УДК 62-83::621.313.3

ОПТИМИЗАЦИЯ ЧИСЛА ФАЗ В ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ РЕГУЛИРУЕМЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДАХ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА*

А.Е. Бычков
г. Челябинск, ЮУрГУ

QUANTITY PHASE OPTIMIZATION IN THE ENERGY-SAVING AC DRIVES

A.E. Bychkov
Chelyabinsk, South Ural State University

Предложен метод оптимизации числа фаз в электроприводах переменного тока. Рассмотрены схемы силовых цепей вентильного преобразователя и двигателя для электропривода с шестифазным синхронным реактивным двигателем независимого возбуждения.

Ключевые слова: электропривод с синхронным реактивным двигателем независимого возбуждения, асинхронный электропривод, вентильный преобразователь

Quantity phase optimization method for the energy-saving ac electric drives is offered. The power circuit schemes of valve inverter and engine for electric drive with six phase separate excitation synchronous reluctance machine are considered.

Keywords: *electric drive with separate excitation synchronous reluctance machine, anisochronous electric drive, valve inverter.*

Введение. Удельные показатели электроприводов и, в первую очередь, момент на единицу массы является одним из основных факторов, улучшение которого способствует решению задачи ресурсосбережения. В рамках серийных электроприводов дальнейшее снижение массы будет трудно обеспечить при практически неизменном уровне энергетических показателей электропривода. Даже небольшой процент сокращения расхода активных материалов потребует серьёзных работ по усовершенствованию конструкции, технических свойств изоляционных и магнитных материалов.

Новый подход к разработке электроприводов требует учёта совместной работы вентильного преобразователя и двигателя, а следовательно, приходится иначе выбирать форму питающего напряжения и число фаз электрической машины.

Новые возможности вентильных преобразователей учитываются при проектировании электроприводов с традиционными конструкциями электрических машин. Так, в асинхронном электроприводе выбор номинальных частоты и напряжения, геометрии машины решаются с учётом новых обстоятельств [1].

Ниже предлагается метод оптимизации числа фаз в электроприводах переменного тока с целью улучшения удельных показателей. Обращается внимание на выбор схем силовых цепей электроприводов с шестифазным синхронным реактивным двигателем независимого возбуждения (СРДНВ).

Асинхронный электропривод. Современный асинхронный электропривод - это система, построенная по схеме «Преобразователь частоты инверторного типа - асинхронный двигатель».

Рассмотрим выражение для электромагнитного момента асинхронного двигателя, работающего в оптимальной точке (при напряжении, частоте и нагрузке, для которых спроектирован данный двигатель) [2]:

$$M = l_\delta D_a^2 A_\delta B_\delta k_в k_{об},$$

где l_δ, D_a - габаритные размеры активных материалов; A_δ, B_δ - электромагнитные нагрузки; $k_в$ - коэффициент формы поля.

Указанное уравнение устанавливает взаимосвязь между величиной номинального электромагнитного момента, массой активных материалов и электромагнитными нагрузками.

В этом уравнении необходимо обратить внимание на обмоточный коэффициент $k_{об}$, который

*Работа проводится в рамках реализации Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы по проблеме «Энергосберегающие электроприводы с синхронным реактивным двигателем независимого возбуждения» конкурс НК 516П.

вводится, чтобы учесть укорочение шага обмотки и её распределение. Укорочение шага и распределение обмотки позволяют снизить влияние высших гармоник, которые, как известно, в трёхфазной машине с синусоидальным возбуждением не создают электромагнитного момента. С другой стороны, укорочение и распределение обмотки приводит к снижению основной гармоники, что и учитывается обмоточным коэффициентом. В серийных асинхронных двигателях он лежит в диапазоне 0,9...0,95. Таким образом, обмоточный коэффициент показывает, насколько снижается электромагнитный момент по сравнению с m-фазной машиной, в которой ток, протекающий по обмоткам, был бы несинусоидальным, а число фаз стремилось бы к бесконечности. По сути, обмоточный коэффициент - это плата за «синусоидальное возбуждение».

Дальнейшее улучшение предельных возможностей асинхронного электропривода связано с улучшением конструкции машины и позволяет ещё в большей степени снизить влияние высших гармоник за счёт увеличения электромагнитных нагрузок. Однако предлагаемые варианты малоэффективны.

