

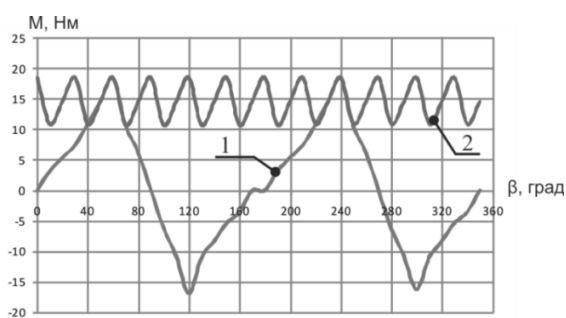
## ПУЛЬСАЦИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО МОМЕНТА В ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ С СИНХРОННЫМ РЕАКТИВНЫМ ДВИГАТЕЛЕМ НЕЗАВИСИМОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ\*

*А.Н. Горожанкин, А.Е. Бычков, Т.А. Козина, Е.В. Белоусов,  
А.М. Журавлев, Д.А. Сычев, А.Н. Шишков*

Наличие пульсаций электромагнитного момента в электроприводе с синхронным реактивным двигателем независимого возбуждения (СРДНВ) объясняется протекающими во времени процессами коммутации токов в статорных обмотках. Максимальное значение пульсаций в разомкнутой схеме для шестифазного двигателя может достигать 20 % от развиваемого электромагнитного момента. Одним из наиболее удобных для анализа процессов в электроприводе с СРДНВ является метод обмоточных функций. Данный метод позволяет произвести расчет амплитуды пульсаций относительно среднего момента, развиваемого электродвигателем для различного числа фаз. Компромиссом с учетом стоимости электропривода, массогабаритных и энергетических показателей по результатам расчета явилась трапецеидальная форма тока при числе фаз, равном шести. При числе фаз, меньшем шести, амплитуда пульсаций значительно увеличивается, что недопустимо. С другой стороны, увеличение числа фаз ведет к увеличению габаритов полупроводникового преобразователя при незначительном снижении амплитуды пульсаций. Для снижения уровня пульсаций электромагнитного момента было рекомендовано создание и использование быстродействующих контуров регулирования тока (КРТ), а также применение гибкой положительной обратной связи по току при коммутации фазных токов. Такое решение позволило получить среднее значение момента, на 10 % большее, чем в системе без коррекции, и ощутимо снизить амплитуду пульсаций электромагнитного момента. Показана возможность эффективной работы электропривода с СРДНВ в аварийных режимах.

*Ключевые слова:* пульсации электромагнитного момента, синхронные электроприводы, электроприводы с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения.

**Введение.** В СРДНВ при повороте ротора происходит коммутация токов статора, что вызывает пульсации электромагнитного момента. Угловая характеристика двигателя  $M = f(\beta)$ , снятая при фиксированном значении тока в обмотках статора, имеет два периода на оборот (рис. 1, кривая 2) [1, 2].



**Рис. 1.** К пояснению пульсаций момента в СРДНВ

При вращении ротора обмотки последовательно переключаются и переходят из зоны возбуждения в зону якоря, а кривая электромагнитного момента в функции угла  $\beta$  поворота ротора идет

по огибающей семейства угловых характеристик, смещенных относительно друг друга на величину фазной зоны, которая для 6-фазной машины равна  $30^\circ$  (рис. 1, кривая 2) [3–6]. Максимальное значение пульсаций в разомкнутой схеме для шестифазного двигателя может достигать 20 % от развиваемого электромагнитного момента. Помимо этого, при питании СРДНВ от вентильного преобразователя из-за конечного быстродействия как самого вентильного преобразователя, так и элементов системы управления, исходная картина пульсаций (см. рис. 1) будет искажаться, что может привести к дальнейшему увеличению амплитуды пульсаций. Поэтому при разработке системы управления необходимо выработать меры по борьбе с пульсациями. В современной литературе вопросы пульсаций электромагнитного момента в вентильных электроприводах рассмотрены без указания конкретных методик по учету этого явления [7]. Отсутствуют также практические рекомендации по подавлению этого явления и борьбе с ним.

**Расчетная модель электропривода.** Одним из наиболее удобных для анализа процессов в электроприводе с СРДНВ является метод обмо-

\* Работа в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» (соглашение № 14.В37.21.1503 от 21.09.2012).

