

Р. А. Гараев

ЭФФЕКТИВНОЕ ЦИФРОВОЕ УПРАВЛЕНИЕ ВЕНТИЛЬНОЙ РЕАКТИВНОЙ ЭЛЕКТРОМАШИНОЙ В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ УГЛОВЫХ СКОРОСТЕЙ

Рассмотрены электромагнитные процессы в вентильных реактивных электрических моторах и генераторах с учетом дискретного характера управляющих воздействий со стороны цифрового контроллера, анализирующего угловое положение ротора электромашины при помощи датчика с ограниченной разрядностью. На основе математических выражений, описывающих магнитные поля и токи, создана компьютерная модель, позволившая оценить требования к ресурсам управляющего контроллера, необходимым для эффективного управления электромашиной в широком диапазоне угловых скоростей. *Вентильные реактивные электродвигатели / генераторы; абсолютный энкодер; микроконтроллер; управление фазами; силовые транзисторы; рекуперация*

ВВЕДЕНИЕ

Хотя первый электродвигатель, конструктивно соответствующий тому, что теперь принято именовать SRM – switched reluctance motor или в русскоязычной литературе ВРД – вентильный реактивный двигатель, был построен в 1838 г., активное развитие этого класса электромашин началось лишь в конце XX века с исследований П. Лоуренсона [1]. Ежегодно количество публикаций по темам, связанным с вентильными реактивными машинами (двигателями и генераторами), в настоящее время только растет [2–6]. Главной причиной столь позднего интереса к исследованию и практическому применению подобных электромашин является то, что их эффективное функционирование возможно лишь при использовании мощных силовых транзисторов с малым временем переключения (MOSFET и IGBT) и недорогих микроконтроллеров, наибольший прогресс в развитии которых наблюдается именно в последние годы.

Рассматриваемые электромашины, именуемые далее ВРМ, способны одинаково успешно функционировать как в режиме генератора (ВРГ), так и в качестве тягового двигателя, обладая при этом целым рядом привлекательных особенностей. К их числу относятся, прежде всего:

- конструктивная простота в сравнении с традиционными машинами переменного тока – синхронной и асинхронной;
- высокая технологичность и малая материалоемкость, что обеспечивает снижение стоимости и повышение надежности ВРМ;

- способность обеспечивать высокие уровни КПД и крутящего момента в более широком, чем, например, асинхронные машины диапазоне угловых скоростей;

- отсутствие коллектора, щеток и постоянных магнитов, что способствует достижению высоких показателей надежности и стойкости к факторам окружающей среды.

Отсутствие постоянных магнитов может в перспективе оказаться весьма существенным и с экономической точки зрения. Дело в том, что на фоне значительно возросшего в мире по экологическим причинам интереса к электрическим и гибридным транспортным средствам, ветрогенераторам и т.п. потребность в редкоземельных металлах, на основе которых производятся современные мощные постоянные магниты традиционных моторов/генераторов, может в ближайшие годы существенно возрасти. Между тем, практически монопольным поставщиком таких материалов в настоящее время является единственное государство – КНР.

Основными конструктивными элементами ВРМ являются шихтованные ротор и статор из недорогой магнитомягкой электротехнической стали с явно выраженными полюсами, а также простые полюсные обмотки со сравнительно небольшим числом витков на статоре. Функционирование столь простого электромеханического преобразователя возможно лишь при подключении его обмоток к коммутатору токов на базе мощных транзисторов, управляемых логикой, которую обычно реализуют на основе достаточно быстрого программируемого микроконтроллера.

Важной особенностью электромеханического преобразования энергии в ВРМ является не-

синусоидальность электрических токов и магнитных потоков в воздушных зазорах и пластинах ротора и статора и, строго говоря, нелинейная зависимость между ними. Это не позволяет применять традиционные аналитические методы, используемые при анализе и проектировании электрических машин переменного тока обычного исполнения. Наиболее продуктивным методом анализа и синтеза ВРМ можно считать компьютерное моделирование.

В данной работе представлены результаты моделирования ВРГ/ВРД с учетом особенностей микроконтроллерного управления, в частности, разрядности такого входного параметра, как код угла поворота ротора ВРМ.

1. КОММУТАЦИЯ ТОКОВ В ВРМ

Существуют разнообразные конструктивные варианты исполнения ВРМ, отличающиеся, в частности, конфигурацией магнитной системы и числом фаз. Одним из наиболее популярных является представленный на рис. 1 четырехфазный вариант с конфигурацией 8/6. В этом случае на восьми статорных полюсах располагаются четыре фазные обмотки (реально – восемь полуобмоток), число полюсов ротора равно шести. Подобные ВРМ обеспечивают в режиме двигателя хороший статический момент при старте, а также сравнительно малый уровень вариаций момента в пределах оборота.

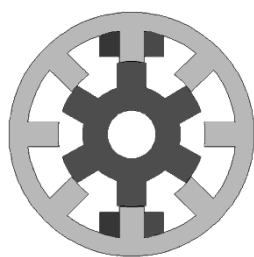


Рис. 1. Расположение двух последовательных полуобмоток одной фазы на полюсах статора ВРМ с конфигурацией магнитной системы 8/6

В рассматриваемой компьютерной модели предусмотрена возможность работы с различными конфигурациями магнитной системы, но реально проводились исследования именно четырехфазного ВРД/ВРГ с конфигурацией 8/6.