Электропривод с СРДНВ. Наибольший эффект при оптимизации числа фаз в электроприводах переменного тока из условия минимизации массогабаритных показателей может быть достигнут в электроприводе с СРДНВ. Основная идея работы электропривода следующая: если по части обмоток, находящихся над межполюсным промежутком, пропустить ток, то создаётся поток возбуждения, а по другой части обмоток, расположенных над полюсом, пропустить ток, то этот ток будет взаимодействовать с потоком возбуждения и, соответственно возникает электромагнитный момент [3, 4, 5]. Каждая из обмоток статора попеременно выполняет то роль возбуждения, то якоря. Принципиальным обстоятельством здесь является возможность независимого регулирования поля возбуждения и поля реакции якоря.

Для анализа предельных возможностей электропривода с СРДНВ на первом этапе предположим, что машина имеет бесконечное число фаз. Тогда СРДНВ будет аналогичен обращенной машине постоянного тока. Так же, как и в электроприводе постоянного тока, по обмоткам статора нет необходимости пропускать синусоидальный ток. В отличие от машин переменного тока с синусоидальным возбуждением, в электроприводе с СРДНВ гармонические составляющие поля возбуждения взаимодействуют и создают полезный момент. Причина этого явления заключается в постоянстве угла момента. По оценкам [6] высшие гармоники увеличивают развиваемый момент примерно на 23 %. Эта цифра показывает реальные резервные возможности нового типа электропривода.

Полезно дать физическое обоснование факту больших перегрузочных моментов рассматриваемого электродвигателя. С этой целью рассмотрим картину магнитных полей в машине постоянного тока и СРДНВ.

В электродвигателе постоянного тока на магнитное поле прямоугольной формы, создаваемое токами обмотки возбуждения, накладывается поле реакции якоря F_A (рис. 1), в результате под одним краем полюса индукция в зазоре увеличивается, а под другим - уменьшается.

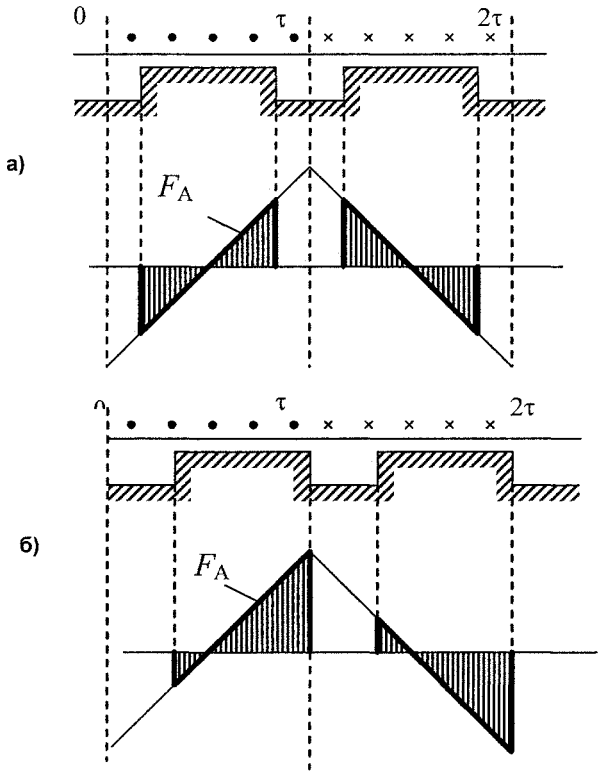

Рис. 1. Развертка машины и МДС реакции якоря: а – в двигателе постоянного тока; б – в СРМНВ

Строгое совпадение физической и геометрической нейтралей в двигателе постоянного тока приводит (при неучете насыщения магнитной системы) к равным величинам приращений магнитного потока под обоими краями полюса. В результате в ненасыщенной электрической машине постоянного тока увеличение тока якоря не вызывает увеличения магнитного потока.

В СРДНВ токи в проводниках обмоток, расположенных напротив межполюсного промежутка, одного знака, поэтому физическая нейтраль смещается на край полюса (см. рис. 1). Это возможно, так как в этом двигателе нет ограничений по условиям коммутации. В результате действие намагничивающей составляющей реакции якоря приходится на полюс, а размагничивающей - на межполюсный промежуток, т. е. в СРДНВ с ростом нагрузки происходит увеличение магнитного потока. Это позволяет добиться высоких удельных моментов, не применяя компенсационную обмот-

ку, сохраняя простую конструкцию электрической машины и не увеличивая расход обмоточной меди.

Возможность независимого управления потоком возбуждения позволяет получать в электроприводе предельные перегрузочные моменты, превышающие значения 5...6 номиналов [7].

Бесконечное число фаз двигателя потребует усложнения схемы силовых цепей вентильного преобразователя. Переход к конечному числу фаз электрической машины приводит к пульсациям электромагнитного момента. Чтобы учесть влияние пульсаций на величину момента, найдём связь между количеством фаз и уровнем пульсаций момента.

