

3. Потапенко, Е.М. Исследование робастности систем управления с наблюдателями / Е.М. Потапенко // Изв. РАН. Теория и системы управления. (Москва) – 1996. – №2. – С. 104-108.
4. Hirschorn, R.M. Control of Nonlinear Systems with Friction / R.M. Hirschorn, G. Miller // IEEE Trans. on Control Systems Technology. – 1999. – Vol. 7, N 5. – Pp. 588-595.
5. Дылевский, А.В. Применение метода пространства состояний для синтеза дифференциаторов / А.В. Дылевский, Г.И. Лозгачёв // Автоматика и телемеханика. – 1999. – № 9. – С. 13-20.

УДК 681.527.2

РАЗРАБОТКА МЕТОДА УПРЕЖДАЮЩЕЙ КОМПЕНСАЦИИ ИСКАЖЕНИЙ СТАТОРНОГО НАПРЯЖЕНИЯ АД, ВНОСИМЫХ ВЫХОДНЫМИ СИЛОВЫМИ ФИЛЬТРАМИ

Соломаха А.В.

Введение. Для питания АД в настоящее время используются инверторы напряжения с ШИМ. Выходные напряжения ПЧ с ШИМ представляют собой последовательность прямоугольных импульсов малой длительности. Крутые фронты напряжения с ШИМ (порядка 10 кВ/мкс) 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 проблем особенно актуально для мощных приводов [1, 2]. Поэтому на выходе преобразователя частоты для сглаживания выходного напряжения устанавливают силовые LC-фильтры [3]. Пассивные фильтры улучшают гармонический состав тока и напряжения (скорость фронта импульса становится менее 500 В/мкс), уменьшают акустический шум, имеют простую конструкцию и относительно дешевы в изготовлении. Ограничение скорости изменения напряжения и снижение перенапряжений позволяет отказаться от увеличения номиналов напряжений инверторов за счет учета явления обратной волны в кабелях. Без фильтра, ограничивающего производную 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]. Но, наряду с перечисленными положительными эффектами, пассивные фильтры искажают амплитуды и фазы главных гармоник выходных напряжений и токов, что приводит к ухудшению динамики электропривода, особенно с векторным управлением. В работе [3] проблема решается методом, построенным с помощью фильтра Калмана, которому присуща большая вычислительная сложность. Для восстановления динамики привода можно построить алгоритмически простой компенсатор введением перекрестных связей, что было сделано в работе [5], но без учета параметров нагрузки.

Целью данной статьи является разработка метода упреждающей компенсации искажений статорного напряжения АД, вносимых силовыми фильтрами, учитывающей параметры нагрузки.

Постановка задачи. На рис. 1 представлена функциональная схема автономного инвертора с силовым фильтром, где СУ – система управления автономным инвертором с ШИМ (АИН с ШИМ); ПСФ – пассивный силовой LC-фильтр; АД – двигатель переменного тока; $u_{\alpha p}$, $u_{\beta p}$ – управляющие (программные) сигналы системы управления АИН,

$u_{\alpha k}, u_{\beta k}$ – программные сигналы с учетом компенсации, u_{Ak}, u_{Bk}, u_{Ck} – фазовые управляющие сигналы.

