
КЕРУВАННЯ У ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМАХ

УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

CONTROL IN TECHNICAL SYSTEMS

УДК 681.527.2

Е. М. Потапенко, А. В. Соломаха

СИНТЕЗ И АНАЛИЗ КОМПЕНСАТОРА ПАССИВНОГО LC-ФИЛЬТРА НА ВЫХОДЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧАСТОТЫ

Синтезирован алгоритм работы упреждающего компенсатора, устраняющего искажения амплитуды и фазы, вносимые пассивным фильтром. Численное и натурное моделирование подтвердило работоспособность синтезированного алгоритма.

ВВЕДЕНИЕ

Преобразователь частоты (ПЧ) с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) формирует выходное напряжение в виде набора прямоугольных импульсов одинаковой амплитуды. Их крутые фронты вызывают старение изоляции двигателя, питающих кабелей и ухудшение их диэлектрических свойств. Это также приводит к дополнительному нагреву обмоток двигателя и появлению высокочастотного акустического шума. Устранение вышеназванных эффектов особенно актуально для мощных приводов [1, 2]. Поэтому на выходе преобразователя частоты для сглаживания выходного напряжения устанавливают пассивные силовые LC-фильтры [3] (ПСФ). Пассивные фильтры улучшают гармонический состав тока и напряжения, уменьшают акустический шум, уменьшают пусковой ток двигателей, имеют простую конструкцию и относительно дешевые в изготовлении. Ограничение скорости изменения напря-

жения и снижение перенапряжений позволяет отказаться от увеличения номиналов инверторов за счет учета явления обратной волны в кабелях. Без фильтра напряжения срок службы двигателя уменьшается на 10 % по отношению к его декларированному сроку работы [4]. В основном, пассивные фильтры используются в потребителях мощности более 1 мегавольтампера. Пассивные фильтры не требуют технического обслуживания, экономичны, при условии, что сопротивление фильтра должно быть меньше, чем сопротивление системы [1]. К сожалению, пассивные фильтры искажают главные гармоники по амплитуде и фазе.

Целью данной статьи является синтез упреждающего компенсатора пассивного силового фильтра (УК) для устранения искажений амплитуды и фазы главной гармоники выходного напряжения ПЧ.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

На рис. 1 представлены функциональные схемы цепи компенсации неидеальностей ПСФ и автономного инвертора, где СУ – система управления автономным инвертором с ШИМ (АИН с ШИМ); ПСФ – силовой

© Потапенко Е. М., Соломаха А. В., 2007

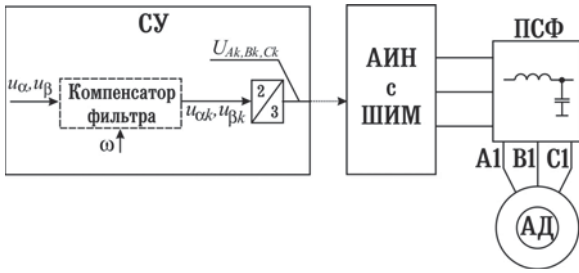


Рисунок 1 – Функциональные схемы цепи компенсации неидеальностей ПСФ и автономного инвертора

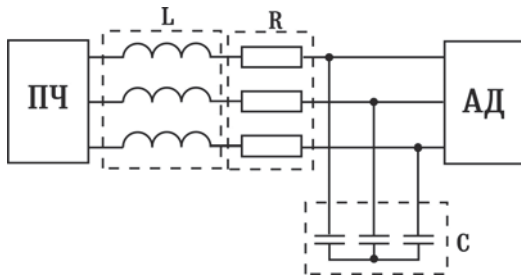


Рисунок 2 – Силовой пассивный фильтр

LC-фильтр; АД – асинхронный двигатель; u_{ap}, u_{bp} – управляющие (программные) сигналы системы управления АИН, u_{ap}^k, u_{bp}^k – программные сигналы с учетом компенсации, u_{Ap}, u_{Bp}, u_{Cp} – фазовые управляющие сигналы.

Схема подключения пассивного силового фильтра в электроприводе показана на рис. 2.