## Электромеханические системы

точных функций [7–11]. Данный метод позволяет произвести расчет амплитуды пульсаций относительно среднего момента, развиваемого электродвигателем для различного числа фаз. Этот расчет ценен также ввиду того, что подобное экспериментальное исследование требует наличия 5–8 электрических машин различной конструкции, что затрудняет условия эксперимента. Поэтому на первом этапе (исследование влияния числа фаз) был произведен расчет, а на втором этапе (исследование влияния быстродействия системы управления) было произведено экспериментальное исследование. В качестве начальных условий для расчета пульсаций электромагнитного момента принято следующее:

- расчет выполнялся для двух случаев формы тока в обмотке каждой фазы статора: трапецеидальной и синусоидальной. В первом случае время реверса тока в каждой фазе соответствовало ширине фазной зоны статора. Этот случай соответствовал питанию фазных обмоток от индивидуальных источников тока (ИИТ). Во втором случае форма тока соответствовала обычной синусоиде;
- момент коммутации выбирался таким образом, чтобы достигался максимальный среднеинтегральный (за период коммутации) электромагнитный момент;
- магнитная система не насыщалась;
- величина полюсной дуги принималась равной половине от величины полюсного деления машины;
- число пазов статора равно сорока восьми.

Величины этих пульсаций в функции числа фаз статорной обмотки показаны на рис. 2. Пульсации электромагнитного момента составляли от 80 % до 15 % для трапецеидальной формы тока (рис. 2, кривая 1). Для синусоидального тока в фазных обмотках пульсации момента составляли от 40 % до 2 % (рис. 2, кривая 2).

Компромиссом с учетом стоимости электропривода, массогабаритных и энергетических показателей явилась трапецеидальная форма тока при

числе фаз, равном шести. Пульсации момента в этом случае составили 20 %. При числе фаз меньше 6 амплитуда пульсаций значительно увеличивается, что недопустимо. С другой стороны, увеличение числа фаз свыше шести приведет к увеличению количества оборудования при незначительном снижении амплитуды пульсаций.

В литературе по СРДНВ одним из основных допущений в большинстве исследований [9] является то, что ток в фазе переключается мгновенно. В качестве отправной точки будем считать, что при оптимальной настройке электропривода и конечном числе фаз  $m$  (исходя из предыдущего эксперимента  $m = 6$ ) амплитуда пульсаций зависит от времени переключения фазного тока в каждой из обмоток и от его величины. Наиболее остро этот вопрос встает при питании обмоток статора прямоугольной формой тока, так как в этом случае фронт изменения тока при переключении наиболее крутой. В дальнейшем будем считать, что время переключения есть время нарастания тока от нуля до заданного амплитудного значения при отдельно взятом переключении фаз. На рис. 3 показан вид осциллограммы двух токов фаз в момент переключения. Здесь время запаздывания  $T_1$  показывает программную задержку между переключениями, обусловленную быстродействием и правильностью работы узла формирования фазных токов (УФФТ); время нарастания  $T_2$  показывает время нарастания тока в фазе, определяемое быстродействием контура регулирования тока. Для достижения минимума пульсаций электромагнитного момента необходимо добиться минимального значения обозначенных постоянных времени. Данное обстоятельство требует увеличения быстродействия системы управления и, в частности, контура регулирования тока. С другой стороны, существует возможность скомпенсировать «провал» момента, если перед переключением искусственно завязать величину тока фазы. Для этого можно ввести гибкую положительную обратную связь по току, срабатывающую в зависимости от показаний датчика положения ротора.

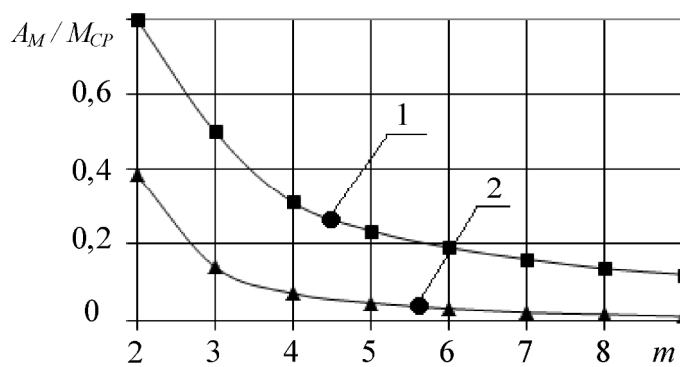


Рис. 2. Амплитуда пульсаций момента в функции числа фаз:  
1 – трапецеидальная форма тока;  
2 – синусоидальная форма тока

