкания и мощность, потребляемая одной фазой при коротком замыкании.

$$U_6 = U_n; \quad I_6 = \frac{U_n}{r}; \quad P_6 = \frac{U_n^2}{r},$$

где r – активное сопротивление фазы обмотки якоря.

Влияние параметров обмотки якоря на энергетические показатели учитываем с помощью коэффициента ξ , который по своей сути является относительным индуктивным сопротивлением эквивалентного контура при базовой частоте вращения.

Поскольку частота вращения ротора двигателя изменяется от нуля до частоты идеального холостого хода, то введем относительное индуктивное сопротивление контура при текущей частоте вращения τ . Обе эти величины связаны между собой

$$\tau = \frac{\omega_p L}{r} = \left(\frac{\omega_6 L}{r} \right) \left(\frac{\omega_p}{\omega_6} \right) = \xi V,$$

где L – индуктивность фазы обмотки якоря; ω_6 – базовая частота вращения.

Рассмотрим энергетические характеристики двигателя на конкретном примере. Выбираем девятифазный вентильный двигатель с гальванически развязанными фазами обмотки якоря при реверсивном их питании. В этом двигателе возможно реализовать восемь вариантов алгоритмов неполной коммутации только при последовательном уменьшении числа работающих фаз на единицу. Однако поставленному выше условию (положение вектора МДС обмотки якоря $\vec{F}_a$ совпадает с его положением при полной коммутации) будут соответствовать только три из них: при включении на каждом межкоммутационном интервале семи (рис. 1, б), пяти (рис. 1, в) и трех (рис. 1, г) фаз. На рисунке показана только полярность напряжения, приложенного к началу каждой фазы. При этом имеется в виду, что к концу каждой фазы подводится напряжение противоположной полярности.

Зависимости относительной электромагнитной мощности и электромагнитного КПД девятифазного вентильного двигателя от частоты вращения для

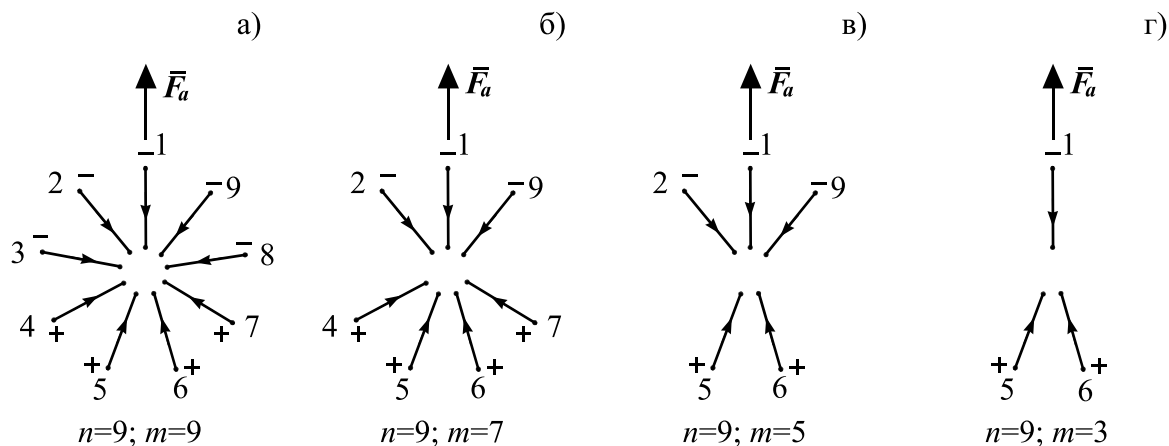


Рис. 1. Подключение фаз обмотки якоря при полной коммутации (а) и неполной коммутации с разным числом подключаемых фаз (б, в, г)

полной коммутации и трех вариантов неполной коммутации приведены на рис. 2. Величина относительной индуктивности фазы обмотки якоря $\xi=0,5$.

Для всех вариантов алгоритмов коммутации зависимости электромагнитной мощности двигателя (рис. 2, а) от частоты вращения имеют одинаковый характер поведения, причем каждая кривая имеет явно выраженный максимум электромагнитной мощности ($P_{\text{э}}^{\text{max}}$). Поскольку каждая характеристика имеет две ветви, то двигатель, кроме экстремальной точки, развивает одинаковую величину электромагнитной мощности при двух значениях частоты вращения. Однако электромагнитный КПД двигателя в этих точках будет разным. При меньшей частоте вращения имеем меньший КПД, так как токи в обмотке якоря и электрические потери в этой точке характеристики будут больше, чем во второй точке, соответствующей более высокой частоте вращения.

