

УДК 621.314.572

В.М. Щєка

Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков

СНИЖЕНИЕ ПОТЕРЬ ПРИ РАБОТЕ ЧАСТОТНО-УПРАВЛЯЕМОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Анализируются причины возникновения потерь в частотно-управляемом электроприводе. Излагаются рекомендации по выбору параметров электродвигателя с целью снижения потерь.

частотно-управляемый электропривод, потери мощности, гармонические составляющие

Введение

Постановка проблемы. Суммарные потери в частотно-управляемом электроприводе определяются потерями в двигателе и потерями в циклокоммутаторе. Поскольку фазные напряжения, которые поступают с выхода циклокоммутатора на статорные обмотки асинхронного электродвигателя, кроме основной частоты содержат частоты, кратные несущей частоте, и комбинированные частоты, равные сумме или разности частот, кратных несущей частоте и выходной частоте циклокоммутатора [1], постольку необходимо выбрать параметры циклокоммутатора таким образом, чтобы сумма потерь в частотно-управляемом электроприводе была минимальной. Крутящий момент двигателя, создаваемый высшими гармоническими составляющими, незначителен. Это связано с тем, что с ростом частоты гармонической

составляющей уменьшается ток и увеличивается скольжение ротора, вызывая рост сдвига фаз между током и магнитным потоком. Дополнительные потери в двигателе, вызываемые высшими гармоническими составляющими, определяются амплитудами фазного напряжения и активной составляющей фазного тока соответствующих гармоник. В циклокоммутаторе в процессе регулирования частоты гармонический состав практически не меняется. В электродвигателе потери можно уменьшить путем увеличения несущей частоты, однако при этом растут потери в циклокоммутаторе. Следовательно, несущая частота должна выбираться таким образом, что сумма потерь в частотно-управляемом электроприводе была минимальной.

Анализ литературы. Вопросы работы асинхронных электродвигателей при питании от источ-

ника с широтно-импульсной модуляцией выходного напряжения, рассматривались в [2, 3]. Однако в этих исследованиях основное внимание было уделено анализу происходящих в двигателе электромагнитных процессов. В [4] исследовались энергетические характеристики асинхронных двигателей, но в этой работе основное внимание уделялось динамическим режимам работы, и при этом рассматривался вариант параметрического управления двигателем. В [5] исследовались вопросы, связанные с определением потерь мощности в асинхронных электродвигателях, получающих питание от инверторов напряжения.

Цель статьи. Выбор параметров циклокоммутатора и асинхронного электродвигателя, обеспечивающих снижение потерь в частотно-управляемом электроприводе.

Основной материал

На рис. 1 приведены графики потерь в двигателе и циклокоммутаторе от высших гармонических составляющих и показана зависимость потерь от соотношения ε между несущей частотой и частотой циклокоммутатора, построенные по результатам определения частотного спектра фазного напряжения [1].

Кривые построены для серийных асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором серии А для варианта их работы с частотой 50 Гц. Потери в циклокоммутаторе растут с увеличением несущей частоты практически по линейному закону. Потери в двигателе растут при уменьшении ε . При отношении ε несущей частоты к выходной частоте циклокоммутатора большей 12 дополнительные потери в двигателе снижаются практически до нуля. Оптимальное соотношение ε равно 8 или 9. Работа с $\varepsilon < 6$ не рекомендуется, так как суммарные потери в системе циклокоммутатор – двигатель увеличиваются из-за существенного роста потерь в двигателе. Работа системы при $\varepsilon > 9$ допустима, но нежелательна в связи с тем, что с ростом ε недоиспользуется источник питания.

Анализ результатов, приведенных на рис. 1, показывает, что дополнительные потери, вызываемые высшими гармониками снижают коэффициент полезного действия частотно-управляемого электропривода на 2-8 %. При этом чем больше мощность, необходимая для привода антенны радиолокатора, тем больше снижение коэффициента полезного действия. Однако этот нежелательный эффект может быть смягчен за счет изменения параметров двигателя в процессе целевой разработки частотно-управляемого электропривода с циклокоммутатором.