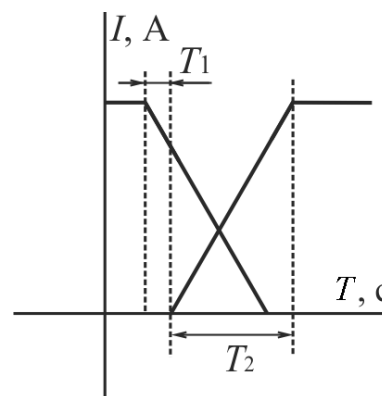


Рис. 3. К определению времени переключения тока в СРДНВ

Чтобы экспериментально проверить справедливость высказанных предположений и оценить значения величин  $T_1$  и  $T_2$  в реальном электроприводе, были сняты экспериментальные осциллограммы тока фазы опытного образца электропривода с СРДНВ. Экспериментальное исследование производилось для случая питания обмоток от индивидуальных источников тока *Maxi-Maestro*. На рис. 4 изображены кривые тока: 1 – для фазы  $A$ , 2 – для фазы  $B$  (двигатель шестифазный). Время нарастания тока в фазе  $T_2$  равнялось 1 мс. Время запаздывания  $T_1$  на рисунке не показано, так как для этого необходимо значительно увеличить масштаб осциллограмм, что привело бы к потере наглядности рисунка. Действительно, время запаздывания  $T_1$  обусловлено быстродействием УФФТ (см. рис. 3), а так как контроллер работает с тактовой частотой 16 МГц, то данное время мало и им можно пренебречь.

**Построение системы управления.** Для снижения влияния пульсаций электромагнитного момента было предложено использовать гибкую положительную корректирующую обратную связь по току фазы, реализованную программным путем внутри микроконтроллера системы управления. Функционально подобная связь работает по следующему алгоритму: при достижении ротором положения, близкого к положению переключения, на вход КРТ подается дополнительный сигнал коррекции  $U_K$  (рис. 5). При достижении ротором положения переключения корректирующая связь отключается. При исследовании корректирующей связи выбору подлежали следующие параметры: отношение амплитуды сигнала коррекции  $U_K$  к амплитуде сигнала задания тока фазы  $U_{PC}$ , а также положение ротора, при котором происходит включение сигнала коррекции. В ходе экспериментального исследования в качестве датчика положения использовался абсолютный энкодер с разрешением 256 импульсов, поэтому корректирующая связь варьировалась также по моменту включения сигнала коррекции ( $P_K$ ), который отсчитывался числом импульсов до момента, в котором произойдет переключение токов фаз  $P_\Phi$ .

На рис. 6 показана зависимость амплитуды

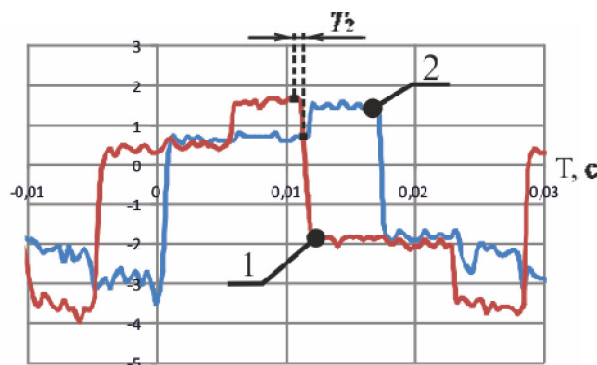


Рис. 4. Экспериментальные осциллограммы тока в СРДНВ

первой гармоники пульсаций  $A$  (в процентах от действующего значения момента  $M$ ) от амплитуды сигнала коррекции  $U_K$  (в процентах от сигнала задания  $U_{PC}$ ). Кривая 1 соответствует  $P_K = 1$  импульс до  $P_\Phi$ , кривая 2 –  $P_K = 2$  импульса до  $P_\Phi$ , кривая 3 –  $P_K = 3$  импульса до  $P_\Phi$ . Из рисунка видно, что наиболее благоприятными с точки зрения минимума пульсаций момента являются три точки:  $P_K = 1, U_K = 10\%$ ;  $P_K = 1, U_K = 15\%$  и  $P_K = 2, U_K = 10\%$ . Из трех вариантов остановимся на первом, так как в этом случае время действия  $U_K$  и его амплитуда наименьшие, следовательно, меньшим будет и действующее значение тока статора. Чтобы отследить влияние времени запаздывания тока в фазе  $T_1$  на пульсации электромагнитного момента будем экспериментально изменять быстродействие КРТ, тем самым изменяя время запаздывания тока. При этом будем фиксировать среднее значение момента на валу СРДНВ с помощью нагрузочной машины. Ввиду того, что одним из начальных условий экспериментов принималась оптимальная настройка КРТ, будем изменять время запаздывания  $T_1$  от 1 мс (рис. 7) до 50 мс.

