

УДЕЛЬНЫЕ МАССОГАБАРИТНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ*

М.А. Григорьев

В статье рассматриваются удельные массогабаритные показатели разных типов электроприводов и пути их улучшения. Для сопоставления удельных показателей синхронных двигателей с возбуждением от постоянных магнитов был выбран критерий минимума суммарных потерь, который ранее предлагался профессором Вагати. Удобство этого критерия состоит в том, что он позволяет, не прибегая к сложным электромагнитным расчетам, выбирать оптимальное значение номинальной скорости. Для сопоставления удельных показателей классического асинхронного электропривода было выбрано выражение электромагнитного момента, предложенное профессором Копыловым для классических электрических машин. Уравнение, устанавливающее связь между электромагнитным моментом и геометрическими параметрами электрической машины, позволило выделить «слабые» звенья в асинхронном двигателе и объяснить его предельные показатели. В электроприводе с синхронным реактивным двигателем независимого возбуждения обращается внимание на возможность создания электромагнитного момента высшими гармониками тока. Показано, что проектируя электрические машины с учетом особенностей совместной работы полупроводникового преобразователя и двигателя, можно улучшить удельные показатели электропривода до 30 %. В работе отмечается, что применение новых подходов способствует расширению перегрузочной способности электропривода, а следовательно, его применению на объектах с тяжелыми и сверхтяжелыми условиями эксплуатации.

Ключевые слова: удельные показатели; электропривод с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения; асинхронный электропривод; перегрузочная способность.

Введение. Неоспоримо, что с целью экономии электроэнергии полезно увеличивать КПД электроустановки или улучшать удельные массогабаритные показатели электропривода. Вместе с тем при переходе к практической реализации этого условия взгляд на решение задачи очень усложняется. Возможны различные технические варианты относительно типов двигателей, системы управления, преобразователей мощности и т. д. Каждое техническое решение должно быть доказано с точки зрения величины стоимости и подчиняться некоторым новым стандартам [1–4].

КПД и удельный вращающий момент. Прежде чем обсудить каждое конкретное решение, сформулируем некоторые общие моменты [5–8]. КПД двигателя определяется отношением выходной (механической мощности) к входной электрической мощности [5]:

$$\eta = \frac{\omega_B}{\omega_B + P/M};$$

$$M = M(\omega_B). \quad (1)$$

В уравнении (1) КПД η представлен как функция скорости вала ω_B , вращающего момента M и суммарных потерь мощности P . Вращающий момент M , в свою очередь, зависит от скорости ω_B , уменьшаясь, когда увеличивается скорость. Поэтому прежде чем сравнивать эффективность двух типов двигателей, надо зафиксировать ско-

рость вала. Следует также помнить на практике, что необходимо оптимизировать систему в целом, а не только двигатель, поэтому первым шагом в улучшении эффективности конкретной системы следует считать правильность принятой скорости вала.

В тех случаях, когда номинальная величина скорости ω_N задана техническими условиями, максимум эффективности работы электропривода, оцениваемой величиной КПД, эквивалентен максимуму вращающего момента M при допустимой величине рассеиваемой мощности M/P . Рассеивание мощности приблизительно может быть выражено величиной, пропорциональной внешней поверхности двигателя $2 \cdot \pi \cdot R \cdot l$, где l представляет активную длину двигателя, а коэффициент k_i соответствует удельному рассеиванию мощности (Ватт/м²), что отражено в уравнении:

$$P = k_i \cdot 2 \cdot \pi \cdot R \cdot l. \quad (2)$$

В зависимости от принятого способа охлаждения (естественное, обдув, водяное и т. д.) максимальная величина k_i определяется через допустимое превышение температуры. Как только R и l установлены, может быть определен активный объем двигателя. Таким образом, выбор k_i имеет отношение как к активному объему двигателя $\pi \cdot R^2 \cdot l$, так и к допустимому рассеиванию P , на что указывает следующее уравнение:

* Работа выполняется при финансовой поддержке гранта Президента РФ (Соглашение № 16.120.11.6780-МК от 01 февраля 2012).

$$\frac{P}{V} = \frac{2 \cdot k_i}{R}. \quad (3)$$

При увеличении R вращающий момент увеличивается очень быстро [8]. По сравнению с прототипом, который соответствует исходным параметрам (k_{i0}, R_0, P_0, M_0) , тот же вращающий момент M может быть получен при более низком k_i (например, $0,5 \cdot k_{i0}$), что достигается небольшим приращением внешнего радиуса (например, $1,15 \cdot R_0$). Следовательно, потери мощности снижаются почти на 60 %, тогда как КПД повышается согласно уравнению (1). При этом удельный момент (вращающий момент/объем) уменьшается в этом случае почти на 75 %. В итоге при заданном вращающем моменте и скорости лучший КПД может получаться простым снижением удельного вращающего момента. На практике таким путем (увеличенными затратами на медь и железо) идти неэкономично: следует помнить, что в этом случае больше энергии затрачено, например, в производственном процессе. По этой причине пренебрегать величиной удельного вращающего момента не следует, надо ценить этот показатель.

Второе важное следствие – сравнение разных двигателей по КПД должно выполняться при равных внешних размерах, в противном случае могут быть получены неправильные результаты. С другой стороны, только выбором M/P можно улучшить как вращающийся момент, так и КПД.

Бесконтактный синхронный двигатель с постоянными магнитами. Этот тип двигателя появился в начале 80-х на рынке сервоприводов. В отличие от двигателя постоянного тока он обычно именовался бесконтактным двигателем постоянного тока. Наиболее часто встречается конструкция двигателя, когда постоянные магниты размещаются на поверхности ротора.

В быстродействующих электроприводах наиболее часто используются два способа управления: векторное управление с синусоидальной ЭДС и скалярное управление с трапецевидной ЭДС. В обоих случаях требуется коммутируемый инвертор. Наиболее заметно преимущества бесщеточного двигателя проявляются при идеальном питании, каким является векторное токовое управление. Кратные трем гармоники допускаются в распределении фазовых обмоток и в кривой индукции в воздушном зазоре. Их присутствие увеличивает первую гармонику в кривой магнитного потока. Реализация нужной формы фазного тока может быть достигнута в полупроводниковых преобразователях, предложенных в [9–11].

Магниты на поверхности ротора размещены, как показано схематически на рис. 1. Отсутствие потерь на возбуждение, относительная свобода их расположения на роторе способствуют повышению отношения M/P .

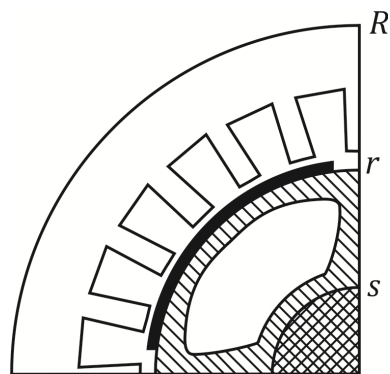


Рис. 1. Схематический разрез бесконтактного синхронного двигателя с постоянными магнитами (см. [5])

Анализ основных компонентов состояния электромагнитной системы двигателя с целью достижения оптимума КПД и удельного момента можно выполнить, пользуясь следующими соотношениями [5]:

$$\Psi_{md} = \frac{\pi \cdot r \cdot l \cdot N}{\sqrt{3} \cdot p} \cdot B_{pl};$$

$$B_{pl} = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot B_p; \quad (4)$$

$$M = \frac{3}{2} \cdot p \cdot \Psi_{md} \cdot i_{sq}, \quad (5)$$

где Ψ_{md} – потокосцепление, пропорциональное максимальной магнитной индукции воздушного зазора B_{pl} (первой гармоники);

N – число витков на фазу;

r – радиус зазора;

p – число пар полюсов.