В [6] исследовано влияние на характеристики циклокоммутатора величины x_0 . Однако пониженные значения x_0 характерны только для специальных двигателей (например, для двигателей серии АР). Для асинхронных короткозамкнутых электродвигателей обычных серий величина x_0 , как правило, неизменна: $x_0 = 3,0$.

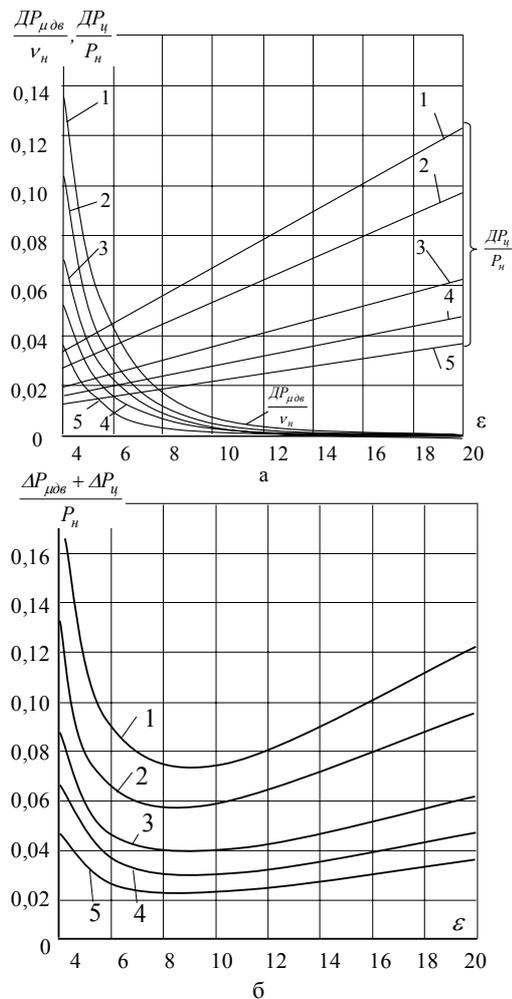


Рис. 1. Потери в системе циклокоммутатор – двигатель: а – кривые потерь в двигателе от высших гармоник и потерь в циклокоммутаторе; б – суммарные потери в системе циклокоммутатор – двигатель; 1 – привод с двигателем А31-6 (0,4 кВт); 2 – А42-6 (1,7 кВт); 3 – А62-6 (10 кВт); 4 – А81-6 (28 кВт); 5 – А92-6 (75 кВт); $\Delta P_{\mu\delta в}$ – потери в двигателе от высших гармоник; $\Delta P_{цв}$ – потери в циклокоммутаторе; P_n – номинальная мощность двигателя

Наиболее существенное влияние на выбор параметров силовой схемы оказывает величина индуктивного сопротивления короткого замыкания двигателя $x'_1 \approx (x_1 - x_0^2) / x_2$. Физически это объясняется тем, что требуемая для компенсации реактивной мощности величина емкости С определяется параметром $x'_1(L'_1)$. Поскольку наибольшие коммутационные перенапряжения возникают в режимах номинальной нагрузки и перегрузки по току, воспользуемся для качественной оценки величины перенапряжений выражением:

$$U_{Cm} \approx I_n \sqrt{2L'/C}. \quad (1)$$

Отсюда очевидна целесообразность уменьшения величины L'_1 . При уменьшении величины L'_1 , например, в 2 раза (т.е. $x'_1 = 0,1$ вместо обычного $x'_1 = 0,2$) возникают следующие варианты решений:

1. Возможно уменьшение в 2 раза величины эквивалентной емкости. При этом напряжение U_{Cm} остается на неизменном уровне, но в два раза уменьшается установленная мощность коммутирующих конденсаторов. С уменьшением емкости улучшается гармонический состав выходного тока, либо при тех же пульсациях можно выбрать меньшее значение индуктивности сглаживающего дросселя.