Рассмотрена зависимость амплитуды первой гармоники пульсаций  $A$  от времени запаздывания  $T_1$ . Сопоставлялись три варианта работы электропривода: в первом варианте корректирующая связь отсутствовала (рис. 7, кривая 1), во втором случае корректирующая связь воздействовала только на отключаемый период тока (спадающий фронт) (рис. 7, кривая 2), в третьем случае корректирующая связь воздействовала и на ниспадающий фронт и на нарастающий фронт (рис. 7, кривая 3).

При времени переключения до 5 мс амплитуда пульсаций момента проявляется незначительно, но ко времени переключения, равному 50 мс, значение пульсаций достигает ощутимого значения и может привести к некачественной работе электропривода. Это полностью подтверждает гипотезу об увеличении пульсаций момента при неидеальной работе КРТ [12–16].

Учитываем, что время переключения тока зависит от быстродействия контура регулирования тока [17, 18]. Принимаем, что максимальное зна-

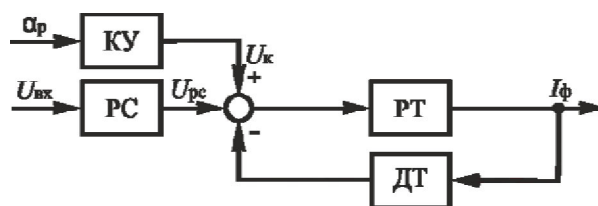


Рис. 5. Структурная схема корректирующей связи

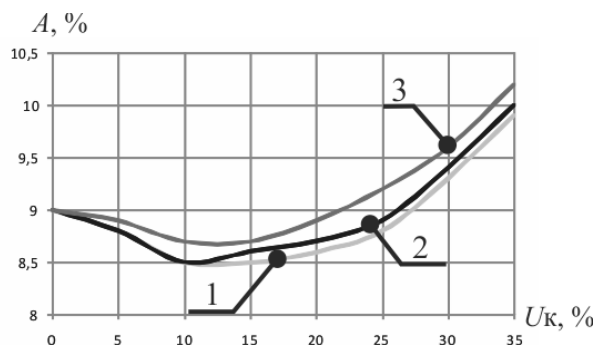


Рис. 6. К выбору параметров корректирующей ГОС

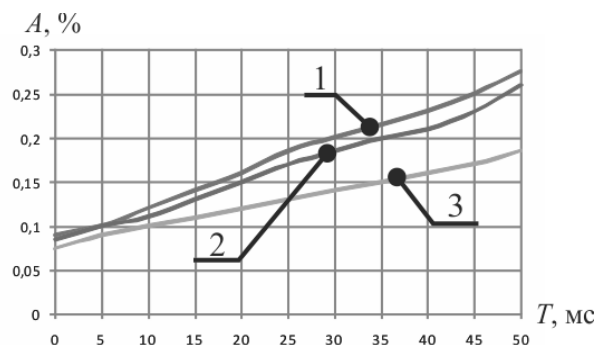


Рис. 7. Зависимость амплитуды пульсации момента на валу от времени запаздывания тока

чение времени запаздывания  $T_1 = 5$  мс, при котором амплитуда пульсаций мала. Это соответствует значению частоты среза КРТ, необходимому для устранения негативного влияния пульсаций электромагнитного момента, порядка 200 рад/с. Данный аргумент говорит также в пользу функциональной схемы с индивидуальными источниками тока, которая имеет максимальное быстродействие КРТ среди прочих вариантов силовых схем.