На рис. 1 показан схематический разрез бесконтактного синхронного двигателя с постоянными магнитами. Магнитная индукция воздушного зазора B_p зависит от типа B_r и длины магнитов l_m (изменение МДС в железе учтено).

С другой стороны, так как редкоземельные магниты очень дорогие, их объем должен быть ограничен. Следовательно, в фиксированном объеме магнита длина магнита l_m становится функцией радиуса ротора r . Отношение внутреннего диаметра к внешнему определяется коэффициентом

$$x = \frac{r}{R}.$$

Потокосцепление Ψ_{md} будет функцией x

$$\Psi_{md}(x) = x \cdot B_p(x). \quad (6)$$

Мощность рассеяния P включает тепловые потери и потери в стали сердечника

$$P - P_{fe} = \frac{3}{2} \cdot R_s \cdot i_{sq}^2;$$

$$R_s = A_s^{-1}(x). \quad (7)$$

Сопротивление фазы R_s обратно пропорционально площади паза S .

С другой стороны, потери в стали сердечника P_{fe} могут быть определены по формуле:

$$P_{fe}(x) = h(\omega) \cdot B_y^2 \cdot V_s(x), \quad (8)$$

где $h(\omega)$ – коэффициент, который представляет собой «потери/объем» при индукции 1 Тл и зависит от электрической скорости $\omega = p \cdot \omega_B$. Номинальный ток i_{sg} зависит от x через потери в сердечнике и площадь паза:

$$i_{sg} = \sqrt{P - P_{fe}(x) \cdot \sqrt{A_s(x)}}. \quad (9)$$

Из (6) и (9) вращающий момент является функцией x , оптимальная величина которого дает максимальный вращающийся момент и, следовательно, КПД.

В [5] качестве примера рассчитаны зависимости от параметра x величины момента двигателя при следующих условиях: угловой скорости вала $\omega_B = 2000$ об/мин, частоте на статоре 50 Гц, потерях в железе 2,5 Ватт/кг, удельной мощности рассеивания $k_i = 4000$ Ватт/м² при температурном перегреве 100 °С, естественном охлаждении двигателя, материале магнитов NdFeB. Эти зависимости представлены на рис. 2. Кривые рис. 2 имеют максимумы, которые зависят от числа пар полюсов. Лучшие результаты у автора достигнуты при $p = 3$ и $p = 4$.

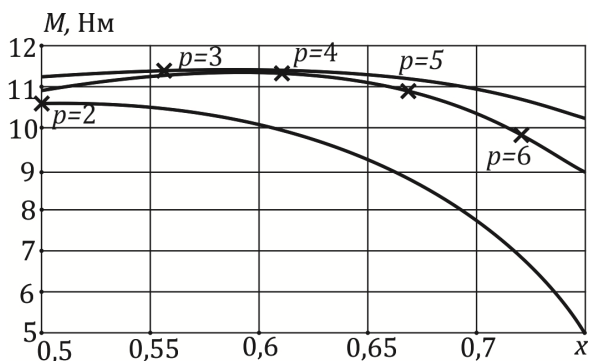


Рис. 2. Зависимость величины момента двигателя от x при $\omega_B = 2000$ об/мин, материал магнитов NdFeB

Асинхронный электропривод. Современный асинхронный электропривод – это система, построенная по схеме «Преобразователь частоты инверторного типа – асинхронный двигатель». Для обеспечения широкого диапазона регулирования используется векторное управление координатами. В современных электроприводах зависимость момента от тока статора является приближённо одинаковой во всём диапазоне уставок задания скорости. Совершенствование конструкции асинхронных электрических машин идёт по пути адаптации асинхронных двигателей к преобразователю частоты [4]. В последнее время улучшать удельные показатели асинхронных электроприводов становится сложнее. Эти показатели достигаются за счет улучшенных характеристик электроизоляционных материалов.

Рассмотрим выражение для электромагнитного момента асинхронного двигателя, работающего в оптимальной точке (при номинальных напряжениях, частоте и нагрузке) [8]:

$$M = I_\delta D_a^2 A_\delta B_\delta k_B k_{об},$$

где I_δ , D_a – габаритные размеры активных материалов; A_δ , B_δ – электромагнитные нагрузки; k_B – коэффициент формы поля.