Напряжения, получаемые после LC-фильтров, оказываются искаженными по фазе и амплитуде относительно выходных напряжений ПЧ. Это приводит к ухудшению динамики системы, в которую входит преобразователь частоты. Задача состоит в упреждающем изменении программных сигналов по амплитуде и фазе таким образом, чтобы они компенсировали искажения, вносимые ПСФ. Такая возможность имеется за счет введения перекрестных связей между фазами многофазных сигналов. Это удобнее делать с двухфазными программными сигналами. Предлагаемый компенсационный фильтр состоит из компенсатора и собственно пассивного фильтра.

СИНТЕЗ УПРЕЖДАЮЩЕГО КОМПЕНСАТОРА ФИЛЬТРА

Силовой пассивный фильтр можно описать передаточной функцией

$$W(p) = \frac{1}{LCp^2 + RCp + 1}, \quad (1)$$

где R – активное сопротивление дросселя, или при необходимости, специально введенное в состав фильтра для получения необходимой фильтрации выходного напряжения ПЧ. Передаточной функции (1) будут соответствовать АЧХ и ФЧХ вида

$$A(\omega) = \frac{1}{\sqrt{(1 - LC\omega^2)^2 + (RC\omega)^2}}, \quad (2)$$

$$\psi(\omega) = -\arctg\left(\frac{RC\omega}{1 - LC\omega^2}\right). \quad (3)$$

Частота сигнала обычно используется в алгоритмах управления двигателями переменного тока и считается известной. Из выражения (3) найдем

$$\operatorname{tg}\psi(\omega) = -\frac{RC\omega}{1 - LC\omega^2}. \quad (4)$$

Используя тригонометрические преобразования

$$\sin\psi(\omega) = \frac{\operatorname{tg}\psi(\omega)}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2\psi(\omega)}}, \quad \cos\psi(\omega) = \frac{1}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2\psi(\omega)}}, \quad (5)$$

найдем

$$\sin\psi(\omega) = -\frac{RC\omega}{\sqrt{(1 - LC\omega^2)^2 + (RC\omega)^2}}, \quad (6)$$

$$\cos\psi(\omega) = \frac{1 - LC\omega^2}{\sqrt{(1 - LC\omega^2)^2 + (RC\omega)^2}}. \quad (7)$$

Необходимо компенсировать искажения амплитуды (2) и фазы, определяемой выражениями (6), (7). Программный двухфазный сигнал имеет вид

$$u_\alpha = |u|\cos\omega t, \quad u_\beta = |u|\sin\omega t, \quad |u| = \sqrt{u_\alpha^2 + u_\beta^2}. \quad (8)$$

После пропускания двухфазного сигнала (8) или эквивалентного ему трехфазного сигнала через силовой фильтр, эквивалентный двухфазный сигнал примет вид

$$\begin{aligned} u_{\alpha f} &= A(\omega)|u|\cos(\omega t + \psi(\omega)), \\ u_{\beta f} &= A(\omega)|u|\sin(\omega t + \psi(\omega)), \end{aligned} \quad (9)$$

где $A(\omega)$ и $\psi(\omega)$ – АЧХ и ФЧХ LC-фильтра соответственно.

Упреждающий компенсатор фильтра (УК) предназначен для устранения искажений в (9), связанных

с $A(\omega)$ и $\psi(\omega)$. Для этого УК должен иметь следующие частотные характеристики:

$$A_k(\omega) = A^{-1}(\omega), \quad \psi_k(\omega) = -\psi(\omega), \quad (10)$$

а его выходные сигналы с учетом (9) должны иметь вид

$$\begin{aligned} u_{\alpha k} &= A^{-1}(\omega)|u|\cos(\omega t - \psi(\omega))= \\ &= A^{-1}(\omega)|u|(\cos\omega t \cos\psi(\omega) + \sin\omega t \sin\psi(\omega))= \\ &= A^{-1}(\omega)(x_\alpha \cos\psi(\omega) + x_\beta \sin\psi(\omega)), \\ u_{\beta k} &= A^{-1}(\omega)|u|\sin(\omega t - \psi(\omega))= \\ &= A^{-1}(\omega)(u_\beta \cos\psi(\omega) - u_\alpha \sin\psi(\omega)). \end{aligned} \quad (11)$$