Среднее значение электромагнитного момента можно определить следующим образом (рис. 2):

$$M_{ср} = \frac{M_{ср1} \cdot b + M_{ср2} \cdot (1/m - b)}{1/m},$$

где $M_{ср1}$ - среднее значение момента на участке $0 - \alpha_b$ (длина участка в долях от полюсного деления равна b) моментной характеристики (характеристики машины в замкнутой системе), линейно возрастающей от некоторого минимального значения M_{min1}, которое будет определяться выбором угла переключения тока в фазе, до M_{max}, соответствующего амплитудному значению момента на угловой моментной характеристике; $M_{ср2}$ - среднее значение момента на участке $\alpha_b - \alpha_m$ (длина участка равна 1/m-b), который изменяется от M_{max} до M_{min2};

b - участок кривой в долях от полюсного деления, отсчитываемый от момента перехода с одной угловой характеристики на другую (при работе машины в замкнутой системе) до положения, соответствующего максимальному значению электромагнитного момента на угловой характеристике;

1/m - длина фазной зоны в долях от полюсного деления.

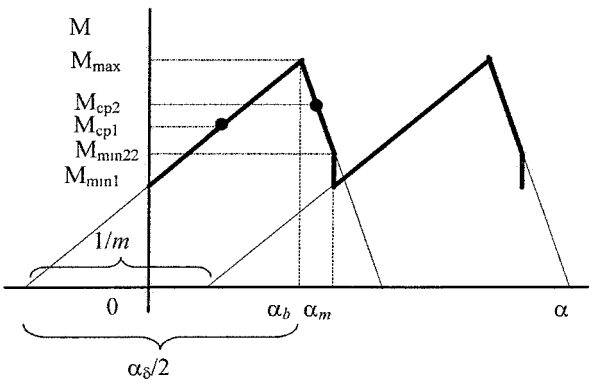

Рис. 2. Угловая характеристика СРДНВ при переключении тока в функции положения ротора, поясняющая определение коэффициента

Среднее значение электромагнитного момента на участке $0 - \alpha_b$

$$M_{ср1} = \frac{M_{min1} + M_{max}}{2} = M_{max} \cdot (1 - \frac{b}{\alpha_\delta}).$$

На участке $\alpha_b - \alpha_m$ среднее значение момента

$$M_{ср2} = \frac{M_{max} + M_{min2}}{2} = M_{max}\left(1 + \frac{b - 1/m}{1 - \alpha_\delta}\right).$$

Таким образом, среднее значение электромагнитного момента за период пульсаций

$$M = M_{max} \cdot \frac{m}{(1-\alpha_\delta)} \cdot \left(-\frac{b^2}{\alpha_\delta} + 2b\frac{1}{m} + \frac{1}{m} \cdot (1-\alpha_\delta) - \frac{1}{m^2}\right) =$$
$$= M_{max} \cdot k_{ср},$$

где коэффициентом $k_{ср}$ учитывается снижение среднего значения момента по сравнению с максимальным, связанное с конечным числом фаз. Очевидно, что при увеличении числа фаз $k_{ср}$ стремится к единице. Действительно, предел функции $k_{ср}=f(m)$ будет равен единице при условии, что *m* стремится к бесконечности и, следовательно, к нулю будет стремиться ограниченная функция $b = f(m)$.

Принимая критерием оптимизации максимум среднего значения момента, можно найти оптимальное значение угла начала коммутации тока в обмотке фазы. Функция $M = f(b)$ имеет экстремум (максимум), так как по виду зависимости она является квадратичной со знаком минус перед квадратом аргумента. Чтобы определить экстремум функции, найдём её производную и приравняем к нулю, тогда получим

$$b = \frac{1}{m} \cdot \alpha_\delta.$$

Анализ коэффициента пульсаций показывает, что при шести фазах удаётся значительно снизить уровень пульсаций (коэффициент $k_{ср} = 0{,}67$ для трёхфазной схемы $k_{ср} = 0{,}83$ - для шестифазной). При этом СРДНВ можно питать от двух стандартных трёхфазных автономных инвертора напряжения.

Современные электрические преобразователи выполняются на вентилях нового поколения: MOSFET (отличающиеся большим входным сопротивлением и предельным коммутируемым напряжением 500В), IGBT (высокое быстродействие, малое падение напряжения, выпускаемые на предельные напряжение 3,3 кВ и токи 1200 А) и, наконец, транзисторные модули, в которых собрано от одного до шести транзисторов с обратными диодами [3]. Средние цены IGBT транзисторов в зависимости от тока на различные уровни напряжения приведены на рис. 3.