В этом уравнении обмоточный коэффициент $k_{об}$ вводится для того, 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. Таким образом, обмоточный коэффициент – это плата за «синусоидальное возбуждение» [1–3, 8].

Дальнейшее улучшение предельных возможностей асинхронного электропривода связано с улучшением конструкции машины, позволяющим ещё в большей степени снизить влияние высших гармоник за счёт увеличения электромагнитных нагрузок.

Синхронная реактивная машина независимого возбуждения (СРМНВ). Для анализа предельных возможностей электропривода с СРМНВ [12–16] на первом этапе предположим, что машина имеет бесконечное число фаз. В этом случае СРМНВ аналогична обращённой 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 СРМНВ гармонические составляющие поля возбуждения взаимодействуют и создают полезный момент. Причина этого явления заключается в постоянстве угла момента. По оценкам [8, 17], 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 СРМНВ.

Возможность независимого управления потоком возбуждения позволяет получать в электроприводе предельные перегрузочные моменты, превышающие значения 5–6 номиналов [16].

Бесконечное число фаз двигателя потребует усложнения схемы силовых цепей полупроводникового преобразователя. Переход к конечному числу фаз электрической машины приводит к пульсациям электромагнитного момента. Чтобы учесть влияние пульсаций на величину момента, в [1, 3] установлена зависимость схем силовых цепей от числа фаз.

Параметрическая оптимизация электроприводов с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения, которая включала в себя выбор оптимального соотношения геометрических размеров машины, схем силовых цепей [2], позволяет улучшить массогабаритные показатели на 10–15 %.

При синтезе законов управления приходится учитывать, что оптимальная форма линейной плотности поверхностного тока имеет прямоугольную форму. В случае многофазной схемы система управления электроприводом может рассматриваться как многоканальная система управления, аналогичная электроприводу постоянного тока [19–23].

Рассмотренные преимущества могут быть получены при использовании возможностей систем автоматики, которые достигнуты в последнее время [24–27].

Заключение. Обзор технической литературы показал, что за счет учета совместной работы полупроводникового преобразователя и электрической машины удается улучшить удельные массогабаритные показатели на (10–20) %.

С другой стороны, если проектировать электрическую машину совместно с полупроводниковым преобразователем и отказаться от синусоидального возбуждения, можно также улучшить удельные показатели. Например, в электроприводе с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения в многофазной схеме оптимальной оказывается прямоугольная форма тока.

Рассмотренные в статье электроприводы могут быть рекомендованы для объектов с тяжелыми с сверхтяжелыми условиями эксплуатации, где актуальны высокие перегрузочные моменты и улучшенные удельные показатели [21].

Существуют технологические объекты производственных механизмов с умеренными показателями регулирования, где электроприводы с СРМНВ могут успешно эксплуатироваться [28, 29].

Литература

1. 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.

2. *Параметрическая оптимизация частотнорегулируемых электроприводов* / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, А.Н. Шишков и др. // *Вестник*

ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2012. – Вып. 18. – № 37(296). – С. 30–33.

3. *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.

4. Попов, В.И. *Современные асинхронные электрические машины: Новая Российская серия RA* / В.И. Попов, Т.А. Ахунов, Л.Н. Макаров. – М.: Изд-во «Знак», 1999. – 256 с.

5. Vagati, A. *Advanced Motor Technologies: Synchronous Motors and Drives* / A. Vagati. // *Intelligent Motion*. – 1993. – P. 223–247.

6. *The Losses in Control Electric Drives of Transport Mechanisms at Different Controlled Laws* / Yu.S. Usinin, M.A. Grigorjev, A.N. Shishkov, A. Bychkov, S.P. Gladyshev // *SAE Paper 2011-01-0039, SAE 2011 World Congress, Detroit, MI, April 12-14, 2011*. – 6 p.