Коммутация токов в обмотках каждой фазы осуществляется при помощи силовых транзисторов, сигналы управления на которые подаются через блок драйверов *Dr* (см. рис. 2) от управляющего микроконтроллера *MC*, программа которого учитывает относительное уг-

ловое положение полюсов ротора и статора при помощи датчика поворота – абсолютного энкодера. Показанные на рисунке элементы: силовые транзисторы *VT1*, *VT2*, диоды *VD1*, *VD2* и две полуобмотки, показанные в виде двух катушек индуктивности, принадлежат одной фазе и для остальных фаз подключаются аналогично. Прочие элементы (емкостный накопитель и, возможно, аккумуляторная батарея, микроконтроллер, блок драйверов и энкодер) являются общими для всех фаз, хотя встречаются и схемы с индивидуальными накопителями для отдельных фаз [6].

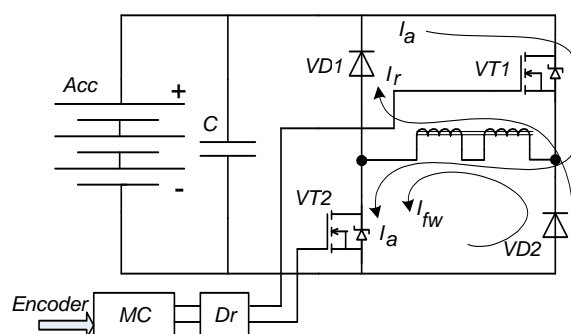


Рис. 2. Типичная схема управления токами в фазовых обмотках ВРМ (показана одна фаза)

Транзисторы в схеме работают в чисто ключевом режиме. Поэтому сигналы, подаваемые на их затворы, представляют собой прямоугольные импульсы, фронты и срезы которых должны быть привязаны к угловому положению полюсов ротора относительно полюсов статора. По-видимому, наиболее популярный способ обеспечения такой привязки заключается в табличном преобразовании кода углового положения ротора в код (четырёхбитный для четырехфазной ВРМ), выставляемый контроллером на связанный с драйвером силовых транзисторов порт управления. Для нормальной работы необходимо разработать и записать в память контроллера, по крайней мере, две таблицы – одну для момента (вращающего – в случае ВРД, или тормозящего – в случае ВРГ), направленного по часовой стрелке, другую – для противоположного направления.

По мере роста угловой скорости управляющая программа контроллера должна, по возможности, обеспечивать определенную коррекцию (временное упреждение) для компенсации отставания процесса нарастания тока по отношению к реальному положению полюсов из-за индуктивного сопротивления обмоток, а также укорочение или удлинение импульсов (см.

рис. 3). Достаточно просто это реализовать включением в программный цикл контроллера блока расчета текущей угловой скорости с последующим выбором, в зависимости от замеренной скорости, одной из нескольких заранее подготовленных управляющих таблиц.

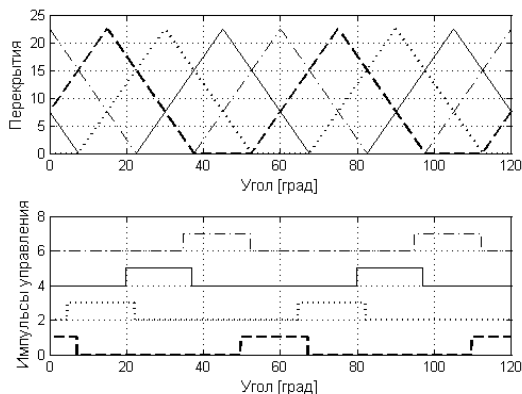


Рис. 3. Углы перекрытия полюсов четырех фаз и открывающие импульсы силовых транзисторов соответствующих фаз ВРМ в режиме двигателя

2. ОСНОВНЫЕ СООТНОШЕНИЯ

Учитывая, что основная цель работы заключалась в выяснении влияния элементов управления на эффективность работы ВРМ, при разработке модели использовались достаточно простые представления о магнитных цепях и потоках, в частности, нелинейность магнитопровода, и соответствующие тепловые потери не учитывались. При таком подходе переменное магнитное сопротивление для потоков фаз зависит лишь от пространственного (углового) перекрытия полюсов статора и ротора, и можно показать, что производная по времени для тока i -й фазы I_i определяется выражением:

$$I_i' = -I_i(t) \frac{Ovl_i'(t)}{Ovl_i(t)} + \frac{2\Delta}{\mu_0 a R w^2} D_i(st_i, I_i, U, \dots), \quad (1)$$

где $Ovl_i(t)$, $Ovl_i'(t)$ – угловое перекрытие полюсов ротора и статора для данной фазы и соответствующая производная по времени, Δ – радиальный зазор между полюсными выступами ротора и статора, μ_0 – магнитная проницаемость вакуума, w – полное число витков в фазных обмотках, a – аксиальная протяженность ротора (статора), R – радиус по уровню полюсов ротора, U – напряжение на накопителе (конденсатор и аккумулятор на рис. 2). Дополнительный член в правой части уравнения (1) $D(st_i, I_i, U, \dots)$ – реально описывается разными выражениями, в зависимости от текущего состояния данной фазы ВРМ. Момент перехода из одного состояния в другое определяются несколькими фактора-

ми, в том числе программой управляющего микроконтроллера. Достаточно полным для любой фазы можно считать набор, включающий 4 состояния:

- активная стадия, при которой открыты оба силовых транзистора $VT1$, $VT2$ (см. рис. 2) и ток I_a последовательно протекает от накопительного конденсатора (и источника, показанного на рисунке в виде батареи) через полуобмотки фазы и силовые транзисторы;

- состояние, часто именуемое в литературе по ВРМ [5] «freewheeling» (fw – фривилинг), при котором верхний транзистор принудительно закрыт (по достижении расчетного предельного для обмотки ВРМ тока) для предотвращения насыщения магнитопровода, а нижний остается открытым, вследствие чего ток I_{fw} продолжает течь последовательно через диод $VD2$, фазные полуобмотки и открытый транзистор $VT2$;

- стадия рекуперации, при которой ток I_r продолжает течь через полуобмотки и диоды в накопитель при закрытых транзисторах;

- холостой ход, характеризуемый отсутствием фазного тока в обмотке при закрытых транзисторах вследствие состояния останова ВРМ и завершения переходного процесса в режимах рекуперации или фривилинга.