При полной коммутации вентильный двигатель развивает большую электромагнитную мощность, чем при любом варианте неполной коммутации. Уменьшение числа работающих фаз в случаях неполной коммутации приводит как к уменьшению максимального значения электромагнитной мощности $P_{\text{э}}^{\text{max}}$, так и к изменению положения этой точки на каждой из характеристик (см. рис. 2, а). Наблюдается такая закономерность: чем меньше число работающих фаз m , тем при меньшей частоте вращения наблюдается максимум электромагнитной мощности. Так при полной коммутации максимум электромагнитной мощности $P_{\text{э}}^{\text{max}}=1,80$ наблюдается при относительной частоте вращения $\omega^{\text{max}}=0,66$.

Последовательное уменьшение числа работающих фаз m до 7-ми, 5-ти и 3-х уменьшает $P_{\text{э}}^{\text{max}}$ соответственно до 1,50; 1,02 и 0,43. Таким образом, величина $P_{\text{э}}^{\text{max}}$ изменяется пропорционально числу работающих фаз двигателя. Относительные частоты вращения, при которых наблюдается максимумы электромагнитной мощности для каждого последующего варианта неполной коммутации, составляют соответственно 0,60; 0,50 и 0,44. Вместе

с этим следует отметить, что снижение $P_{\text{э}}^{\text{max}}$ происходит медленнее, чем уменьшается число работающих фаз. Причиной этого является тот факт, что переход к каждому последующему варианту неполной коммутации происходит путем отключения не любых двух, а именно тех фаз, которые вносят наименьший вклад в создание суммарного вектора МДС обмотки якоря [7].

Поэтому, при прочих равных условиях, электромагнитная мощность в случае неполной коммутации обмотки, имеющей m работающих фаз, будет всегда больше, чем эта же мощность при полной коммутации с тем же числом фаз ($n=m$) обмотки якоря двигателя.

За счет уменьшения частоты идеального холостого хода изменяется и величина диапазона рабочих частот вращения машины, работающей в двигательном режиме. Если при полной коммутации частота вращения идеального холостого хода составляет 1,36, то при каждом последующем уменьшении числа работающих фаз она составляет соответственно 1,24; 1,14 и 1,08. Таким образом, диапазон рабочих частот при неполной коммутации уменьшается и составляет для названной выше последовательности соответственно 91, 84 и 79 % от диапазона частот при полной коммутации.

Эффективность преобразования энергии оценивается электромагнитным КПД двигателя (рис. 2, б). Применение алгоритмов неполной коммутации влияет на вид характеристик электромагнитного КПД. При уменьшении числа работающих фаз одновременно изменяются частота идеального холостого хода двигателя и величина электромагнитного КПД. Уменьшение числа работающих фаз приводит к последовательному уменьшению частоты идеального холостого хода с 1,37 при полной коммутации до 1,22 при неполной коммутации трех фаз. Величина максимального электромагнитного КПД при полной коммутации составляет 0,55. Для приведенных вариантов неполной коммутации его величина последовательно увеличивается и составляет соответственно 0,72; 0,88 и 0,95 при работе