7. *Потери в регулируемых электроприводах при разных законах управления* / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, А.Н. Шишков и др. // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика»*. – 2010. – Вып. 13. – № 14(190). – С. 47–51.

8. *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.

9. Дудкин, М.М. *Однофазные обратимые преобразователи напряжений для улучшения качества электрической энергии в сетях ограниченной мощности* / М.М. Дудкин // *Практическая силовая электроника*. – 2012. – № 2 (46). – С. 19–27.

10. Дудкин, М.М. *Динамические спектральные характеристики развертывающих преобразователей с широтно-импульсной модуляцией* / М.М. Дудкин, Л.И. Цытович, О.Г. Брылина // *Практическая силовая электроника*. – 2012. – № 4 (48). – С. 49–55.

11. *Интегрирующие развертывающие преобразователи с повышенной температурной стабильностью характеристик* / Л.И. Цытович, М.М. Дудкин, А.В. Качалов и др. // *Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика*. – 2010. – № 10. – С. 38–43.

12. Пат. 2346376 Российская Федерация, МПК Н 02 К 19/24. *Синхронная реактивная машина* / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, К.М. Виноградов, А.Н. Горожанкин, С.А. Чупин – № 2007126685; заявл. 12.07.2007; опубл. 10.02.2009, Бюл. № 4.

13. Law, J.D. *Design and Performance of Field Regulated Reluctance Machine* / J.D. Law, A. Chertok, T.A. Lipo // *IEEE Trans. on Industry Applications*. – 1994. – № 5. – P. 1185–1193.

14. Усынин, Ю.С. *Электроприводы и генераторы с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения* / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев

- ев, К.М. Виноградов // *Электричество*. – 2007. – № 3. – С. 21–26.
15. Пат. 2240640 Российская Федерация, МПК H 02 G 1/02. Синхронный реактивный генератор автономной энергетической установки и способ управления им / Ю.С. Усынин, С.М. Бутаков, М.А. Григорьев, К.М. Виноградов. – № 2003118611/09; заявл. 20.06.03; опубл. 20.11.04, Бюл. № 32.
16. Электропривод с синхронным реактивным двигателем независимого возбуждения / Ю.С. Усынин, Н.Д. Монюшко, Г.В. Караваев, М.А. Григорьев // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика»*. – 2001. – Вып. 1. – № 4(4) – С. 70–76.
17. Григорьев, М.А. Линейная плотность поверхностного тока в энергосберегающих электроприводах с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения / М.А. Григорьев, А.Е. Бычков // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика»*. – 2010. – Вып. 14. – № 32(208). – С. 46 – 51.
18. Развитие частотных методов синтеза электроприводов с синхронными электрическими машинами / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, А.Н. Шишков и др. // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика»*. – 2011. – Вып. 16. – № 34(251). – С. 21–27.
19. Усынин, Ю.С. Вентильный электропривод с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, А.Н. Шишков // *Электротехника*. – 2013. – № 3. – С. 37–43.
20. Усынин, Ю.С. Частотные характеристики канала регулирования момента в синхронных электроприводах / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, А.Н. Шишков // *Электричество*. – 2012. – № 4. – С. 54–59.
21. Электроприводы с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения для станов холодной прокатки труб / Ю.С. Усынин, С.П. Лохов, М.А. Григорьев, Е.В. Белоусов // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика»*. – 2012. – Вып. 17. – № 16(275). – С. 107–110.
22. Пат. 2422972 Российская Федерация. Синхронная реактивная машина / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, К.М. Виноградов, А.Н. Горожанкин, А.Н. Шишков, А.Е. Бычков, А.В. Валов. – Заявл. 17.12.2009.
23. Синтез системы управления электроприводом с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, А.Н. Шишков и др. // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика»*. – 2012. – Вып. 18. – № 37(296). – С. 38–41.
24. Адаптивная интервало-кодовая двоично-десятичная интегрирующая синхронизация систем управления силовыми вентильными преобразователями / Л.И. Цытович, О.Г. Брылина, М.М. Дудкин, Р.М. Рахматулин // *Электротехника*. – 2013. – № 3. – С. 8–15.
25. О новом принципе интегрирующего аналого-цифрового преобразования с бестактовым поразрядным уравниванием / С.П. Лохов, Л.И. Цытович, М.М. Дудкин и др. // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика»*. – 2012. – Вып. 18. – № 37 (296). – С. 97–106.
26. Система регулирования температуры и непрерывного контроля сопротивления изоляции электротехнических изделий в процессе их термической обработки / Л.И. Цытович, Р.М. Рахматулин, О.Г. Брылина и др. // *Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика*. – 2012. – № 8. – С. 45–50.
27. Реверсивный тиристорный преобразователь для систем управления с питанием от сети с нестационарными параметрами / Л.И. Цытович, Р.М. Рахматулин, М.М. Дудкин, А.В. Качалов // *Практическая силовая электроника*. – 2009. – № 2 (34). – С. 35–41.
28. Энергосбережение в электроприводах тягодутьевых механизмов многосвязных объектов / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, А.Н. Шишков и др. // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика»*. – 2011. – Вып. 15. – № 15(232). – С. 40–45.
29. Пат. 2408973 Российская Федерация, МПК H02P027/05. Асинхронный электропривод с фазным ротором / Ю.С. Усынин, А.В. Валов, Т.А. Козина, М.А. Григорьев, К.М. Виноградов, А.Н. Горожанкин, А.Н. Шишков, А.Е. Бычков. – № 2009148035/07; заявл. 23.12.2009.