Без учета падения напряжения на соединительных проводах в активном режиме:

$$D_i = U - 2\Delta U_T - I_i r, \quad (2)$$

где U – напряжение на накопителе, ΔU_T – падение напряжения на одном открытом силовом транзисторе, r – активное сопротивление полуобмоток одной фазы.

Аналогично, в состоянии фривилинга (имеющем практический смысл для двигателя, а не генератора):

$$D_i = -\Delta U_D - \Delta U_T - I_i r, \quad (3)$$

где ΔU_D – падение напряжения на обратном силовом диоде.

Для режима рекуперации:

$$D_i = -U - 2\Delta U_D - I_i r. \quad (4)$$

Что касается пассивного режима, соответствующий член, естественно, равен нулю.

Мгновенное значение механического момента на валу (вращающего для двигателя и тормозящего – для генератора) определяется формулой, получаемой путем дифференцирования по угловой координате выражения для энергии магнитного поля в зазоре ВРМ:

$$M(t) = \frac{\mu_0 a R w^2}{4\Delta} \sum_{i=1}^N I_i^2(t) \cdot Ovl'_{i\alpha}(\alpha(t)), \quad (5)$$

где N – число фаз, $I_i(t)$ – мгновенные значения тока i -й фазы, $Ovl'_{i\alpha}(\alpha(t))$ – производная углового перекрытия полюсов ротора и статора i -й фазы по углу поворота α ротора.

Соответственно, механическая мощность на валу определяется произведением момента на угловую скорость:

$$P_M = M\omega. \quad (6)$$

Анализируя выражение (5), легко сделать вывод о том, что из-за индуктивного сопротивления фазных обмоток средние значения квадратов токов и, соответственно, максимальный механический момент на валу ВРМ с ростом угловой скорости должны иметь тенденцию к снижению. Что же касается максимальной механической мощности, то ее поведение с учетом выражения (6) может зависеть от угловой скорости и более сложным образом, в частности, для механической мощности возможно существование экстремума.

3. МОДЕЛИРОВАНИЕ ВРМ

Разработанная автором компьютерная модель основывается на интегрировании системы дифференциальных уравнений вида (1) для всех фаз ВРМ с учетом подготавливаемых программой таблиц управления. С их помощью интегрирующая функция определяет момент открывания или закрывания силовых транзисторов и принимает решение о переходе из одного состояния в другое (см. предыдущий раздел). Угол поворота ротора квантуется с шагом, определяемым разрядностью воображаемого энкодера. Таким образом, моделирующая программа эмулирует работу микроконтроллера ВРМ. Предусмотрена возможность модификации строк управляющей таблицы заданием сдвига фронта открывающего импульса (относительно положения, определяемого чисто геометрическим перекрытием полюсов) и сжатия импульса. Оба параметра, обозначаемые далее Sh и Sq , являются целыми числами со знаком. Минимальный квант сдвига/сжатия равен угловому кванту энкодера, а знак позволяет задавать не только упреждающую выдачу импульса на драйвер транзисторов, но и, наоборот, задержку. При отрицательном параметре сжатия импульс фактически удлиняется.

Как и для реальных блоков управления ВРМ моделирующая программа позволяет предотвращать переход элементов магнитопровода в состояние насыщения при высокой индукции

магнитного поля ограничением максимальной силы тока транзисторов (параметр может меняться оператором). Предполагается, что эта функция реализуется на практике не программой контроллера, а, например, основанной на компараторах логикой внутри транзисторного драйвера или дополнительными электронными узлами, закрывающими транзисторы. При снижении уровня тока ниже задаваемого оператором нижнего порога, если выходной сигнал эмулируемого микроконтроллера остается активным, транзистор открывается вновь. В результате на «плато» токовых импульсов образуется характерная гистерезисная «пила» (см. рис. 4).

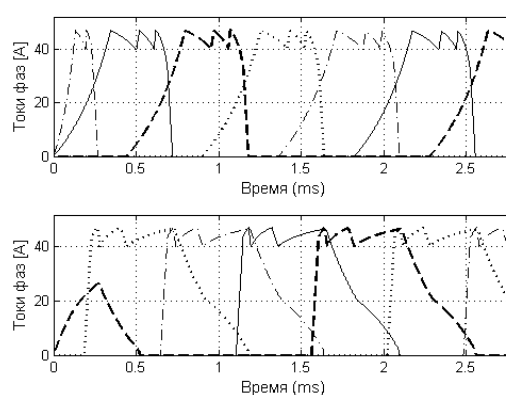


Рис. 4. Токи четырех фазовых обмоток ВРМ в режиме генератора (верхняя диаграмма) и двигателя (нижняя) при одинаковых по величине и знаку угловых скоростях ротора 570 с^{-1} (5443 об./мин.)