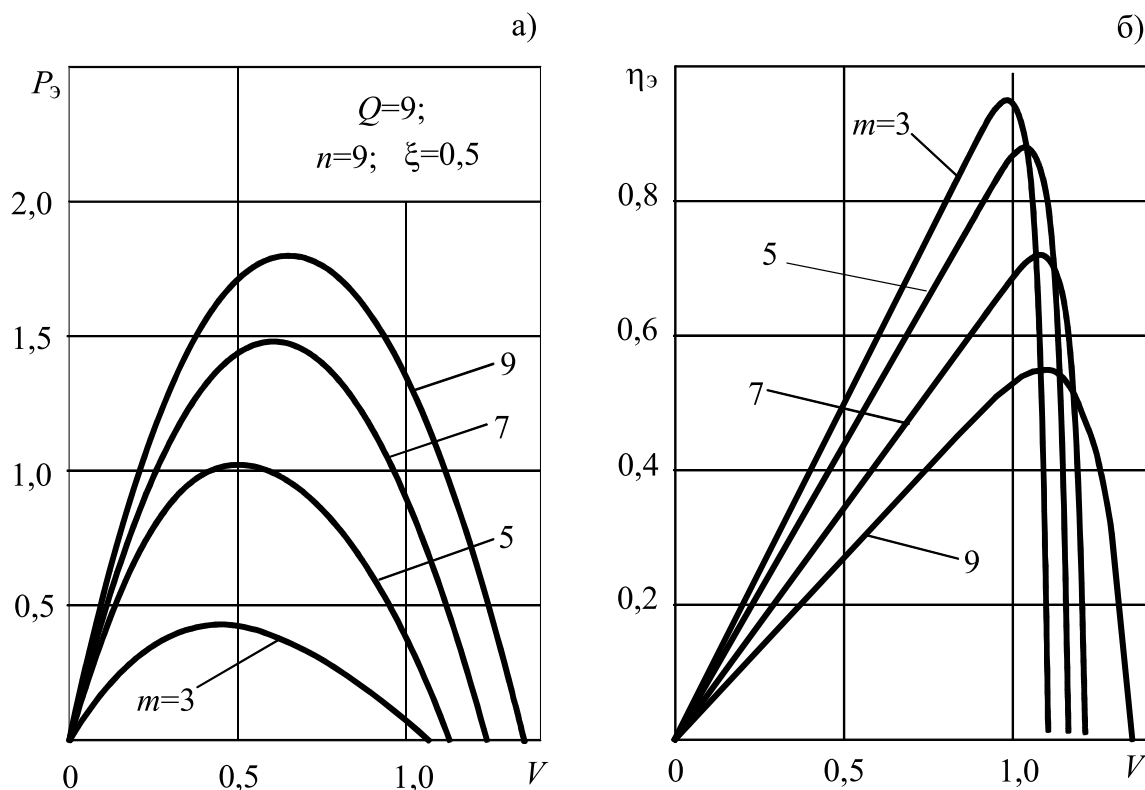


Рис. 2. Зависимости электромагнитной мощности (а) и электромагнитного КПД (б) от частоты вращения ротора

трех фаз. Вместе с этим, положение максимума КПД на характеристиках перемещается в область более низких частот с 1,10 при полной коммутации до 0,98 при неполной коммутации трех фаз.

На восходящей части характеристик при одинаковой частоте вращения КПД двигателей с меньшим числом работающих фаз всегда больше. Нисходящая часть характеристики занимает меньший диапазон частот вращения, причем, чем меньше число работающих фаз, тем меньший диапазон частот вращения имеет эта часть характеристики.

Выводы

1. Показана возможность обеспечения алгоритмической избыточности в многофазных вентильных двигателях за счет применения алгоритмов неполной коммутации. Обоснована

необходимость расчета энергетических характеристик вентильных двигателей при выборе алгоритмов коммутации.

2. На основе общей методики исследования электромагнитных процессов вентильных двигателей с постоянной и изменяющейся структурой электрохимического преобразователя получены энергетические характеристики девятифазного вентильного двигателя при полной коммутации и трех вариантах неполной коммутации. Показано, что уменьшение числа работающих фаз при неполной коммутации приводит к уменьшению электромагнитной мощности и увеличению электромагнитного КПД двигателя.
3. Получен набор энергетических характеристик, что позволяет провести выбор алгоритмов коммутации для девятифазного вентильного двигателя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Брускин Д.Э., Зубакин С.И. Самолеты с полностью электрифицированным оборудованием // Итоги науки и техники. Электрооборудование транспорта. – М.: ВИНТИ. – 1986. – № 6. – С. 1–112.
2. Косулин В.Д., Михайлов Г.Б., Омельченко В.В., Путников В.В. Вентильные электродвигатели малой мощности для промышленных роботов. – Л.: Энергоатомиздат, 1988. – 184 с.
3. Адволоткин Н.П., Гращенко В.Т., Лебедев Н.И. и др. Управляемые бесконтактные двигатели постоянного тока. – Л.: Энергоатомиздат, 1984. – 160 с.
4. Сидельников Б.В. Перспективы развития и применения бесконтактных регулируемых электродвигателей // Известия вузов. Электромеханика. – 2005. – № 2. – С. 14–20.
5. Овчинников И.Е., Лебедев Н.И. Бесконтактные двигатели постоянного тока. – Л.: Наука, 1979. – 270 с.
6. Вигриянов П.Г. Формирование механической характеристики тягового вентильного двигателя // Вестник Южно-Уральского государственного университета. – 2004. – Т. 33. – № 4. – С. 44–45.
7. Вигриянов П.Г. Электромагнитные процессы многофазных вентильных двигателей. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2007. – 143 с.
8. Дискретный электропривод с шаговыми двигателями / под ред. М.Г. Чиликина. – М.: Энергия, 1971. – 624 с.

Поступила 21.06.2011 г.