2. Возможно оставить неизменной величину емкости C . При этом напряжение U_{Cm} уменьшилось бы в $\sqrt{2}$. Реально допустимо снизить U_{Cm} не так резко, чтобы не нарушалось условие устойчивой работы системы в соответствии с которым

$$U_{Cm} / \sqrt{3} E_2 \geq 1. \quad (2)$$

Выбор первого или второго варианта определяет принятым критерием оптимизации: уменьшение величины L_{Π} и емкости конденсаторов или снижение коммутационных перенапряжений на двигателе и напряжения на элементах циклокоммутатора. На практике может быть рекомендован компромиссный вариант, когда при уменьшении L'_1 производится некоторое (но не пропорциональное L'_1) снижение емкости C и частично достигаются оба желаемых эффекта.

3. Обычно принято считать, что ограничение величины отношения частот $\alpha_{max} = \omega_{max} / \omega_n$ является принципиальным для циклокоммутатора. Однако, если при проектировании специальных высокооборотных двигателей (например, на частоту $f_n = 100$ Гц) будет выполнено требование $x'_1 / f_n = 0,2$, то возможна нормальная работа циклокоммутатора на высокой частоте с конденсаторами, обеспечивающими обычный уровень перенапряжений. Таким образом, целевое проектирование асинхронного электродвигателя снимает ограничение по верхней частоте для циклокоммутатора.

Рассмотрим, как влияет величина x'_1 на выбор емкости по условию (2), выполнение которого обеспечивает завершенность коммутационных процессов и принципиальную работоспособность электропривода. Зависимости $\sqrt{x_c} / \alpha = f(\omega_2)$ для $x'_1 = 0,1; 0,15; 0,2$ приведены на рис. 2. Из рис. 2 следует, что в определяющем режиме холостого хода ($\omega_2 = 0$) значение $\sqrt{x_c} / \alpha$ меняется незначительно даже при значительном изменении x'_1 , т.е. граничное значение емкости по (2) практически не зависит от величины x'_1 .

Необходимо указать на принципиальное отличие проектирования асинхронного двигателя для системы с циклокоммутатором и системы с автономным инвертором напряжения. Если в первом случае, как показано выше, необходимо стремиться к уменьшению величины x'_1 , то для системы с инвертором напряжения такая мера отрицательно скажется на гармоническом составе выходного тока [6].

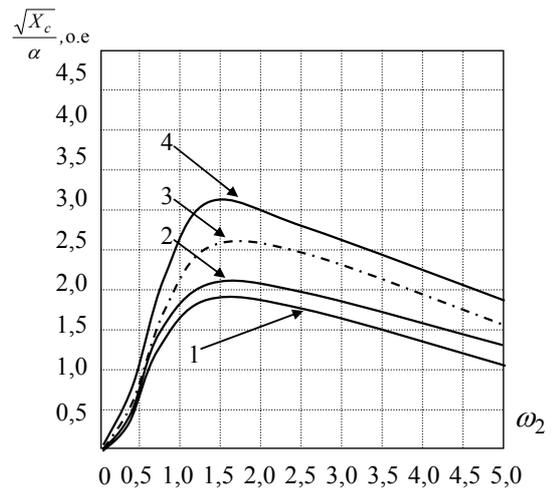


Рис. 2. Граничные зависимости по условию дополнительного открывания ОД (кривые 1 – 4) и условию завершенности коммутационных процессов (кривая 5)

При питании двигателя от циклокоммутатора относительная амплитуда гармоники кратности k по отношению к основной равна $I_k^* = 1/k$. При питании от инвертора напряжения приближенно:

$$I_k^* = 1 / \left(\frac{I_1}{I_{1k}} \cdot \frac{U_k}{k} \cdot \frac{1}{k \alpha x'_1} \right). \quad (3)$$

При изменении U пропорционально α получаем:

$$I_k^* = 1 / \left(\frac{I_1}{I_{1k}} \cdot \frac{1}{k^2 x'_1} \right). \quad (4)$$

На рис. 3 приведены графики зависимости $I_k^* = f(I_1 / I_{1k})$ при $k = 5; 7; 11$ для значений $x_1 = 0,15$ и $x_1 = 0,2$. Из рис. 3 видно, что уменьшение x'_1 существенно ухудшает гармонический состав выходного тока для параллельной схемы, причем для токов, меньших номинального значения, I_k^* для параллельной схемы больше чем для последовательной схеме.