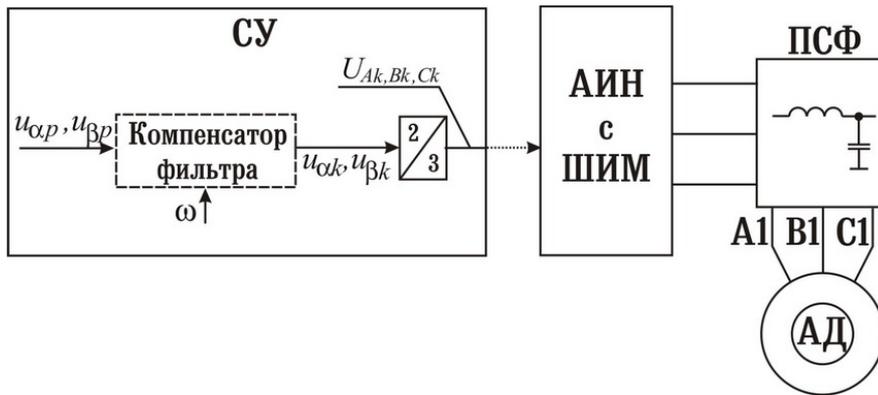


Рис. 1 Функциональная схема цепи компенсации неидеальностей ПСФ

Параметры ПСФ выбираются из условия устранения на их выходах высокочастотных помех, обусловленных ШИМ. Поэтому они являются известными, т.е. можно считать известными искажения амплитуды и фазы напряжения на выходах ПСФ. Задача состоит в упреждающем изменении программных сигналов по амплитуде и фазе таким образом, чтобы они компенсировали искажения, вносимые ПСФ. Таким образом, коэффициент передачи системы компенсатор – пассивный фильтр будет равен 1. Такая возможность имеется за счет введения перекрестных связей между фазами многофазных сигналов. Это удобнее делать с двухфазными сигналами.

Синтез упреждающего компенсатора фильтра. Программный двухфазный сигнал имеет вид

$$u_{\alpha p} = |u| \cos \omega t, \quad u_{\beta p} = |u| \sin \omega t, \quad |u| = \sqrt{u_{\alpha p}^2 + u_{\beta p}^2}, \quad (1)$$

где ω – угловая скорость вектора напряжения u , которая обычно используется в методах управления двигателями переменного тока и считается известной.

После пропускания двухфазного сигнала (1) или эквивалентного ему трехфазного сигнала через фильтр, эквивалентный двухфазный сигнал примет вид

$$u_{\alpha f} = A(\omega) |u| \cos(\omega t + \psi(\omega)), \quad u_{\beta f} = A(\omega) |u| \sin(\omega t + \psi(\omega)), \quad (2)$$

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

Упреждающий компенсатор фильтра (УК) предназначен для устранения искажений в (2), связанных с наличием $A(\omega)$ и $\psi(\omega)$. Для этого УК должен иметь следующие частотные характеристики:

$$A_k(\omega) = A^{-1}(\omega), \quad \psi_k(\omega) = -\psi(\omega), \quad (3)$$

а его выходные сигналы с учетом (1) должны иметь вид

$$\begin{aligned} u_{\alpha k} &= A^{-1}(\omega) |u| \cos(\omega t - \psi(\omega)) = A^{-1}(\omega) |u| (\cos \omega t \cos \psi(\omega) + \sin \omega t \sin \psi(\omega)) = \\ &= A^{-1}(\omega) (u_{\alpha p} \cos \psi(\omega) + u_{\beta p} \sin \psi(\omega)), \\ u_{\beta k} &= A^{-1}(\omega) |u| \sin(\omega t - \psi(\omega)) = A^{-1}(\omega) (u_{\beta p} \cos \psi(\omega) - u_{\alpha p} \sin \psi(\omega)). \end{aligned} \quad (4)$$

Для получения передаточной функции ПСФ рассмотрим одну фазу системы ПЧ-ПСФ-АД, которая показана на рис. 2. АД можно представить как нелинейную RL-нагрузку, параметры которой (R_n, L_n) зависят от параметров двигателя, режима работы двигателя, скольжения.