Подставляя (2), (6), (7) в (11), получим уравнения работы упреждающего компенсационного фильтра.

$$\begin{aligned} u_{\alpha k} &= u_\alpha(1 - LC\omega^2) - u_\beta(RC\omega), \\ u_{\beta k} &= u_\beta(1 - LC\omega^2) + u_\alpha(RC\omega). \end{aligned} \quad (12)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА КОМПЕНСАЦИИ

Моделировалась система (рис. 3), состоящая из следующих последовательно соединенных звеньев: источник сигнала, УК, преобразователь координат $(\alpha, \beta)/(A, B, C)$, блок формирования ШИМ-сигнала, динамические звенья с передаточной функцией (5), стоящие в каждой из фаз. Напряжения U_A, U_B, U_C являются желаемыми сигналами, с которыми будем сравнивать выходные сигналы фильтра U_{A1}, U_{B1}, U_{C1} .

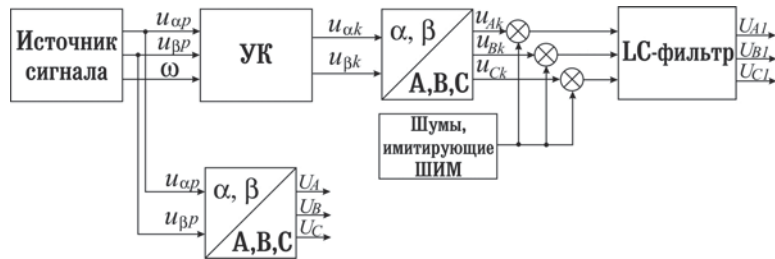


Рисунок 3 – Схема моделирования УК

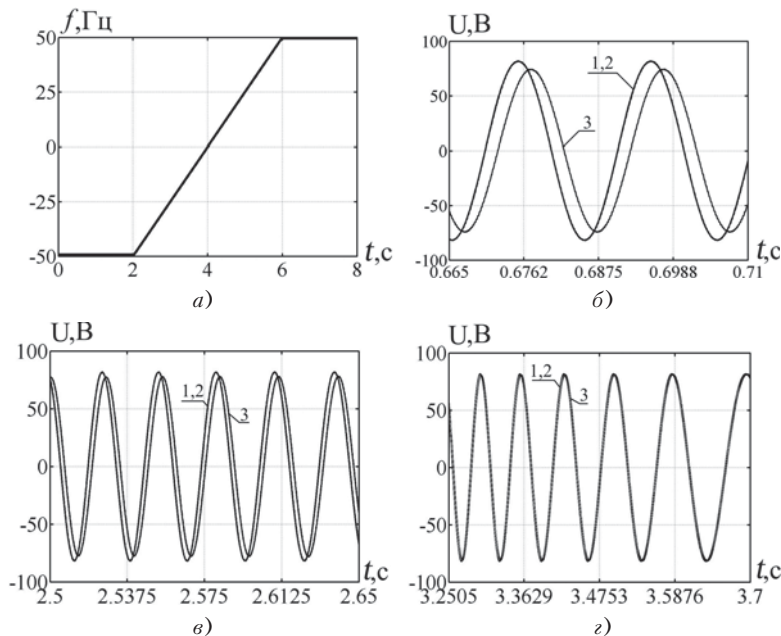


Рисунок 4:

а – частота изменения сигнала источника, б, в, з – желаемый (1), скорректированный сигнал на выходе LC-фильтра (2) и отфильтрованный без коррекции (3) сигналы фазы А на разных частотах

Источник генерировал периодический двухфазный сигнал амплитудой 100 В и переменной частотой, указанной на рис. 4, а. Моделирование проводилось со следующими параметрами фильтра: $R = 0,01$ Ом; $C = 40$ мкФ; $L = 0,01$ Гн.