Относительно корректирующих связей можно заключить, что коррекция по двум фронтам (спадающему и нарастающему) позволяет получить среднее значение момента, на 10 % большее, чем в системе без коррекции в случае высоких значений  $T_1$ . Следовательно, применение корректирующей обратной связи наиболее эффективно для систем управления, в которых нет возможности реализовать быстродействующий контур регулирования скорости. В этом случае мы можем добиться как наибольшей эффективности корректирующей обратной связи, так и ощутимо снизить амплитуду пульсаций электромагнитного момента. Стоит оговорить, что экспериментальное исследование включает в себя только статические режимы, в переходных процессах амплитуда пульсаций может возрастать [19, 20]. Поэтому использование корректирующей связи является целесообразным и для систем с быстродействующим КРТ. Правда, применение быстродействующих корректирующих связей потребует применения надежных устройств аналогово-цифрового преобразования, точностные показатели которых могут быть значительно улучшены применением элементов, построенных на принципах развертывающего преобразования сигнала [21–24].

**Величины пульсаций момента в аварийных режимах работы.** Возможность эффективной работы в аварийных режимах является существенным достоинством любого электропривода. В современных публикациях показана повышенная надежность и функциональность многофазных электроприводов по сравнению с трехфазными, а также указаны возможности для увеличения надежности работы приводов переменного тока [20].

Рассмотрим влияние отказов в двигателе на характеристики электропривода с СРДНВ. Под отказами будем понимать отключение части фазных обмоток. При отключении каждой из обмоток от индивидуального источника тока (ИИТ) электропривод будет сохранять работоспособность. При этом нагрузка будет перераспределяться между остальными фазами. Короткие замыкания мы не будем рассматривать, так как в этом случае защита отключит фазную обмотку от источника питания, и мы придем к первому случаю.

Рассмотрим поэтапно отключение одной, двух, трех и четырех фазных обмоток на примере шестифазного СРДНВ с величиной полюсной дуги  $\alpha_p = 0,5$ , питающегося от ИИТ. Форму тока в фазных обмотках примем трапецидальной. При моделировании методом обмоточных функций будем поддерживать такой режим работы, при котором величина действующего значения фазного тока в рабочих фазах будет номинальной ( $I = I_H = \text{const}$ ).

Показателями качества работы будем считать:

- среднее значение электромагнитного момента за период коммутации  $M$  в относительных единицах;

- относительную величину пульсаций электромагнитного момента  $A_M/M$ .

При отключении одной фазы снижается среднее значение электромагнитного момента до 60 %. Относительная величина пульсаций этого момента возрастает в 1,5 раза.

При отключении двух фазных обмоток наиболее благоприятным является режим работы, когда отключенные фазы равноудалены друг от друга (рис. 8, а). В этом случае среднее значение электромагнитного момента относительно штатного режима работы снижается в 2 раза. Относительная величина пульсаций этого момента возрастает в 1,5 раза. Наиболее неблагоприятным является режим работы, когда отключенные фазы расположены рядом друг с другом (рис. 8, б). В этом случае среднее значение электромагнитного момента относительно штатного режима работы снижается в 3 раза. Относительная величина пульсаций этого момента возрастает в 2,5 раза.