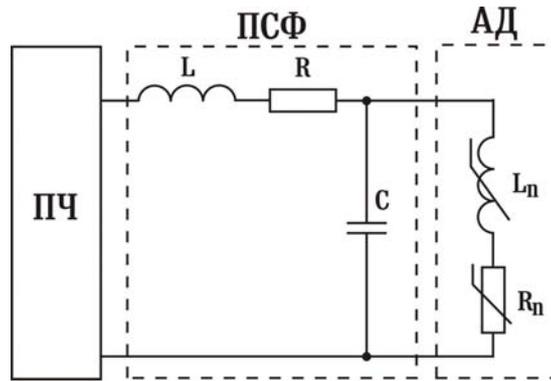


Рис. 2 Функциональная схема одной фазы системы ПЧ-ПСФ-АД

Передаточная функция системы имеет вид

$$W(p) = \frac{U_{AD}}{U_{ПЧ}} = \frac{L_n p + R_n}{LL_n C p^3 + (RL_n + LR_n) C p^2 + (L + L_n + RR_n C) p + (R + R_n)}, \quad (5)$$

где U_{AD} – фазное напряжение АД, $U_{ПЧ}$ – фазное напряжение на выходе ПЧ, R – активное сопротивление дросселя, или при необходимости, специально введенное в состав фильтра для получения необходимой фильтрации выходного напряжения ПЧ, L , C – индуктивность и емкость фильтра.

Передаточной функции (5) будет соответствовать АФЧХ вида

$$W(j\omega) = \frac{[R_n] + j[\omega L_n]}{[R + R_n - \omega^2 C(RL_n + LR_n)] + j[\omega(L + L_n + RR_n C) - \omega^3 LL_n C]} = \frac{[N_1] + j[N_2]}{[D_1] + j[D_2]}, \quad (6)$$

где ω – угловая скорость напряжения $U_{ПЧ}$,

N_1 , D_1 , N_2 , D_2 – действительные и мнимые части в числителе и знаменателе соответственно, введенные для упрощения расчета.

АЧХ и ФЧХ передаточной функции (5) с учетом введенных обозначений имеют вид

$$A(\omega) = \frac{\sqrt{N_1^2 + N_2^2}}{\sqrt{D_1^2 + D_2^2}}, \quad (7)$$

$$\psi(\omega) = \arctg\left(\frac{N_2}{N_1}\right) - \arctg\left(\frac{D_2}{D_1}\right). \quad (8)$$

Воспользовавшись выражением $\tg(\alpha - \beta) = \frac{\tg\alpha - \tg\beta}{1 + \tg\alpha \cdot \tg\beta}$ для (8), найдем

$$\tg\psi(\omega) = \frac{N_2 D_1 - N_1 D_2}{N_1 D_1 + N_2 D_2}. \quad (9)$$

Используя тригонометрические преобразования

$$\sin\psi(\omega) = \frac{\tg\psi(\omega)}{\sqrt{1 + \tg^2\psi(\omega)}}, \quad \cos\psi(\omega) = \frac{1}{\sqrt{1 + \tg^2\psi(\omega)}}, \quad (10)$$

и выражение

$$\sqrt{D_1^2 + D_2^2} = \frac{\sqrt{N_1^2 + N_2^2}}{A(\omega)}, \quad (11)$$

полученное из (7), найдем

$$\sin\psi(\omega) = A(\omega) \frac{N_2 D_1 - N_1 D_2}{N_1^2 + N_2^2}, \quad (12)$$

$$\cos \psi(\omega) = A(\omega) \frac{N_1 D_1 + N_2 D_2}{N_1^2 + N_2^2}. \quad (13)$$

Подставив значения N_1, D_1, N_2, D_2 в (12), (13) и упростив, получим

$$\sin \psi(\omega) = A(\omega) \omega \left(\frac{L_n R - R_n L}{R_n^2 + (\omega L_n)^2} - RC \right), \quad (14)$$

$$\cos \psi(\omega) = A(\omega) \left(1 - \omega^2 LC + \frac{R_n R + \omega^2 L_n L}{R_n^2 + (\omega L_n)^2} \right). \quad (15)$$

Подставляя (14), (15) в (4), получим уравнения работы упреждающего компенсатора фильтра.

