

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ УПРАВЛЯЕМЫХ ПЯТИФАЗНЫХ ВЕНТИЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ МАЛОЙ МОЩНОСТИ

П.Г. Вигриянов

Филиал Южно-Уральского государственного университета в г. Златоусте

POWER CHARACTERISTICS OF CONTROLLED FIVE-PHASE LOW-POWER AC ELECTRONIC MOTORS

P.G. Vigriyanov

Zlatoust Branch of South Ural State University

Проводится анализ влияния угла управления коммутацией на энергетические характеристики пятифазных вентильных двигателей с гальванически развязанными фазами и пятифазных вентильных двигателей с разомкнутой схемой обмотки якоря, питающейся от одного источника при полной коммутации. Показано изменение величины электромагнитной мощности и электромагнитного КПД двигателей при регулировании угла управления коммутацией в пределах одного межкоммутационного интервала при постоянной частоте вращения для каждого варианта исполнения двигателей.

Ключевые слова: пятифазный управляемый вентильный двигатель, электромагнитная мощность, электромагнитный КПД, энергетические характеристики.

The influence of commutation control angle on the power characteristics of five-phase AC electronic motors with galvanically undone phases and five-phase ac electronic motors with armature coil open circuit powered from one source at full commutation is analyzed. During the adjustment of commutation control angle within one commutation interval at constant rotation frequency for each motor model the change of electromagnetic capacity and motors electromagnetic coefficient of efficiency is detected.

Keywords: five-phase controlled AC electronic motor; electromagnetic capacity; electromagnetic coefficient of efficiency; power characteristics.

Вентильные двигатели постоянного тока являются основой бесконтактных приводов, которые занимают заметное место среди электроприводов в различных системах автоматического управления и регулирования летательных аппаратов, роботов и манипуляторов, судов и автомобилей, а также в металлорежущих станках, медико-биологических и информационно-преобразовательных системах [1–6].

При высоких объемно-массовых и энергетических показателях вентильные двигатели (ВД) имеют хорошие регулировочные характеристики, а возможность непосредственного управления от цифровых вычислительных машин [3–8] делает их наиболее привлекательными при разработке систем управляемого бесконтактного электропривода. Повышенные требования к надежности двигателей могут быть выполнены путем увеличения числа фаз обмотки якоря. Однако применение управляемых многофазных ВД в настоящее время ограничивается отсутствием методов количественной оценки энергетических характеристик.

В связи с этим возникает задача количественной оценки энергетических характеристик управляемых ВД различных схем исполнения.

Наличие канала жесткой обратной связи по положению ротора позволяет получить в ВД кроме изменения величины питающего напряжения обмотки якоря дополнительный способ регулирования за счет изменения угла управления коммутацией силовых ключей полупроводникового коммутатора. По своему принципу воздействия на силовую часть машины этот способ подобен изменению положения щеток в коллекторном двигателе постоянного тока с независимым (или параллельным) возбуждением. Однако в коллекторной машине сдвиг щеток с линии геометрической нейтрали соответствует только одному режиму работы при неизменной величине тока нагрузки. Изменение величины нагрузки в большую или меньшую сторону от этого режима приводит к ухудшению условий коммутации и уменьшению энергетических показателей двигателя. Возможен один теоретический вариант настройки коммутации – это при изменении величины тока нагрузки произ-

водить соответствующее изменение положения щеток путем механического поворота всей щеточной траверсы. Практическая реализация такого способа регулирования достаточно сложна и обладает низким быстродействием за счет наличия механической части.

При установке положения щеток на линии геометрической нейтрали в коллекторном двигателе магнитные оси поля якоря и поля индуктора сдвинуты в пространстве на $\pi/2$ (или 90 электрических градусов). В этом случае коммутация называется нейтральной. Изменить положение щеток относительно геометрической нейтрали в коллекторном двигателе можно либо в направлении вращения якоря, либо навстречу направлению вращения. В первом случае коммутацию принято называть запаздывающей, во втором – опережающей. Магнитные оси полей якоря и индуктора при запаздывающей коммутации сдвинуты на угол, больший чем $\pi/2$, при опережающей коммутации на угол, меньший чем $\pi/2$. Следует отметить, что положение магнитных полей в пространстве при работе коллекторного двигателя не изменяется.