Григорьев Максим Анатольевич, кандидат технических наук, доцент, кафедра «Электропривод и автоматизация промышленных установок», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, тел.: +7(351) 223-67-13.

Specific Weight-Dimension Factors of the Electric Drives

M.A. Grigorev, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

The Specific weight-dimension factors of the different types of electric drives and the ways to improve them are considered. To compare the specific parameters of synchronous motors with permanent magnets the minimum total losses criterion, previously proposed by Professor Vagati, was chosen. The convenience of this method is that it allows you, without resorting to complicated electromagnetic calculations to choose the optimum value of the rated speed. To compare the specific parameters of the classical asynchronous drives the electromagnetic torque expression, proposed by Professor Kopylov for classical electrical machines, was selected. The equation, which shows the relations between the electromagnetic torque and the geometric parameters of the motor, allows identifying «weak» links in the induction motor and explain its limit values. The author shows the ability of creation the torque in the field regulated reluctance machine by the higher harmonic of the current. It is shown that designing electrical machines with considering the peculiarities of the semiconductor inverter and motor cooperation it is possible to improve the specific indicators up to 30%. The paper notes that applying new approaches can increase the overload capacity of the drive, and hence its use at sites with heavy and extra-heavy operating conditions

Keywords: specific indicators, electric drive with the field regulated reluctance machine, asynchronous drives, overload capacity.