В процессе моделирования (как ВРГ, так и ВРД) показано, что с ростом угловой скорости наблюдается не просто плавное изменение формы токовых импульсов. При достижении некоторого интервала обнаруживается возможность формирования импульсов с практически плоской вершиной (см. верхнюю диаграмму на рис. 5). При дальнейшем росте скорости вращения она вновь деформируется (см. рис. 6). Помимо специфической формы импульсов указанный довольно узкий скоростной интервал характеризуется возможностью достижения при удачном выборе вышеупомянутых кодов упреждения и сжатия (Sh / Sq):

- высокого по сравнению с зоной более низких угловых скоростей уровня эффективности работы ВРМ (КПД – не менее 85%);
- наивысшей механической мощности для ВРД или электрической – для ВРГ.

Характерно, что при дальнейшем росте скорости возникает необходимость активно ис-

пользовать управляющий микроконтроллер для ограничения тока силовых транзисторов и, соответственно, максимального уровня индукции магнитного поля.

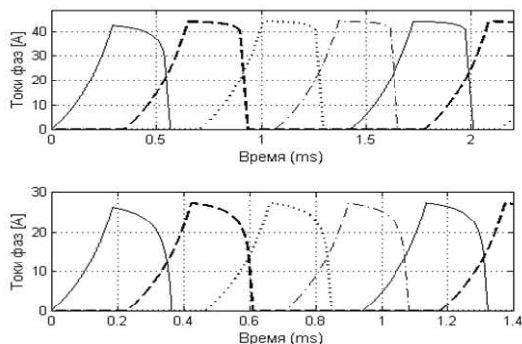


Рис. 5. Токи фаз ВРГ: на угловой скорости 730 c^{-1} при максимальной мощности (верхняя диаграмма); на скорости 1100 c^{-1} при пониженной мощности (нижняя диаграмма)

Упомянутые выше элементы на основе компараторов тока в составе транзисторных драйверов оказываются неспособными бороться с эпизодическим переходом участков магнитопровода в насыщение из-за быстрого нарастания токов на определенных частях импульсов (см. участки, предшествующие срезам на верхней диаграмме рис. 6).

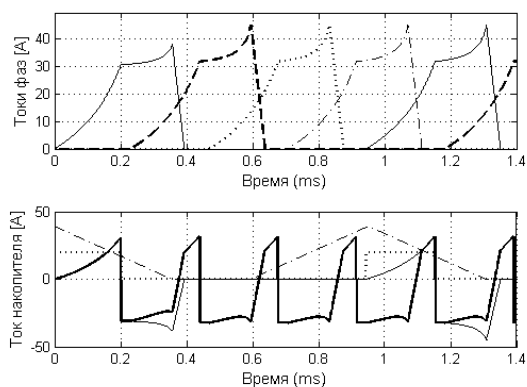


Рис. 6. Токи фаз генератора при высокой мощности в области высоких угловых скоростей и соответствующий суммарный ток накопителя (положительный ток – вытекающий)

Дело в том, что подобные участки попадают в зону, где силовые транзисторы, подчиняясь сигналам логики компараторной схемы или контроллерной программы, уже закрыты (см. нижнюю диаграмму на рис. 6). На этой диаграмме штрихпунктирной линией показано уг-

ловое перекрытие для первой фазы, ток которой на верхней диаграмме показан сплошной линией. Пунктирная линия на нижней диаграмме соответствует сигналу открывания транзисторов фазы, тонкая сплошная – току данной фазы, как составляющей в общем токе ВРМ, толстая сплошная – суммарному току всех фаз в цепи между накопителем и ВРМ. Заметно, что существенное нарастание тока через обмотку фазы наблюдается при нулевом напряжении на затворе транзисторов, т.е. это ток рекуперативной стадии, текущий через диоды, а не транзисторы.

Объяснение наблюдаемой эволюции формы токовых импульсов может быть найдено с помощью уравнения (1). Первое слагаемое в правой части $I_i \cdot \text{Ov}l'_i \cdot \text{Ov}l_i^{-1}$ по мере роста угловой скорости и при достаточно большом уровне тока в момент, предшествующий закрыванию транзисторов, способно либо скомпенсировать второе слагаемое и тем обеспечить нулевую производную для силы тока, либо поменять знак производной в сравнении с зоной меньших угловых скоростей. Соответственно, становится возможным формирование плоской вершины или нарастающего тока при закрытых ключевых транзисторах фазы.

Проведем оценку угловой скорости, вблизи которой наблюдается уплощение вершины и, соответственно, достигается максимальная мощность. Заменяя с приемлемой точностью первое слагаемое произведением $I_i \omega$ и полагая производную от тока фазы равной нулю, а начальное значение считая примерно соответствующим I_{sat} – порогу ограничителя схемы предотвращения насыщения, получим для искомой угловой скорости выражение:

$$\omega_{Pw} \approx \frac{2\Delta \cdot U}{I_{sat} \cdot \mu_0 a R w^2} \tag{7}$$

При выводе (7) учтено, что напряжение на накопителе (часто сотни вольт в мощных изделиях) обычно существенно превышает падение напряжения на открытых диодах и на проводах обмоток. Если от угловой скорости перейти к периоду вращения, нетрудно преобразовать (7) к виду, физический смысл которого более прозрачен:

$$\frac{I_{sat} \cdot \mu_0 a \cdot 2\pi R w^2}{T_{Pw}} = \frac{I_{sat}}{T_{Pw}} L \approx U,$$

где L – параметр, который можно условно назвать индуктивностью ВРМ. Подстановка в (7) значений параметров, использованных при моделировании, дает величину, близкую к 620 c^{-1} . Как уже отмечалось, при превышении значения