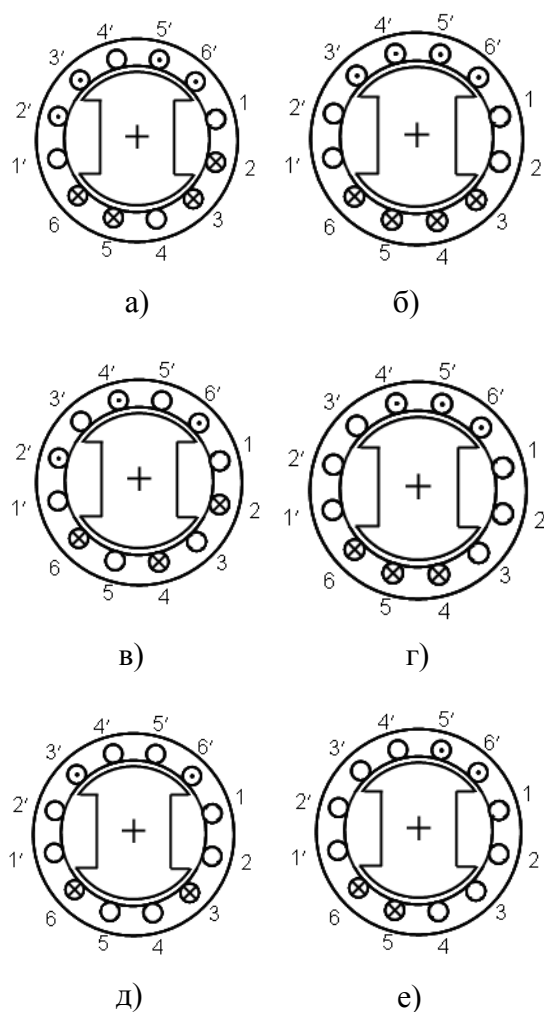


Рис. 8. Поперечный разрез СРДНВ в различных аварийных режимах работы

При отключении трех фазных обмоток наиболее благоприятным является режим работы, когда отключенные фазы равноудалены друг от друга (рис. 8, в). В этом случае среднее значение электромагнитного момента относительно штатного режима работы снижается в 4 раза. Относительная величина пульсаций этого момента возрастает в 1,6 раза. Наиболее неблагоприятным является режим работы, когда отключенные фазы расположены рядом друг с другом (рис. 8, г). В этом случае среднее значение электромагнитного момента относительно штатного режима работы снижается в 7 раз. Относительная величина пульсаций этого момента возрастает в 6 раз.

При отключении четырех фазных обмоток наиболее благоприятным является режим работы, когда отключенные фазы равноудалены друг от друга (рис. 8, д). В этом случае среднее значение электромагнитного момента относительно штатного режима работы снижается в 9 раз. Относительная величина пульсаций этого момента возрастает в 3,5 раза. Наиболее неблагоприятным является режим работы, когда отключенные фазы расположены рядом друг с другом (рис. 8, е). В

этом случае среднее значение электромагнитного момента относительно штатного режима работы снижается в 27 раз. Относительная величина пульсаций этого момента возрастает в 12,5 раз.

Увеличение уровня пульсаций электромагнитного момента увеличивает уровень поверхностного нагрева ротора [25, 26].

**Заключение.** Для подавления пульсаций были предложены методы, заключающиеся в изменении конструкции электрической машины, а также методы, затрагивающие изменение структуры системы управления электроприводом.

В ходе расчета было определено, что компромиссом с учетом стоимости электропривода, массогабаритных и энергетических показателей является число фаз, равное шести. В аварийных режимах работы по мере увеличения числа отключенных фазных обмоток среднее значение электромагнитного момента монотонно снижается и достигает 10 % от номинального значения при отказе четырех из шести обмоток.

Подводя итог экспериментальному исследованию пульсаций электромагнитного момента, сформулируем основные результаты проведенного исследования. В качестве результатов исследования можно рекомендовать создание и использование быстродействующих контуров тока (частота среза  $\Rightarrow$  200 рад/с) в качестве средства подавления пульсаций электромагнитного момента. Вторых, применение гибкой положительной обратной связи по току при коммутации фазных токов выступает как в качестве альтернативы предыдущему способу при невозможности создания быстродействующего КРТ, так и в качестве совместного с предыдущим способом общепромышленного решения для подавления пульсаций момента как в статических, так и в динамических режимах.

Электроприводы с СРДНВ могут быть рекомендованы для объектов с тяжелыми условиями эксплуатации и для тех технологических механизмов, в которых требуется решать задачи энергосбережения [27–29].

#### Литература

1. 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.
2. *Электропривод с синхронным реактивным двигателем независимого возбуждения* / Ю.С. Усынин, Н.Д. Моношко, Г.В. Караваев, М.А. Григорьев // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика»*. – 2001. – Вып. 1. – №4(4) – С. 70–76.
3. 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.