В вентильной машине информация с датчика положения представляет собой совокупность электрических сигналов, что позволяет проводить их обработку и вносить нужные изменения в процессе работы ВД. Способы обработки сигналов и внесения нужных изменений определяются главным образом типом и конструктивными особенностями датчика положения ротора [2, 3, 5, 8]. Быстродействие канала обработки и преобразования электрических сигналов значительно выше быстродействия механического канала и частоты следования управляющих сигналов, что позволяет поставить в соответствие величине потребляемого тока (тока нагрузки) определенный угол управления коммутацией в течение одного (каждого) межкоммутационного интервала. Связь между током нагрузки и углом управления коммутацией зависит от назначения и особенностей режимов работы вентильного привода и в каждом конкретном случае определяется индивидуально.

Понятия опережающей, нейтральной и запаздывающей коммутации используем и в ВД. В отличие от коллекторного двигателя, в ВД положение индуктора непрерывно меняется. Поэтому для случая нейтральной коммутации считаем, что сдвиг между осью поля якоря после окончания коммутационных процессов и осью индуктора в положении, соответствующем положению ротора в середине МКИ, равен $\pi/2$.

Предельное значение угла управления коммутацией в одном и другом направлении определяется исходя из условия получения вращающего момента, совпадающего с направлением вращения ротора. Этот момент будет равен нулю в случае совпадения магнитных осей якоря и индуктора, что выполняется в том случае, если в коллекторном двигателе щетки сдвинуты с линии геометри-

ческой нейтрали на углы $\pm\pi/2$. В случае ВД этот угол отсчитываем именно от положения магнитной оси ротора (индуктора) в середине МКИ до положения оси поля якоря после окончания коммутационных процессов.

Изменение величины угла управления коммутацией в вентильных машинах обычно (но не обязательно) осуществляется в пределах одного МКИ. При этом величины предельных отклонений угла управления относительно положения нейтральной коммутации составляют $\pm\Delta/2$. Знак плюс соответствует опережающей коммутации, а минус – запаздывающей.

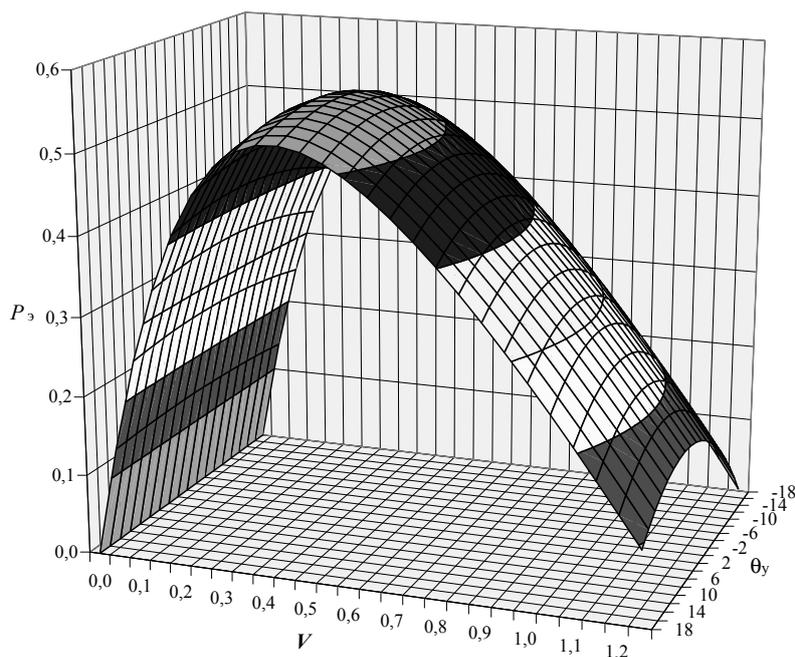
Для оценки энергетических характеристик ВД воспользуемся программным обеспечением [9], разработанным на основе методики исследования электромагнитных процессов многофазных ВД с различными способами питания обмотки якоря по мгновенным значениям координат [10].