единственный способ недопущения насыщения заключается в использовании контроллерной логики, а именно, в правильном выборе программой параметров Sh и Sq . При неудачном выборе возможно как превышение порога насыщения, так и наоборот, недогруженность магнитопровода, когда максимальный ток и, соответственно, индукция магнитного поля оказываются заметно меньше допустимых (см. нижнюю диаграмму на рис. 5). Такой вариант, как правило, не приводит к ощутимой потере эффективности ВРМ (часто наоборот, КПД несколько возрастает), однако существенно падает механическая (для ВРД) или электрическая (для ВРГ) мощность. В процессе моделирования учитывалось, что с практической точки зрения привлекательным является лишь разумное сочетание высокого КПД и большой удельной мощности ВРМ. В последующих иллюстрациях представлены результаты, отбор которых происходил именно с учетом достижения высокой или максимальной мощности ВРМ при данной угловой скорости с близким к максимальному КПД. В частности, если для некоторой пары Sh/Sq незначительная потеря в КПД (2–3%) сопровождалась ощутимым ростом мощности (5 и более процентов) в сравнении с другими парами, то выбиралась для формирования кода в управляющей таблице именно она. Сочетания Sh / Sq , приводившие к недопустимому насыщению магнитопровода, отбрасывались. На рис. 7 показана совокупность точек с разными значениями Sh / Sq , для каждой из которых выполнено условие не превышения порога насыщения.

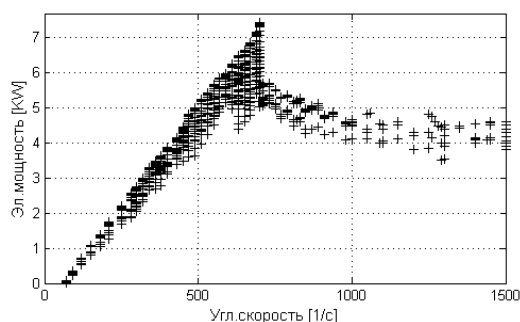


Рис. 7. Исходная совокупность точек для выбора оптимальных пар Sh / Sq при формировании таблицы управления ВРГ

В результате отбора пар, обеспечивающих достижение близкого к максимальному для данной угловой скорости КПД, с высоким уровнем удельной мощности, получен набор диаграмм, характеризующих зависимость основных параметров от угловой скорости (см. рис. 8).

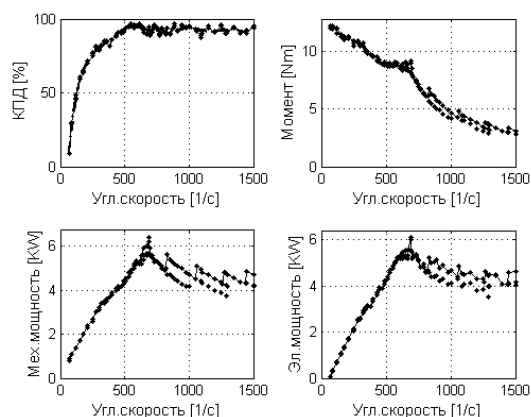


Рис. 8. Диаграммы основных параметров для высокоэффективного ВРГ с 7-битным энкодером

В процессе отбора точек наряду с уровнем максимальной магнитной индукции, КПД и мощностью, принимались в расчет и два дополнительных обстоятельства:

- необходимость получения плавной и, по большей части, монотонной зависимости механического момента от оборотов;
- по возможности, редкая в масштабах всего рабочего диапазона угловых скоростей смена кодовых комбинаций Sh / Sq при изменении скорости.

Первое требование очевидно обусловлено необходимостью максимально комфортного сопряжения ВРГ с источником механической энергии (ДВС, газовая или водяная турбина, ветродвигатель и т. п.). Смысл второго требования заключается в том, что с появлением каждой новой кодовой комбинации Sh / Sq требуется введение новой таблицы управляющих кодов для некоторого диапазона скоростей. Таким образом, частая смена комбинаций Sh / Sq по мере роста угловой скорости означает необходимость хранения в ПЗУ контроллера большого числа кодовых таблиц. Для ВРД оба указанных требования также существенны, как и для ВРГ.

Как можно видеть на рис. 8, при построении графиков оставлено некоторое количество несоединенных сплошной линией «лишних» точек. Нетрудно заметить (особенно наглядно на графике механического момента), что для областей правее ω_{p_w} точки хорошо укладываются на 5 «параллельных» линий. Для каждой линии характерно использование одинаковых или очень близких комбинаций Sh / Sq . Само существование таких отчетливых зон очевидно связано с дискретным характером процесса управления ВРМ. Контроллер принимает решения

о включении/выключении транзисторных ключей на дискретном наборе значений угла поворота, причем минимальный квант для энкодера совпадает с квантом, используемым при построении таблиц на основе дискретного набора комбинаций Sh / Sq .

«Своевременные» переходы с одной линии на другую (смена таблиц) по мере изменения угловой скорости (наиболее подходящие точки соединены сплошными линиями) позволяют в указанной области добиться относительно малых, хотя и заметных вариаций момента и мощности ВРМ при изменении скорости. Для рассматриваемых диаграмм угловой квант соответствовал 7-битному энкодеру, т. е. в угловом диапазоне, равном периоду следования полюсов на роторе 60° (см. рис. 1) различались 2^7 положений с шагом около 28 угловых минут.

С помощью компьютерной модели были оценены характеристики ВРГ/ВРД и с энкодерами меньшей разрядности. В свете сказанного выше очевидно, что рост величины углового кванта при уменьшении разрядности все более усложняет подбор комбинаций Sh / Sq , обеспечивающих приемлемый уровень мощности при высоком КПД без входа в режим насыщения в зоне правее ω_{Pw} . За счет выбора Sh / Sq удается для всех разрядностей (7, 6 и 5 бит) получить сходные зависимости КПД от скорости вращения (см. рис. 9).