Наиболее просто реализуется схема с индивидуальными источниками тока (ИИТ) на каждую фазу (рис. 4). Такие системы могут выполняться с симметричным или несимметричным управлением вентилями. Недостатком схемы является большое суммарное число ключей 4*m* (где *m* - число фаз СРДНВ).

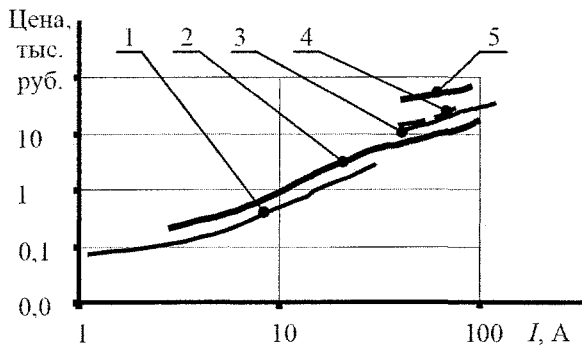

Рис. 3. Стоимость силовых ключей (IGBT) в функции тока для различных классов напряжений: 1 – 600 В; 2 – 1,2 кВ; 3 – 1,7 кВ; 4 – 2,5 кВ; 5 – 4,5 кВ

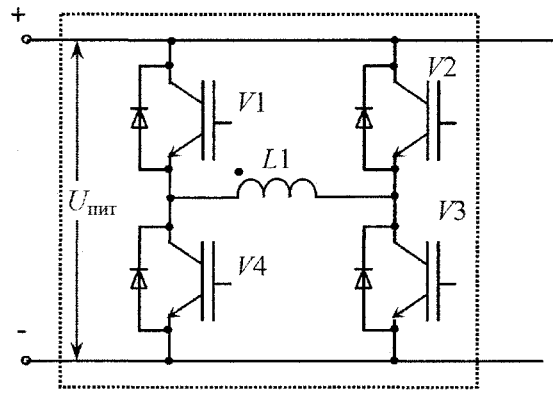

Рис. 4. Мостовая схема, питания фазы СРДНВ

С учётом возможностей серийных трёхфазных инверторов напряжения (ИН) целесообразно рассматривать вариант электропривода, в котором статорные обмотки собраны в две трёхфазные звезды, сдвинутые на 30 электрических градусов друг относительно друга (рис. 5). Схема требует двух трёхфазных инверторов: ИН1 и ИН2. В электроприводах малой и средней мощности она выгоднее схемы (см. рис. 4) меньшим числом ключей. В электроприводах большой мощности она является наиболее естественной, так как не требует параллельного соединения ключей при больших токах.

Как показали оптимизационные расчёты электропривода с СРДНВ для разных вариантов схем силовых цепей статора, наименьший по габаритам электродвигатель при заданном номинальном моменте получается в схеме (рис. 4) при прямоугольной форме фазных токов. В схеме (рис. 5) электрический преобразователь, выполненный на стандартных ИН имеет меньшее число ключей, но габарит электродвигателя из-за невозможности иметь прямоугольную форму фазных токов получается на 12 % больше.

В электроприводах и электрогенераторах, работающих в сетях с пониженным напряжением, заслуживают внимания варианты нулевых схем силовых цепей статора, т.к. в отличие от мостовых здесь нет двойного падения напряжения на вентилях и при том же количестве ключей можно получить двойной ток.

По данным дилеров ряда отечественных и зарубежных фирм, выпускающих серийное электрооборудование, были рассчитаны и сопоставлены затраты на электропривод с СРДНВ для разных вариантов силовых схем (рис. 6). Анализ приведенных кривых показывает, что схемы с инверторами напряжений (рис. 6, кривая 2) оказываются вполне конкурентоспособными в диапазоне средних мощностей (от 10 до 100 кВт). При мощностях более P=100 кВт относительная разница цен схемы с индивидуальными источниками питания и с инверторами напряжения выравнивается. Здесь схема с индивидуальными источниками питания оказывается наиболее естественной, из-за высокой надёжности электропривода.