Для получения общей картины, показывающей влияние угла управления коммутацией на энергетические характеристики двигателей, рассмотрим два варианта исполнения ВД. В первом из них фазы обмотки якоря гальванически развязаны, и каждая из них питается от своего источника. Для первого варианта определим энергетические характеристики ВД при заданных параметрах обмотки якоря для всего диапазона частот вращения, пока машина работает в двигательном режиме. Изменение угла управления коммутацией проводим в пределах одного межкоммутационного интервала.

Для выяснения основных закономерностей поведения энергетических параметров ВД при изменении угла управления коммутацией (θ_y) рассмотрим на конкретном варианте исполнения машины. Возьмем пятифазный двигатель с гальванически развязанными фазами обмотки якоря при полной коммутации с относительным индуктивным сопротивлением фазы обмотки якоря $\xi=0,5$. Изменение угла управления коммутацией задаем в пределах $\theta_y=\pm\pi/10$ (± 18 градусов). Рассмотрим энергетические характеристики двигателя – это зависимости относительной электромагнитной мощности (P_s) и электромагнитного КПД (η_p) от относительной частоты вращения (I) и угла управления коммутацией при заданной величине индуктивности фаз обмотки якоря (рис. 1).

При изменении угла управления коммутацией изменяются максимальные значения электромагнитной мощности (рис. 1, а) и частота идеального холостого хода. Причем отстающая и опережающая коммутация по-разному влияют на изменение этих величин. Так отстающая коммутация приводит к монотонному уменьшению максимального значения электромагнитной мощности (от 0,546 при нейтральной коммутации до 0,395 при отстающей на 30 градусов коммутации) и частоты холостого хода (соответственно от 1,40 до 1,04). В случае опережающей коммутации максимум элек-

а)



б)

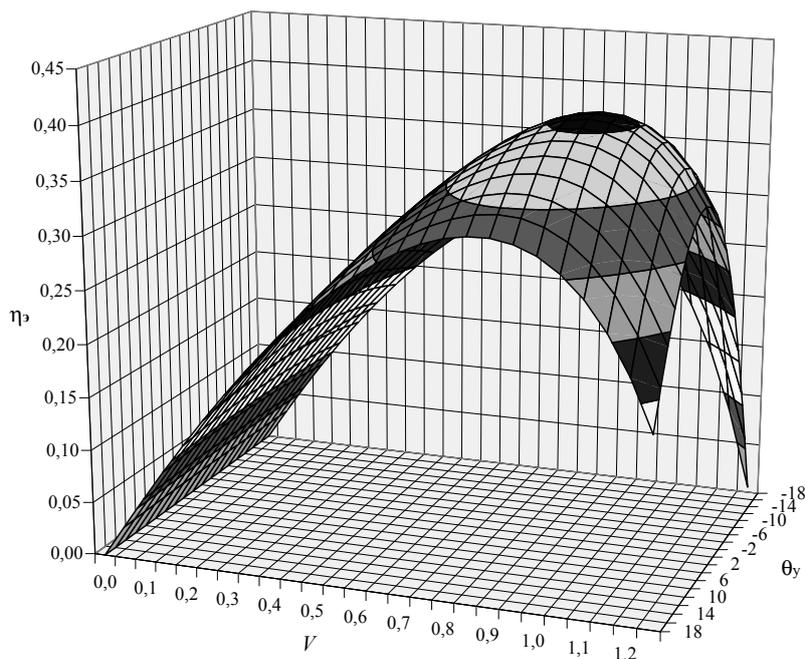


Рис. 1. Зависимости электромагнитной мощности (а) и электромагнитного КПД (б) пятифазных ВД при регулировании угла управления коммутацией в пределах одного МКИ ($\xi=0,5$)

тромагнитной мощности и частота холостого хода сначала возрастают, достигают своих максимальных значений (соответственно 0,549 и 1,45), а только после этого уменьшаются (до 0,467 и 1,18) при одинаковой величине предельного угла управления $\pi/10$.