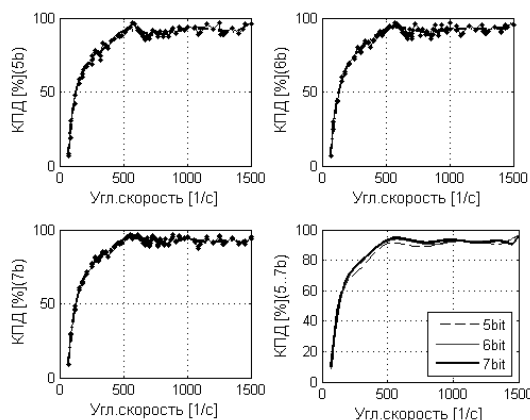


Рис. 9. Изменение КПД высокоэффективного ВРГ с 5, 6 и 7-битными энкодерами

В правом нижнем углу представлены кривые, соответствующие аппроксимации зависимостей по методу наименьших квадратов полиномами 11 степени.

Из диаграмм на рис. 10 и 11 (типы линий аналогичны рис. 9) видно, что самыми благоприятными для потребителя характеристиками

из трех в области правее ω_{Pw} обладает ВРГ, оснащенный 7-битным энкодером.

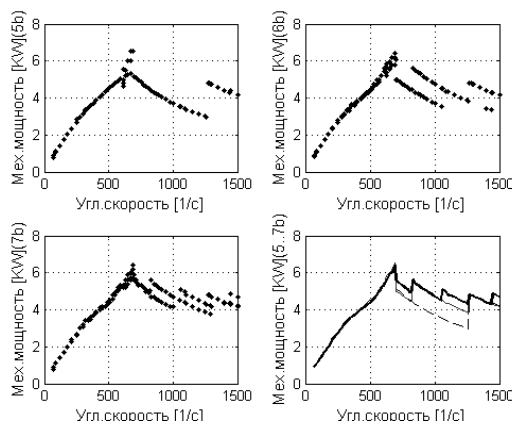


Рис. 10. Предельные уровни потребной механической мощности на валу высокоэффективного ВР генератора с 5, 6 и 7-битными энкодерами

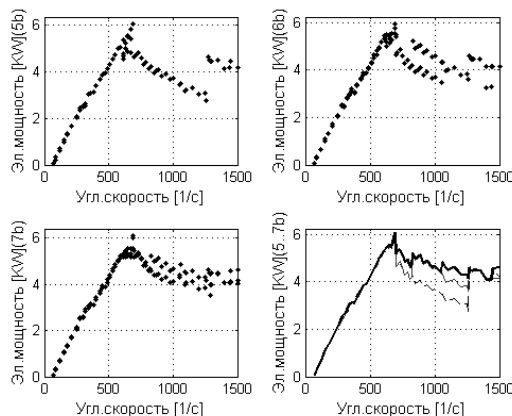


Рис. 11. Предельные уровни электрической мощности высокоэффективного ВРГ с 5, 6 и 7-битными энкодерами

В то же время для частот ниже ω_{Pw} ВРГ с повышенной разрядностью энкодера не имеет существенных преимуществ.

Результаты моделирования работы ВРД с различными по разрядности энкодерами представлены на рисунках 12, 13 и 14. Как и для генератора, несмотря на различия в величинах углового кванта, возможен выбор таких комбинаций Sh / Sq для каждой разрядности, что потери в КПД для малоразрядного варианта будут не очень значительными по сравнению с более высокоразрядным (в среднем не более 5%). Тем не менее, как и в случае генерации, работа в режиме двигателя на скоростях выше ω_{Pw} характеризуется значительными вариациями момента и механической мощности при изменении угловой скорости.

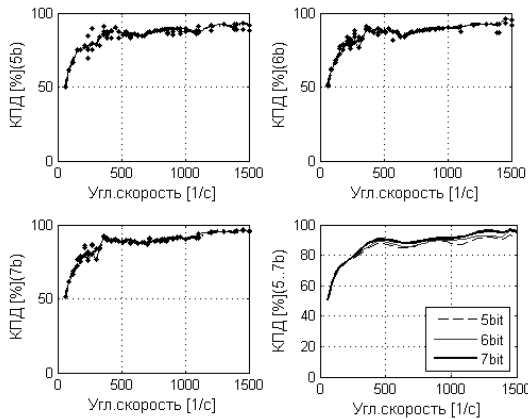


Рис. 12. Вариации КПД высокоэффективного вентиляльного реактивного двигателя с 5, 6 и 7- битными энкодерами