4. Пат. 2240640 Российская Федерация, МПК Н 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.
5. 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.
6. 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. – Заяв. 17.12.2009.
7. Усынин, Ю.С. Электроприводы и генераторы с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, К.М. Виноградов // Электричество. – 2007. – № 3. – С. 21–26.
8. 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.
9. Усынин, Ю.С. Системы управления электроприводов: учебное пособие / Ю.С. Усынин. – 2-е изд., испр. и доп. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2004. – 328 с.
10. Юферов, Ф.М. Электрические машины автоматических устройств / Ф.М. Юферов. – М.: Высшая школа, 1998.
11. Шмитц, Н. Введение в электромеханику: пер. с англ. / Н. Шмитц, Д. Новотный. – М.: Энергия, 1969. – 366 с.
12. 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.
13. 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.
14. 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.
15. 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.
16. Электроприводы с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения для станков 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.
17. Брылина, О.Г. Имитационное моделирование однозонного частотно-широко-импульсного регулятора переменного напряжения / О.Г. Брылина // Народное хозяйство. Вопросы инновационного развития. – М.: Изд-во МИИ Наука, 2013. – Т. 1. – С. 126–129.
18. Брылина, О.Г. Регуляторы переменного напряжения с частотно-широко-импульсной модуляцией // Вестник ЮУрГУ, серия «Энергетика». – 2012. – Вып. 17. – № 16. – С. 26–30.
19. 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.
20. Параметрическая оптимизация частотно-регулируемых электроприводов / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, А.Н. Шишков и др. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2012. – Вып. 18. – № 37(296). – С. 30–33.
21. Цытович, Л.И. Адаптивная интервалокодовая двоично-десятичная интегрирующая синхронизация систем управления силовыми вентилями преобразователями / Л.И. Цытович, О.Г. Брылина, М.М. Дудкин, Р.М. Рахматулин // Электротехника. – 2013. – № 3. – С. 8–15.
22. Цытович, Л.И. Система непрерывного контроля сопротивления изоляции электротехнических изделий в процессе их термической сушки / Л.И. Цытович, Р.М. Рахматулин, О.Г. Брылина и др. // Промышленная энергетика. – 2013. – № 1. – С. 24–28.
23. Brylina, O. Electric drive of centrifugal mechanisms with parallel channels of regulation on the basis of multizone sweep converter / O. Brylina, L. Tsytovich // Materiały IX Międzynarodowej naukowo-praktycznej konferencji «Strategiczne pytania światowej nauki – 2013». Vol. 30. Techniczne nauki. Budownictwo i architektura. – Przemysł, 2013. – P. 55–58.
24. Лохов, С.П. Замкнутый интегрирующий аналого-цифровой преобразователь с бестактовым поразрядным уравниванием / С.П. Лохов, Л.И. Цытович, М.М. Дудкин и др. // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2012. – № 11. – С. 27–35.
25. The Losses in Control Electric Drives of Transport Mechanisms at Different Controlled Laws / Yu.S. Usinin, M.A. Grigorjev, A.N. Shishkov et al. // SAE Paper 2011-01-0039, SAE 2011 World Congress, Detroit, MI, April 12–14, 2011. – 6 p.
26. 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.
27. Проектирование электрических машин / И.П. Копылов, Б.К. Клоков, В.П. Морозкин, Б.Ф. Токарев. – М.: Энергоатомиздат, 1993. – 464 с.

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; 23.12.2009.

**Горожанкин Алексей Николаевич**, кандидат технических наук, доцент, кафедра «Электропривод и автоматизация промышленных установок», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, тел.: 8-919-337-13-94, e-mail: goroz\_2012@mail.ru

**Бычков Антон Евгеньевич**, аспирант, кафедра «Электропривод и автоматизация промышленных установок», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, тел.: 8-904-977-84-37, e-mail: erasusu@gmail.com

**Козина Татьяна Андреевна**, кандидат технических наук, доцент, кафедра «Электропривод и автоматизация промышленных установок», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, тел. (351) 267-93-21.

**Белоусов Евгений Викторович**, аспирант, кафедра «Электропривод и автоматизация промышленных установок», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, тел.: 8-908-581-76-25, e-mail: erasusu@gmail.com

**Журавлев Артем Михайлович**, аспирант, кафедра «Электропривод и автоматизация промышленных установок», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, тел.: 8-952-509-00-96, e-mail: erasusu@gmail.com

**Сычев Дмитрий Александрович**, студент, кафедра «Электропривод и автоматизация промышленных установок», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, тел.: 8-919-341-28-82, e-mail: erasusu@gmail.com

**Шишков Александр Николаевич**, кандидат технических наук, доцент, кафедра «Электропривод и автоматизация промышленных установок», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, тел.: 8-904-970-55-91, e-mail: shan1976@mail.ru

---

**Bulletin of the South Ural State University  
Series "Power Engineering"  
2013, vol. 13, no. 1, pp. 103–110**

---

## **Electromagnetic Torque Ripples in the Electrical Drive with Field Regulated Reluctance Machine**

**A.N. Gorozhankin**, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation, goroz\_2012@mail.ru  
**A.E. Bychkov**, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation, erasusu@gmail.com  
**T.A. Kozina**, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation  
**E.V. Belousov**, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation,  
**A.M. Zhuravlev**, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation,  
**D.A. Sychev**, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation,  
**A.N. Shishkov**, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation, shan1976@mail.ru