$$\begin{aligned} u_{\alpha k} &= u_{\alpha p} \left(1 - \omega^2 LC + \frac{R_n R + \omega^2 L_n L}{R_n^2 + (\omega L_n)^2} \right) + u_{\beta p} \omega \left(\frac{L_n R - R_n L}{R_n^2 + (\omega L_n)^2} - RC \right), \\ u_{\beta k} &= u_{\beta p} \left(1 - \omega^2 LC + \frac{R_n R + \omega^2 L_n L}{R_n^2 + (\omega L_n)^2} \right) - u_{\alpha p} \omega \left(\frac{L_n R - R_n L}{R_n^2 + (\omega L_n)^2} - RC \right). \end{aligned} \quad (16)$$

Результаты моделирования. Моделировалась система (рис. 3), состоящая из следующих последовательно соединенных звеньев: источник сигнала с переменной частотой, УК, преобразователь координат $(\alpha, \beta)/(A, B, C)$, блок формирования ШИМ-сигналов, LC-фильтров и RL-нагрузки, имитирующей АД. Напряжения u_α, u_β - являются желаемыми сигналами, с которыми будем сравнивать выходные сигналы фильтра u'_α, u'_β .

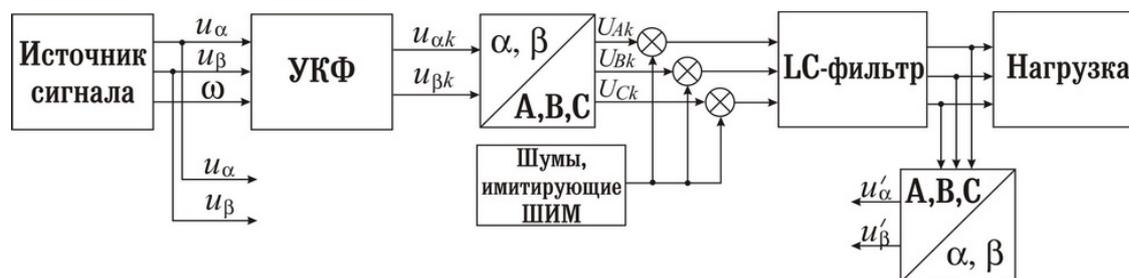


Рис. 3 Структурная схема моделирования работы упреждающего компенсатора фильтра

Источник генерировал периодический двухфазный сигнал амплитудой 100 В и переменной частотой, которая изменялась как показано на рис. 4.

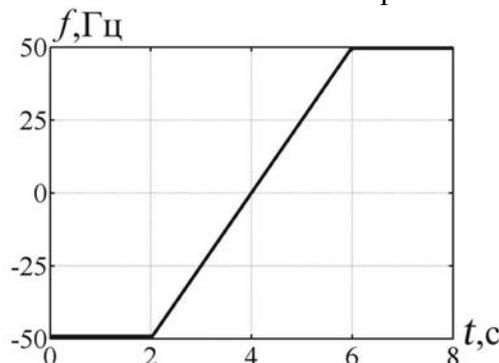


Рис. 4 График изменения частоты сигнала источника в процессе моделирования

Моделирование проводилось со следующими параметрами фильтра: $R=0.01$ Ом, $L=0.01$ Гн, $C=40$ мкФ. Перед LC-фильтрами в блоке формирования ШИМ-сигналов на сигнал накладывались шумы, имитирующие ШИМ, амплитудой в 2 раза большей амплитуды полезного сигнала и частотой 4 кГц. Дискретность алгоритма УК составляла 200 мкс. На рис. 5 приведены графики ошибок, то есть рассогласований между желаемыми и выходными сигналами, по каналам α и β .