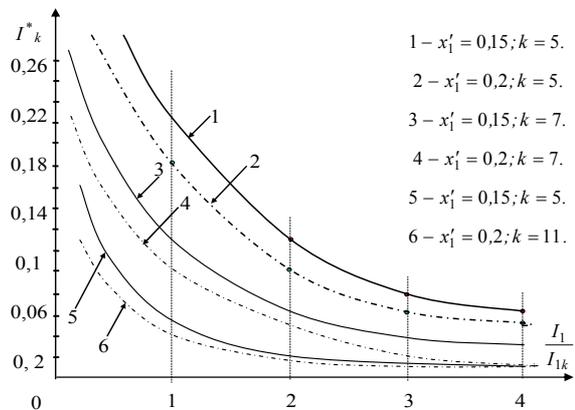


Рис. 3. График зависимости $I_k^* = f(I_1 / I_{1k})$

Таким образом, для циклокоммутатора необходимо проектировать асинхронный двигатель с пониженными значениями x'_1 , а для инвертора напряжения – с повышенными.

Выводы

1. Высшие гармонические составляющие вызывают дополнительные потери в системе циклокоммутатор-асинхронный электродвигатель. Величина дополнительных потерь зависит от соотношения ε между несущей частотой и частотой циклокоммутатора. Оптимальное соотношение между этими частотами лежит в диапазоне от 8 до 9. Работа с $\varepsilon < 6$ не рекомендуется, а при $\varepsilon > 9$ нежелательна.

2. Высшие гармонические составляющие снижают коэффициент полезного действия частотноуправляемого электропривода на 2%–8%. Снижение коэффициента полезного действия может быть компенсировано целевым выбором параметров электродвигателя.

3. В частотно-управляемых электроприводах на базе инвертора тока на частотах 2–3 Гц и ниже наблюдаются провалы скорости вплоть до нуля. Применение циклокоммутатора позволяет при низких частотах обеспечить равномерное вращение поля, а тем самым исключить случаи остановки ротора.

Список литературы

1. Щека В.М., Кушнерук Ю.И. Частотный спектр выходного напряжения циклокоммутатора // Системи управління, навігації та зв'язку. – Х.: ФОП «АЗАМАЄВА В.П.». – 2007. – Вип. 3. – С. 85-87.

2. Волков А.В. Анализ электромагнитных процессов асинхронного двигателя при питании от автономного инвертора с широтно-импульсной модуляцией выходного напряжения // Техн. електродинаміка. – 2000. – № 3. – С. 32-38.

3. Волков А.В. Анализ электромагнитных процессов асинхронного двигателя при питании от непосредственного преобразователя частоты // Техн. електродинаміка. – 2000. – № 6. – С. 33-40.

4. Петрушин В.С., Якимец А.М. Исследование энергетических показателей асинхронных двигателей в динамических режимах при параметрическом управлении // Техн. електродинаміка. – 2001. – № 5. – С. 50-52.

5. Волков А.В. Потери мощности двигателя в асинхронных электроприводах с АИН – ШИМ и НПЧ // Техн. електродинаміка. – 2001. – № 1. – С. 44-50.

6. Щека В.Н. Коммутационные процессы в частотно-управляемом электроприводе // Збірник наукових праць ХУ ПС. – Х.: ХУ ПС. – 2005. – Вип. 6(6). – С. 91-93.

Поступила в редколлегию 22.10.2007

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Б.Т. Кононов, Харківський університет Повітряних Сил, Харків.