References

1. Grigorev M.A. Limiting Capabilities of Electric Drive with the Field Regulated Reluctance Machine, *Bulletin of the South Ural State University. Series "Power Engineering"*, 2009, no. 34 (167), pp. 51–55.
2. Usynin U.S., Grigorev M.A., Shishkov A.N. Parametric Optimization of Speed-Controlled Electric Drives, *Bulletin of the South Ural State University. Series "Power Engineering"*, 2012., no.37 (296), pp. 30–33.
3. Usynin U.S., Grigorev M.A., Vinogradov K.M., Gorozhankin A.N. Specific Indicators of the Electric Drive with The Field Regulated Reluctance Machine, *Bulletin of the South Ural State University. Series "Power Engineering"*, 2008, no. 11 (111), pp. 52–53.
4. Popov V.I., Akhunov T.A., Macarov L.N. Modern Asynchronous Electric Drives: The new Russian Series RA. [Sovremennyye asinkhronnyye elektricheskiye mashiny: Novaya Rossiyskaya seriya RA] Moscow, 1999. 256 p.
5. Vagati A. Advanced Motor Technologies: Synchronous Motors and Drives Intelligent Motion. 1993. pp. 223 - 247.
6. Usinin U.S., Grigoryev M.A., Shishkov A.N., Bychkov A.E., Gladyshev S.P, The Losses in Control Electric Drives of Transport Mechanisms at Different Controlled Laws, The book: SAE 2011 World Congress and Exhibition Detroit, MI, 2011.
7. Usynin U.S., Grigorev M.A., Shishkov A.N., Gorozhankin A.N. Losses in the Regulated Electric Drive for Different Control Laws, *Bulletin of the South Ural State University. Series "Power Engineering"*, 2010, no. 14 (190), pp. 47–51.
8. Kopylov I.P., Klovov B.K., Morozkin V.P., Tokarev B.F. Design of Electrical Machines [Proyektirovaniye elektricheskikh mashin]. Moscow, 1993. pp. 464.
9. Dudkin M.M. Single-phase Reversible Voltage Converter for Electrical Energy Quality Improvement in Restricted Power Electronic Mains [Odnofaznye obratimye preobrazovateli napryazheniya dlya ulucheniya kachestva elektricheskoi energii v setyakh ogranichennoy moshchnosti]. *Prakticheskaya silovaya elektronika [Practical Power Electronics]*, 2012, no.2 (46), pp. 19–27.
10. Dudkin M.M., Tsytoovich L.I., Brylina O.G. Dynamic Spectral Performances of Sweep Converters with Pulse-Width Modulation [Dinamicheskie spektralnye kharakteristiki razvertyvayushchikh preobrazovatelei s shirotno-impulsnoy modulyatsiyey]. *Prakticheskaya silovaya elektronika [Practical Power Electronics]*, 2012, no.4 (48), pp. 49–55.
11. Tsytoovich L.I., Dudkin M.M., Kachalov A.V., Tereshchina O.G., Loginova N.A. Integrating Sweep Converters with Heightened Temperature Stability of Performances [Integriruyushchie razvertyvayushchie preobrazovateli s povyshennoy temperaturnoy stabilnostyu kharakteristikami] *Pribory i sistemy. Ypravlenie, control, diagnostika [Devices and Systems. Control, Monitoring, Diagnostics]*, 2010, no.10, pp. 38–43.
12. Usynin U.S., Grigorev M.A., Vinogradov K.M., Gorozhankin A.N., Chupin S.A. Synchronous Reluctance Machine [Sinkhronnaya reaktivnaya mashina], patent 2346376, 2007.