The presence of the electromagnetic torque ripples in the drive with the field regulated reluctance machine (FRRM) is due to the current switching process in the stator windings occurring in time. The maximum value of the pulsations in the open loop scheme for the six-phase motor can be about 20% of the produced electromagnetic torque. One of the most usable analysis methods of the processes in the drive with the FRRM is the method of winding functions. This method allows you to calculate the ripples amplitude according to the average torque of the motor with a different number of phases. According to the calculating results the trapezoidal form of the current with the six phase number is the optimal solution in view of the drive cost, energy, weight and size data. If the number is less than six phases, the fluctuation amplitude increases significantly, this is unacceptable. On the other hand, increasing the number of phases over six would increase the equipment amount with a slight decrease in the pulsations amplitude. To suppress the electromagnetic torque ripples authors recommended to create and to use the high-speed current control loops (CCL) and to use the flexible positive current feedback in case of switching phase currents. Such a solution allowed to get the average value of the torque for 10% higher than in the system without correction and significantly reduced the amplitude of the electromagnetic torque ripples. The possibility of effective work of the electric drive with the FRRM in emergency conditions is shown.

*Keywords: torque ripples, synchronous electric drive, electric drive with field regulated reluctance machine.*



### References

1. 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, no. 5. pp. 1185–1193.
2. 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.
3. Usynin U.S., Grigorev M.A., Vinogradov K.M., Gorozhankin A.N., Chupin S.A. Synchronous Reluctance Machine [Sinkhronnaya reaktivnaya mashina], patent 2346376, 2007.
4. 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.
5. 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.
6. 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.
7. 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.
8. 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.
9. Usynin U.S. *Sistemy upravleniya elektropriwodov.* [Control system of electric drives]. Chelyabinsk, 2004. 328 p.
10. Juferov, F.M. *Elektricheskie mashiny avtomaticheskikh ustrojstv* [Electrical machines of automation devices], Moscow, 1998, 479 p.
11. Shmitc, N. *Vvedenie v elektromehaniku* [Introduction to electrical engineering], Moscow, 1969, 366 p.
12. 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.
13. 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.
14. 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.
15. 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.
16. Usynin U.S., Lohkov 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.
17. Brylina O.G. Imitatsionnoe modelirovanie odnozonnogo chastotno-shiritno-impulsnogo regulatora peremennogo napyazheniya [Imitation modeling of one-zone frequency-width-pulse AC regulator], *Narodnoe khozyaystvo. Voprosy innovatsionnogo razvitiya.* Moscow, t. 1, 2013, pp. 126–129.
18. Brylina O.G. AC voltage regulators with frequency-width-pulse modulation. [*Bulletin of the South Ural State University. Series "Power Engineering"*]. 2012, no. 17, №16, pp. 26–30.
19. 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.
20. 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.
21. 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.
22. Tsytoich L.I., Rakhmatulin R.M., Brylina O.G., Dudkin M.M., Milnikov A.Yu, Tugaev V.A., Tugaev A.V. System of continuous control of isolations resistance of electrotechnical products at drying of their thermal processing. *Promyshlennaya Energetika.* Moscow, 2013, no. 1, pp. 24–28.
23. Brylina O.G, Tsytoich L.I. Electric drive of centrifugal mechanisms with parallel channels of regulation on the basis of multizone sweep converter. *Materiały IX Międzynarodowej naukowo-praktycznej konferencji «Strategiczne pytania światowej nauki - 2013».* Volume 30. Techniczne nauki. Przemysł. 2013, pp. 55–58.
24. Lohkov S.P., Tsytoich L.I, Dudkin M.M., Rakhmatulin R.M., Brylina O.G. The closed integrating converter «analog – digit – analog» with automatic bit-by-bit balance, *Pribory i sistemy. Upravlenie, control, diagnostika.* Moscow, 2012, no. 11, pp. 27–35.
25. Usynin 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.
26. 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.
27. Kopylov I.P., Klovok B.K., Morozkin V.P., Tokarev B.F. Design of Electrical Machines [Proyektirovaniye elektricheskikh mashin ]. Moscow, 1993. pp. 464.
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 elektropriwod s faznym rotorom], patent 2408973, 2009.

Поступила в редакцию 22.03.2013 г.