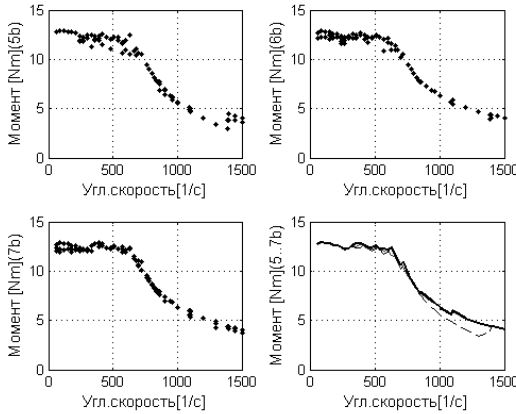


Рис. 13. Механический момент ВРД с 5, 6 и 7-битными энкодерами

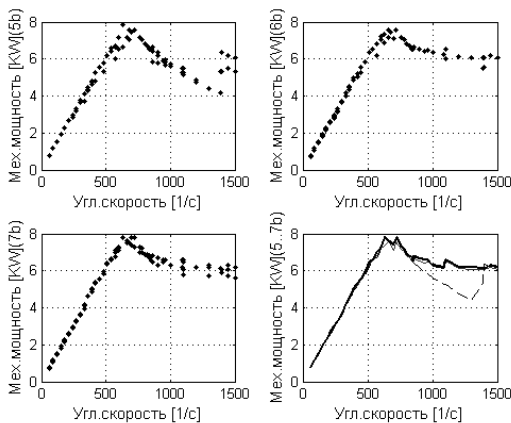


Рис. 14. Механическая мощность ВРД с 5, 6 и 7-битными энкодерами

Помимо рассмотренных случаев, когда основной целью считалось достижение высокого КПД (приоритетное требование) при значительной удельной механической или генерируемой мощности, производился подбор комбинаций Sh / Sq (иначе – генерация строк таблиц кодов управления) с приоритетным требованием высокой удельной мощности генерации при достаточно высоком КПД (см. рис. 15). При фиксированной скорости в области правее ω_{Pw} смена комбинаций Sh / Sq сопровождается немонотонным изменением мощности и КПД и для построения диаграмм отбирались локальные максимумы.

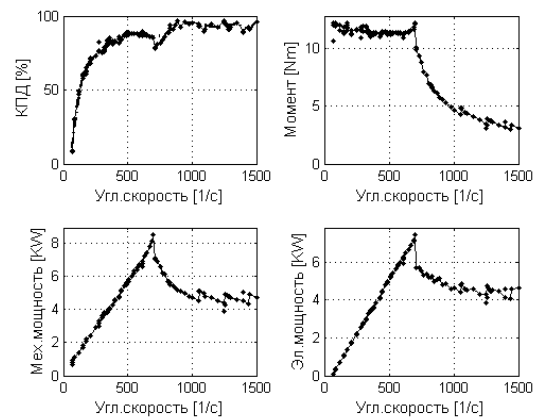


Рис. 15. Диаграммы основных параметров для ВРГ повышенной удельной мощности с 7-битным энкодером

Сравнительный анализ зависимостей на рис. 15 и 8 показывает возможность почти 15%-го повышения максимальной удельной мощности генерации. Однако этот рост наблюдается лишь до угловых скоростей не выше ω_{Pw} , к тому же с весьма заметным провалом в уровне КПД. Все показатели для скоростей выше ω_{Pw} оказываются очень близкими к аналогичным на рис. 8.

4. ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗНАЧЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Необходимость борьбы за улучшение экологического состояния окружающей среды способствует значительному росту интереса к альтернативным источникам энергии, например, ветровой или гидравлической на базе агрегатов малой мощности и все более широкому применению транспортных средств на основе электрического и гибридного привода. В большинстве подобных случаев одним из важных требований к электромоторам и генераторам является способность функционировать в широком диапазоне скоростей с высоким уровнем энергетической эффективности. Для ряда приложений,

прежде всего транспортных, важна и способность сохранять высокий уровень удельной мощности в широком диапазоне скоростей, а также простота достижения обратимости электромашин.

Результаты данной работы показывают, что при разумном выборе алгоритма управления и разрядности датчиков углового положения возможно эффективное использование ВРМ в широкой области угловых скоростей существенно выше уровня ω_{Pw} . При этом во всем «верхнем» диапазоне скоростей достижимый уровень КПД достаточно стабилен и может превышать 90% (см. рис. 9, 12).

Как было указано выше, в моделируемой ВРМ максимальная скорость доводилась до 1500 с^{-1} , а угловая скорость максимальной мощности составляла по оценке, сделанной с применением формулы (7), около 620 с^{-1} , при этом использовались следующие значения параметров: рабочее напряжение – 300 В; радиальный зазор – 1,5 мм; радиус ротора по уровню полюсов – 35 мм; аксиальная длина ротора/статора – 100 мм; пороговый ток ограничителя – 47 А; число витков в обмотке фазы – 84; масса железа (ротор/статор) – 8,2 кг; масса медных обмоток – 1,68 кг.

Все полученные результаты, разумеется, справедливы и для ВРМ с другими значениями ω_{Pw} , при условии подобия по соотношению $\omega_{\max} \cdot \omega_{Pw}^{-1}$. Соответственно, при необходимости проектирования некоторой системы на основе ВРМ с учетом конкретного рабочего диапазона угловых скоростей разумно для достижения высокой эффективности в большей части диапазона обеспечить подходящее значение ω_{Pw} , влияя на конструктивные параметры ВРМ. Кроме того, следует отметить, что при использовании четырехфазной ВРМ с конфигурациями 16/12 или 24/18 и т.д. реальная угловая скорость ротора падает, соответственно, в 2, 3 и т.д. раз в сравнении с разобранным случаем конфигурации 8/6, а момент в аналогичное число раз возрастает.

Серьезную проблему при работе на скоростях выше оборотов максимальной мощности может, на первый взгляд, представлять ступенчатый вид зависимости момента или мощности от угловой скорости (см. рис. 10, 15). Это обстоятельство не способствует удобству сопряжения ВРМ с остальными механическими компонентами системы. Однако реально все упомянутые графики иллюстрируют лишь области максимально возможных значений параметров. На практике, как момент, так и мощность легко

регулируются контроллером по принципу ШИМ. Фактически, при программном формировании на выходе управляющего порта микроконтроллера логических единиц для открывания силовых транзисторов они должны умножаться на цифровую последовательность с переменной скважностью или периодом. Тем самым в работе силовых транзисторов коммутатора ВРМ создаются регулируемые пропуски активности, что позволяет менять среднюю мощность или момент практически от 0 до максимальных значений. Упомянутая цифровая последовательность может генерироваться как чисто программно, так и с использованием встроенных в большинство современных контроллеров таймеров или контроллеров ШИМ. Подобный механизм управления практически не оказывает значительного негативного влияния на КПД устройства.