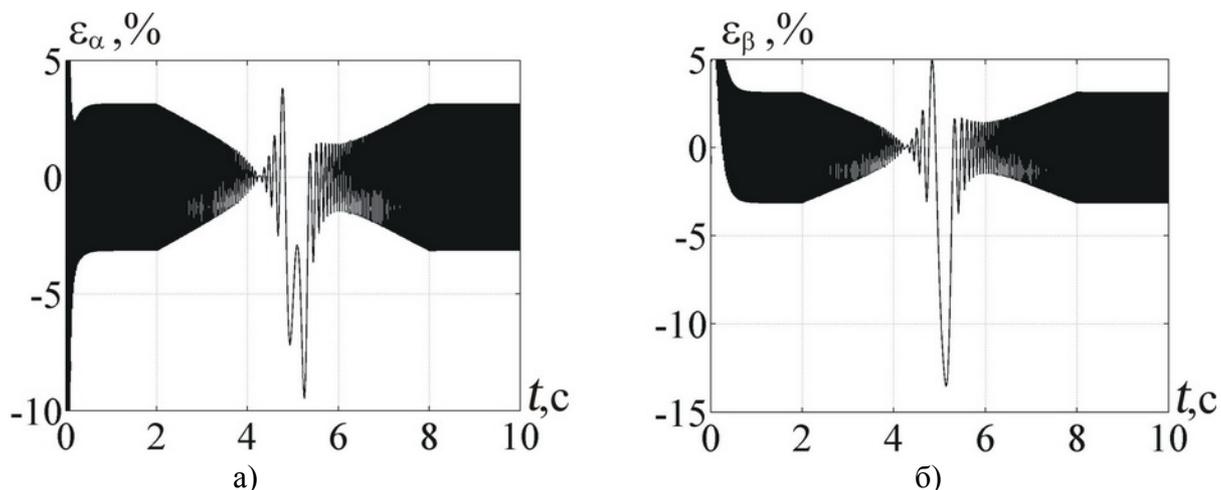


Рис. 5 Результаты моделирования УК:
а, б – ошибки по каналам α и β соответственно.

Как видно из рис. 5, компенсационный фильтр работоспособен во всем диапазоне частот ± 50 Гц, при этом имеет 3% ошибку в амплитуде, обусловленную шумами, имитирующими ШИМ. Компенсационный фильтр снижает амплитуду шумов, при этом практически отсутствуют искажения главной гармоники по амплитуде и фазе. По сравнению с прототипом [3], построенным с помощью фильтра Калмана, разработанный метод отличается алгоритмической простотой (не содержит операций интегрирования и дифференцирования).

Выводы. Разработан метод упреждающей компенсации искажений статорного напряжения АД, вносимых силовыми фильтрами, учитывающий параметры нагрузки. Компенсатор отличается алгоритмической простотой по сравнению с прототипом, построенным с помощью фильтра Калмана. Система компенсации входит в состав основной программы управления ПЧ и не требует дополнительных затрат. Связка компенсатор – пассивный фильтр снижает амплитуду шумов, при этом ошибка главной гармоники по амплитуде не превышает 3% и отсутствует по фазе. Разработанный метод работоспособен в диапазоне частот сигнала от 0 до 50 Гц. Предложенный метод компенсации искажений, обусловленных пассивным фильтром, применим для управления всеми типами двигателей, питаемых от АИН с ШИМ.

The predictive compensation method with load parameters accounting for eliminating distortions of induction motor stator voltage, which brought in the output passive filter, is designed. The proposed compensation method may be used for control of all kind of motors, powered by VSI with PWM. Numerical modeling of serviceability of the designed algorithm has confirmed.

1. Das J.C. Passive Filters – Potentialities and Limitation // IEEE Trans. Ind. Applicat.– 2004.– Vol.40, № 1.– P.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.– 2004.–Vol.40, № 1.– P.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, № 4.– P.1188–1197.
4. Хойджен П. Фильтры для частотных инверторов // Chip News. – 2002. – № 8. – С. 58–60.
5. Потапенко Е.М., Соломаха А.В. Синтез и анализ компенсатора пассивного LC-фильтра на выходе преобразователя частоты // Радиоелектроніка. Інформатика. Управління. – 2007. – №2. – С. 148–151.