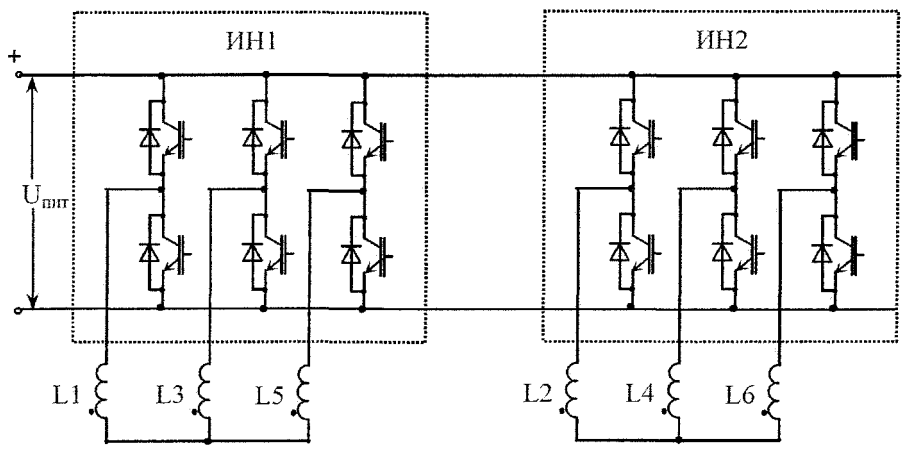

Рис. 5. Схема с двумя мостовыми инверторами

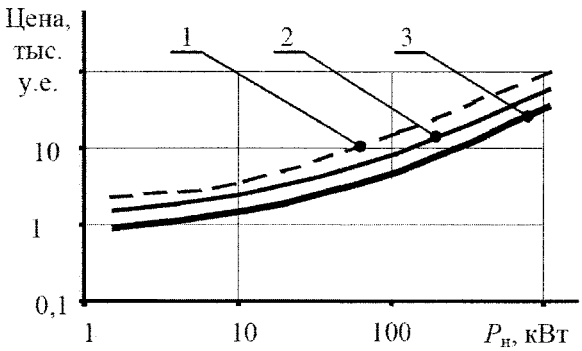

Рис. 6. Стоимость электрических преобразователей при различных схемах силовых цепей СРДНВ: 1 – ИИТ; 2 – ИН; 3 – ИН модульного исполнения

Рассмотрение представленных схем силовых цепей показывает, что в схемах с СРДНВ вполне эффективно могут найти применение схемы со стандартным инвертором напряжения. В схемах же с пониженным напряжением постоянного тока (бортовые сети подвижных установок) выгоднее гальванически разделять цепи возбуждения и силовые цепи [8].

Литература

1. Беспалов, В.Я. Перспективы создания отечественных электродвигателей нового поколения для частотнорегулируемого электропривода / В.Я. Беспалов // Труды IV Международной (XV Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу «Автоматизированный электропривод в XXI веке: пути развития. - Магнитогорск: ИПЦ «Новая типография», 2004. — 4.1.-С. 24-31.

2. Проектирование электрических машин / И.П. Копылов, Б.К. Клоков, В.П. Морозкин, Б.Ф. Токарев; под ред. И.П. Копылова. - 2-е изд. — М.: Энергоатомиздат, 1993. - 464 с.

3. Григорьев, М.А. Предельные возможности электроприводов с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения /М.А. Григорьев // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». — 2009. - Вып. 12. -№ 34(167). - С. 51-55.

4. Удельные показатели электропривода с синхронным реактивным двигателем независимого возбуждения / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, К.М. Виноградов, А.Н. Горожанкин // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». — 2008. - Вып. 9. - №11(111). -С. 52-53.

5. Усынин, Ю.С. Электроприводы и генераторы с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения /Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, К.М. Виноградов // Электричество. — № 3. - 2007. - С. 21-26.

6. Шмитц, Н. Введение в электромеханику / пер. с англ. Н. Шмитц, Д. Новотный. — М.: Энергия, 1969. - 366 с.

7. Григорьев, М.А. Физические основы теории электропривода с синхронным реактивным двигателем независимого возбуждения // Электротехнические системы и комплексы: межвуз. сб. науч. тр. — Магнитогорск: Изд-во МГТУ, 2002. - Вып. 7. - С. 52-60.

8. Качалов, А.В. Синхронизация систем импульсно-фазового управления вентильных преобразователей на базе интегрирующего развёртывающего преобразователя / А.В. Качалов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». - 2010. - Вып. 13. -№ 14(190). - С. 40-46.

Поступила в редакцию 14.09.2010 г.

Бычков Антон Евгеньевич. Аспирант кафедры электропривода, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск. 454080, Челябинск, пр. Ленина, 76. Контактный телефон: +7 (351) 267-93-21.

Anton Evgenievich Bychkov is a postgraduate student of South Ural State University, Chelyabinsk, 76 Lenin Prospect, 454080. Phone: +7 (351) 267-93-21.