13. Law J.D., Chertok A., Lipo T.A, Design and Performance of Field Regulated Reluctance Machine.. *IEEE Trans. on Industry Applications*, 1994, no 5. pp. 1185–1193.
14. Usynin U.S., Grigorev M.A., Vinogradov K.M. Electric Drives and Generators with the Field Regulated Reluctance Machine, *Electrical Technology Russia*, 2007, no. 3, pp. 21–26.
15. Usynin U.S., Butakov S.M., Grigorev M.A., K.M. Vinogradov Synchronous Reluctance Generator of off-line Power Installation and Method for Controlling it [Sinkhronnyy reaktivnyy generator avtonomnoy energeticheskoy ustanovki i sposob upravleniya im]. Patent 2240640, Russian Federation.
16. Usynin U.S., Moniuszko N.D., Karavaev G.V., Grigorev M.A. The Electric Drive with the Field Regulated Reluctance Machine, *Bulletin of the South Ural State University. Series "Power Engineering"*. 2001, no. 4 (4), pp. 70–76.
17. Grigorev M.A. Bychkov A.E. The Linear Density of the Surface Current in the Energy-saving Motor Drives with the Field Regulated Reluctance Machine, *Bulletin of the South Ural State University. Series "Power Engineering"*, 2010. no. 32 (208), pp. 46–51.
18. Usynin U.S., Grigorev M.A., Shishkov A.N., Bychkov A.E., Belousov E.V. The Development of Methods for the Synthesis of Frequency Drives with Synchronous Machines, *Bulletin of the South Ural State University. Series "Power Engineering"*, 2011, no. 34 (251), pp. 21–27.
19. Usynin U.S., Grigorev M.A., Shishkov A.N. Electric Drive with the Field Regulated Reluctance Machine, *Russian Electrical Engineering*, 2013, no. 3, pp. 37–43.
20. Usynin U.S., Grigorev M.A., Shishkov A.N. The Frequency Response of the Torque Control Channel in Synchronous Electric Drive, *Electrical Technology Russia*, 2012, no 4, pp. 54–59.
21. Usynin U.S., Lokhov S.P., Grigorev M.A., Belousov E.V. Electric Drives with the Field Regulated Reluctance Machine for Cold Rolling Tube Mill, *Bulletin of the South Ural State University. Series "Power Engineering"*, 2012. no. 16 (275), pp. 107–110.
22. Usynin U.S., Grigorev M.A., Vinogradov K.M., Gorozhankin A.N., Shishkov A.N., Bychkov A.E., Valov A.V. Synchronous Reluctance Machine [Sinkhronnaya reaktivnaya mashina] patent 2422972, 2009.
23. Usynin U.S., Grigorev M.A., Shishkov A.N. Gorozhankin A.N. Synthesis of Motor Control with the Field Regulated Reluctance Machine, *Bulletin of the South Ural State University. Series "Power Engineering"*, 2012. no.37 (296), pp. 38–41.
24. Tsytoich L.I., Brylina O.G., Dudkin M.M., Rakhmatulin R.M., An adaptive interval-code binary-decimal integrating synchronization of control systems of power valve converters, *Russian Electrical Engineering*, no. 3, 2013, pp. 8–15.
25. Lokhov S.P., Tsytoich L.I., Dudkin M.M., Brylina O.G., Rakhmatulin R.M. About New Principle of Integrating Analog-to-Digital Conversion with Tactless Bit-by-Bit Equilibration, *Bulletin of the South Ural State University. Series «Power Engineering»*, 2012, no. 37 (296), pp. 97–106.
26. Tsytoich L.I., Rakhmatulin R.M., Brylina O.G., Dudkin M.M., Mylnikov A.Yu., Tyugaev V.A., Tyugaev A.V. Temperature Control System and Continuous Monitoring of Insulation Resistance of Electrical Products in the Process of Heat Treatment [Sistema regulirovaniya temperatury i nepreryvnogo kontrolya soprotivleniya izilyatsii elektrotekhnicheskikh izdeliy v protsesse ikh termicheskoy obrabotki] *Pribory i sistemy. Upravlenie, control, diagnostika [Devices and Systems. Control, Monitoring, Diagnostics]*, 2012, no. 8, pp. 45–50.
27. Tsytoich L.I., Rakhmatulin R.M., Dudkin M.M., Kachalov A.V. Reverse Thyristor Converter for Control Systems with an Electrical Mains Supply with Non-stationary Parameters [Reversivnyy tiristornyy preobrazovatel dlya system upravleniya s pitaniem ot seti s nestatsionarnymi parametrami]. *Prakticheskaya silovaya elektronika [Practical Power Electronics]*, 2009, no.4 (34), pp. 35–41.
28. Usynin U.S., Grigorev M.A., Shishkov A.N., Kashaev D.I. Energy Saving in Electric Forced-draft Mechanisms Multiply Objects, *Bulletin of the South Ural State University. Series "Power Engineering"*, 2011, no. 15 (232). pp. 40–45.
29. Usynin U.S., Valov A.V., Kozina T. A., Grigorev M.A., Vinogradov K.M., Gorozhankin A.N, Shishkov A.N. Asynchronous Motor With the Wound Rotor [Asinkhronnyy elektroprivod s faznym rotorom], patent 2408973, 2009.

Поступила в редакцию 27.03.2013 г.