Исходя из соотношений для преобразования $\alpha, \beta \rightarrow A, B, C$ [5], амплитуда соответствующего ему трехфазного сигнала равна 81,6 В. Перед LC-фильтрами на сигнал накладывались шумы, имитирующие ШИМ, амплитудой в 2 раза большей амплитуды полезного сигнала и частотой 4 кГц. Дискретность алгоритма УК составляла 100 мкс. На рис. 4, б; 4, в; 4, г, соответствующих высоким, средним и низким частотам, показаны желаемый сигнал фазы А U_A – кривая 1, скомпенсированный отфильтрованный U_{A1} – кривая 2 и отфильтрованный без компенсации – кривая 3.

Как видно из рис. 4, компенсационный фильтр работоспособен во всем диапазоне частот ± 50 Гц, при этом имеет 3 % ошибку в амплитуде, обусловленную шумами, по амплитуде превосходящей полезный сигнал в 2 раза. Компенсационный фильтр снижает амплитуду шумов в 54 раза при отсутствии искажений главной гармоники по амплитуде и фазе.

Экспериментальная проверка предлагаемого фильтра представлена в работе [6].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Синтезирован алгоритм работы упреждающего компенсатора фильтра для коррекции в реальном времени задающего сигнала ШИМ. С помощью этого алгоритма можно получить на выходе пассивного LC-фильтра желаемый отфильтрованный сигнал без искажений главной гармоники по фазе и амплитуде. С помощью компенсационного фильтра предотвращается износ изо-

ляции и уменьшаются потери на нагрев двигателя. Система компенсации входит в состав основной программы управления ПЧ и не требует дополнительной аппаратуры. Численное моделирование подтвердило работоспособность синтезированного алгоритма в диапазоне частот сигнала ± 50 Гц. Предложенный метод компенсации подходит для всех двигателей с АИН с ШИМ.

ПЕРЕЧЕНЬ ССЫЛОК

1. Das J. C. Passive Filters – Potentialities and Limitation // IEEE Trans. Ind. Applicat., Jan./Febr. – 2004. – Vol. 40, No. 1. – Pp. 232–241.
2. Kojima M., Hirabayashi K., Kawabata Y., Ejiogu E. C., Kawabata T. Novel Vector Control System Using Deadbeat-Controlled PWM Inverter With Output LC Filter // IEEE Trans. Ind. Applicat., Jan./Febr. – 2004. – Vol.40, No. 1. – Pp. 162–169.
3. Salomaki J., Hinkkanen M., Luomi J. Sensorless Control of Induction Motor Drives Equipped With Inverter Output Filter // IEEE Trans. on Ind. Electronics. – 2006. – Vol. 53, No. 4. – Pp. 1188–1197.
4. Хойджен П. Фильтры для частотных инверторов // Chip News. – 2002. – № 8. – С. 58–60.
5. Чиликин М. Г., Ключев В. И., Сандлер А. С. Теория автоматизированного электропривода. – М.: Энергия, 1979. – 616 с.
6. Потапенко Е. М., Соломаха А. В., Савранская А. В. Экспериментальное исследование аналого-цифровых адаптивных фильтров трехфазных сигналов // Электромашинобудування та електрообладнання. – 2006. – № 66. – С. 271, 272.

Надійшла 17.10.07

Синтезовано алгоритм роботи попереджувального компенсатора, який усуває скривлення амплітуди та фази, що внесені пасивним фільтром. Чисельне та натурне моделювання підтвердило працездатність синтезованого алгоритма.

The predictive compensator algorithm, eliminating distortions of amplitude and phase, brought in the passive filter, is synthesized. Numerical and natural modeling of serviceability of the synthesized algorithm has confirmed.

УДК 681.52.136

В. Е. Цыганаш, В. М. Зверев, Ю. С. Белоиваненко

АНАЛИЗ ЗАДАЧИ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЭНЕРГИИ В ТУРБОАГРЕГАТЕ

Рассмотрены технологические аспекты и проблемы производства электроэнергии на теплоэлектроцентрали. Изложена концепция оптимального управления процессом преобразования энергии в турбоагрегате.

В настоящее время очень большую роль в повышении использования энергетических затрат играет удельный вес энергетической составляющей в себестоимости промышленной продукции. В отдельных отраслях промышленности доля комплексных энергетических