Увеличение максимального значения электромагнитной мощности в случае опережающей коммутации объясняется тем, что коммутацион-

ные процессы в переключаемой фазе, обусловленные индуктивностью обмотки якоря, заканчиваются раньше, чем при нейтральной коммутации, что и обеспечивает такой результат при определенной величине угла опережения коммутации (в нашем случае этот угол составляет пять градусов).

Полученные закономерности показывают, что для реального двигателя изменения максимального значения электромагнитной мощности при от-

стающей коммутации оказываются больше (27,6 %), чем при опережающей коммутации (14,5 %) при одинаковой величине угла управления.

Электромагнитный КПД двигателей так же зависит от величины угла управления коммутацией. При этом положения максимального значения КПД смещены в область более высоких частот вращения по отношению к положениям максимумов электромагнитной мощности при одинаковой величине угла управления коммутацией (см. рис. 1а, б). Это смещение составляет при нейтральной коммутации 0,55, отстающей – 0,40 и опережающей – 0,375. Максимальное значение электромагнитного КПД при отстающей коммутации (рис. 1, б) монотонно уменьшается от 0,406 при нейтральной коммутации и при угле управления коммутацией $\theta_y = -\pi/10$ составляет 0,282. В случае опережающей коммутации величина максимального КПД сначала незначительно увеличивается до 0,408 ($\theta_y = +\pi/90$), а затем уменьшается до 0,33 ($\theta_y = +\pi/10$). Увеличение максимального значения электромагнитного КПД в случае опережающей коммутации объясняется тем, что коммутационные процессы в переключаемой фазе, обусловленные индуктивностью обмотки якоря, заканчиваются раньше, чем при нейтральной коммутации, что и обеспечивает такой результат при определенной величине угла опережения коммутации (в нашем случае этот угол составляет $\theta_y = +\pi/90$). Таким образом, изменение угла управления коммутацией в сторону отставания в пределах одного интервала позволяет регулировать (уменьшать) КПД в большей мере (на 30,5 %), чем при изменении угла в сторону опережения – на 18,7 %. Эту особенность

удобно использовать в тех случаях, когда в электроприводах возникает необходимость регулирования величины КПД двигателя.

Во втором варианте рассмотрим двигатели с разомкнутой обмоткой якоря, питающейся от одного источника, и оценим влияние угла управления коммутацией на энергетические характеристики двигателей с разной величиной индуктивности обмотки якоря для заданной частоты вращения. Задаем два значения величины относительного индуктивного сопротивления ($\xi=0,5$ и $\xi=1,0$). Энергетические характеристики этих двигателей приведены на рис. 2.

Индуктивность обмотки якоря оказывает существенное влияние на коммутационные процессы, что и отражается на характеристиках реальной машины. Так, при опережающей коммутации электромагнитная мощность и электромагнитный КПД сначала несколько увеличиваются, а затем плавно уменьшается. При отстающей коммутации обе величины монотонно уменьшаются. В результате этого при одинаковой величине угла коммутации и разных знаках этого угла получаем, что электромагнитная мощность изменяется на 20,6 % при опережающей коммутации и на 33,3 % при отстающей коммутации в случае, когда относительное индуктивное сопротивление фазы ВД имеет величину $\xi=0,5$. Увеличение индуктивности обмотки в два раза ($\xi=1,0$) вида кривой не изменяет, а соответствующие изменения мощности составляют 20,0 и 37,1 %.

Особый интерес представляет сравнение энергетических параметров двигателей с разным числом фаз при одинаковой величине угла управления.