Роль разрядности датчика углового положения в достижении высоких показателей ВРМ в зоне больших угловых скоростей, выявленная в процессе моделирования, означает не только необходимость предъявлять повышенные требования к точности энкодера. В этом смысле реализация в составе ВРМ упоминавшегося 7-битного энкодера с шагом 28 угловых минут, по современным меркам, не представляет из себя особой проблемы. Гораздо существеннее то, что малый шаг приводит к необходимости более быстрой обработки в контроллере результатов считывания очередного кода угла. Так, при угловой скорости 1500 с^{-1} для ВРМ с 5-битным энкодером период обработки должен быть менее 21 мкс, в то время как для 6-битного энкодера – не более 10.5 мкс, а для 7-битного – лишь порядка 5 мкс! Алгоритм программы микроконтроллера ВРМ в качестве главного элемента содержит основной программный цикл. Рассмотрим в качестве примера 8-разрядный контроллер семейства PIC18F4620 компании Microchip с тактовой частотой 40 МГц. Производительность процессора при такой частоте составляет 10^7 команд в секунду, таким образом, для 5-битного энкодера основной программный цикл может содержать не более 210 команд. С учетом определенной архитектурной избыточности этого популярного и недорогого контроллера автором была предпринята попытка реализации основного программного цикла для одновременного управления четырьмя ВРМ с 5-битными энкодерами, формирующими на выходе относительно помехозащищенный код Грэя, считываемый в контроллер через мультиплексор. Табличная перекодировка из кода Грэя в нормальный позици-

онный также включена в указанный цикл. Определено, что написанный на языке ассемблера соответствующий фрагмент может выполняться за время от 140 до 198 командных циклов, в зависимости от условных переходов, определяемых кодами углового положения, скоростями вращения и иными меняющимися внешними параметрами. Таким образом, производительность контроллера почти вчетверо превосходит необходимую для управления одной ВРМ! Однако использование 6-битного энкодера снижает максимальное число ВРМ максимум до двух, а 7-битного – делает задачу управления почти невыполнимой и для одной ВРМ, по крайней мере, на максимальной скорости вращения. Тем не менее, во-первых, указанный микроконтроллер, по сегодняшним меркам, далеко не является лидером в части быстродействия, а во-вторых, скорость на уровне 1500 с^{-1} (14331 об./мин.) надо признать весьма высокой для большинства традиционных областей применения электромашин.

ВЫВОДЫ

Полученные в процессе проведенного исследования результаты позволяют сделать следующие выводы:

1. Высокая энергетическая эффективность ВРМ (как двигателя, так и генератора) с КПД близким к 90%, при достаточно стабильных уровнях мощности может поддерживаться на значительной части рабочего диапазона угловых скоростей при надлежащем выборе такого параметра, как угловая скорость максимальной мощности $\omega_{P_{\text{в}}}$.

2. В верхней части диапазона, т. е. на угловых скоростях выше $\omega_{P_{\text{в}}}$, для предотвращения насыщения элементов магнитопровода и последующего снижения КПД, необходимо в зависимости от скорости вращения ротора вводить программную коррекцию параметров импульсов управления транзисторного коммутатора ВРМ в сравнении с параметрами, определяемыми угловым перекрытием полюсов. Это связано с тем, что традиционные схемы токоограничения, основанные на отключении силовых транзисторов, не обеспечивают защиты от насыщения в данной части диапазона.

3. В верхней части диапазона достаточная плавность и непрерывность основных характеристик ВРМ (зависимость момента, мощности и т. д. от угловой скорости) обеспечивается только при повышенной разрядности углового энкодера и, как следствие, повышенном быстродействии управляющего контроллера. На скоростях нижней части диапазона разрядность энкодера практически не влияет на вид и качество характеристик.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Lawrenson P. A.** Variable-Speed switched reluctance motors // IEEE Proc. 1980. Vol. 127, No. 4. P. 184–190.
2. **Faiz Jawad, Moayed-Zadeh K.** Design of switched reluctance machine for starter/generator of hybrid electric vehicle // Electric Power Systems Research. 2005. Vol. 75, Issues 2–3. P. 153–160.
3. Control of c-dump converters fed switched reluctance motor on an automotive application / Tae-Won Lee [et al.] // Electric Power Systems Research. 2007. Vol. 77, Issue 7. P. 804–812.
4. Electromagnetic and motion-coupled analysis for switched reluctance motor based on reluctance network analysis / Kenji Nakamura, Koshiro Kimura and Osamu Ichinokura // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2005. Vol. 290–291, Part 2. P. 1309–1312.
5. Switched reluctance motor [Электронный ресурс]. [Дата последнего обновления: 26.02.2009] URL: <http://privod.net.ua/toppage10.htm> (дата обращения: 23.02.2010).
6. Математичне моделювання та комп'ютерне симулювання електромеханічних процесів у керуваному вентиляльному реактивному двигуні з буфером енергії / Ткачук В.І., Каша Л.В., Гайдук В.Г., Пелень Н.В. // Електротехніка і електромеханіка. 2003. № 1. С. 72–76.

ОБ АВТОРЕ

Гараев Рашит Аюпович, доц. каф. выч. техники и защиты информации. Дипл. инж.-физик по электронике и автоматике (МФТИ, 1979). Канд. физ.-мат. наук по радиофизике, включая квантовую радиофизику (МФТИ, 1983). Иссл. в обл. нелинейной оптики и спектроскопии, систем ввода графической информации и распознавания образов.