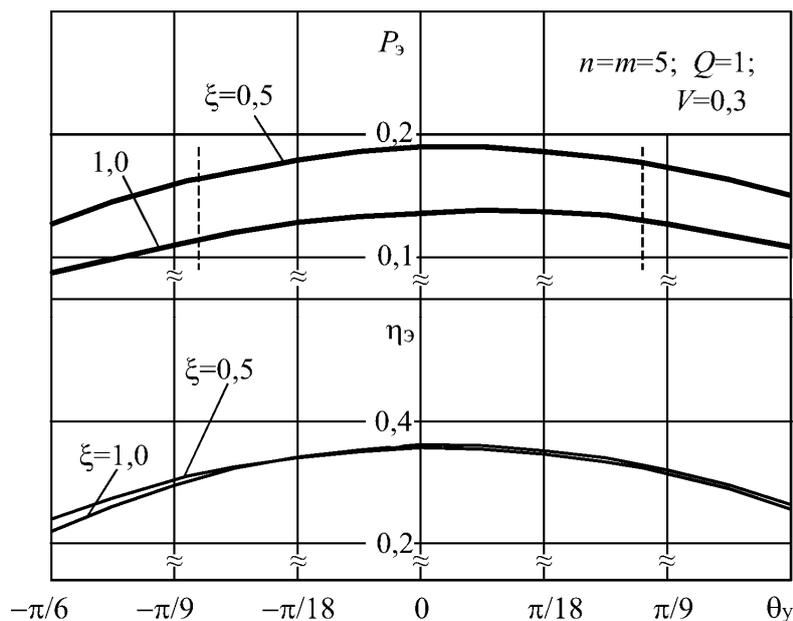


Рис. 2. Энергетические характеристики пятифазного ВД с разомкнутой схемой обмотки якоря при регулировании угла управления коммутацией ($\xi=0,5; 1,0$)

Изменение электромагнитной мощности (в процентах) при одинаковой величине угла управления коммутацией

Индуктивность фазы относительная ξ	Угол управления коммутацией θ_v	Число фаз двигателя	
		3	5
0,5	$-\pi/6$	31,4	33,3
	$+\pi/6$	16,9	20,6
1,0	$-\pi/6$	38,6	37,1
	$+\pi/6$	13,6	20,0

Поскольку увеличение числа фаз обмотки якоря ВД приводит к уменьшению длительности межкоммутационного интервала, то при одинаковой величине угла управления коммутацией сигналы управления оказываются сдвинутыми на один или несколько тактов в сторону опережения или отставания. Проведем количественную оценку изменения электромагнитной мощности пятифазных и трехфазных ВД при величине угла управления $\theta_v = \pi/6$. Для пятифазных ВД этот угол выходит за пределы одного такта. На рис. 2 границы одного интервала указаны вертикальными пунктирными линиями. При одинаковой величине угла управления найдены величины изменения электромагнитной мощности двигателей, различающихся числом фаз, при двух значениях относительного индуктивного сопротивления обмотки, которые приведены в таблице.

Полученные результаты расчетов показывают, что изменение электромагнитной мощности при отстающей коммутации всегда больше, чем при опережающей коммутации независимо от величины индуктивности реального двигателя и числа его фаз.

Электромагнитный КПД пятифазных ВД с различной величиной индуктивности фаз обмотки якоря при изменении угла управления коммутацией в пределах одного межкоммутационного интервала практически не изменяется. Максимальное отклонение КПД наблюдается при замедленной коммутации ($\theta_v = -\pi/10$) и составляет 3 % (см. рис. 2).

Выводы

1. Показано, что повышенные требования по надежности бесконтактных электроприводов систем автоматического регулирования и управления могут быть удовлетворены путем применения исполнительных элементов на базе многофазных вентильных двигателей постоянного тока. Установлено, что разработка и применение таких электроприводов ограничивается отсутствием методов анализа энергетических характеристик для различных схем исполнения таких двигателей.

2. На примере двух вариантов исполнения пятифазного управляемого вентильного двигателя выявлены основные закономерности протекания физических процессов, которые послужили основой для разработки математической модели и методики, ориентированной на применение численного, универсального, компьютерного метода моделирования электромагнитных процессов электромеханического преобразователя энергии с постоянной структурой.

Компьютерное моделирование позволяет решать многие задачи исследования физических процессов, включая и оптимизацию этих процессов. Предложенная методика исследования практически реализована в пакете программ расчета энергетических характеристик вентильных двигателей по мгновенным значениям координат.

3. Получены энергетические характеристики для двух вариантов исполнения пятифазного вентильного двигателя: с гальванически развязанными фазами; с разомкнутой обмоткой, питающейся от одного источника. Для первого варианта исполнения показано влияние угла управления коммутацией на электромагнитную мощность и электромагнитный КПД двигателя при опережающей и отстающей коммутации при изменении угла в пределах одного межкоммутационного интервала. Установлено, для реального двигателя изменение электромагнитной мощности (на 13,1 %) и электромагнитного КПД (на 11,8 %) при отстающей коммутации оказывается больше, чем при опережающей коммутации при одинаковой величине угла управления. Для второго варианта исполнения получены энергетические характеристики двигателей при двух значениях индуктивности обмотки якоря при постоянной частоте вращения. Установлено, что величина индуктивности обмотки якоря существенно влияет на величину электромагнитной мощности при изменении угла управления в пределах одного межкоммутационного интервала, величина же электромагнитного КПД практически не изменяется. Сравнение энергетических параметров двигателей с разным числом фаз при одинаковой величине угла управления показало, что в машинах с большим числом фаз получен больший диапазон изменения электромагнитной мощности, чем в машинах с меньшим числом фаз, и зависит он от величины индуктивности обмотки якоря.

Литература

1. Дубенский, А.А. *Бесконтактные двигатели постоянного тока* / А.А. Дубенский. – М.: Энергия, 1967. – 144 с.
2. Овчинников, И.Е. *Бесконтактные двигатели постоянного тока* / И.Е. Овчинников, Н.И. Лебедев. – Л.: Наука, 1979. – 270 с.
3. Воронин, С.Г. *Электропривод промышленных роботов с управлением от микро-ЭВМ* / С.Г. Воронин // *Роботы и робототехнические*

системы: материалы III Всесоюзной конференции. – Челябинск: ЧПИ, 1985. – Ч. 2. – С. 76–78.

4. Егоров, Ю.Н. Системы привода роботов: справочник / Ю.Н. Егоров, С.А. Ковчин; под ред. С.А. Ковчина. – Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1982. – 336 с.

5. Михайлов, О.П. Перспективы развития автоматизированного электропривода металлорежущих станков / О.П. Михайлов // *Электричество*. – 1985. – № 10. – С. 11–17.

6. Новая серия отечественных вентильных электродвигателей для универсальных технических роботов / Е.В. Волокитина, Н.А. Данилов, В.А. Нестерин, Ю.Г. Опалев // *Электротехника*. – 2011. – № 7. – С. 13–16.

7. Сидельников, Б.В. Перспективы развития и применения бесконтактных регулируемых электро-

двигателей / Б.В. Сидельников // *Известия вузов. Электромеханика*. – 2005. – № 2. – С. 14–20.

8. Путников, В.В. Бесконтактные электродвигатели постоянного тока с повышенной нагрузкой для космических аппаратов / В.В. Путников, А.В. Путников, В.Б. Уваров // *Электротехника*. – 2007. – № 2. – С. 18–23.

9. Расчет энергетических характеристик многофазных вентильных двигателей малой мощности при полной коммутации: свидетельство об офиц. регистрации программы для ЭВМ № 2012614306 Российская Федерация / П.Г. Вигриянов. – № 2012611850; опубли. 14.05.12.

10. Вигриянов, П.Г. Электромагнитные процессы многофазных вентильных двигателей: монография / П.Г. Вигриянов. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2007. – 143 с.

Поступила в редакцию 10.05.2012 г.

Вигриянов Павел Георгиевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электрооборудование и автоматизация производственных процессов», Южно-Уральский государственный университет, филиал в г. Златоусте. Область научных интересов – исследование электромагнитных процессов многофазных вентильных двигателей в нормальных и аварийных режимах работы. Контактный телефон: 8-(3513) 66-58-69 (доб. *2111). E-mail: vpg_postbox@mail.ru.

Vigriyanov Pavel Georgievich – Candidate of Science (Engineering), Associate Professor of «Electrical Equipment and Production Process Automation» Department of Zlatoust Branch of South Ural State University. Research interests: study of electromagnetic processes of multiphase AC electronic motors in normal and emergency operation modes. Contact telephone number: 8-(3513) 66-58-69 (ext. * 2111). E-mail: vpg_postbox@mail.ru