

УДК 681.527.2

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ИСКАЖЕНИЙ СТАТОРНОГО НАПРЯЖЕНИЯ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА С ВЫХОДНЫМИ СИЛОВЫМИ ФИЛЬТРАМИ

Зиновкин В.В., д.т.н.,

Бондаренко В.И., к.т.н.,

Соломаха А.В., инженер

Запорожский национальный технический университет

Тел.: (061)7698-279

Аннотация - разработан метод упреждающей компенсации искажений статорного напряжения асинхронного двигателя, вносимых выходными силовыми фильтрами, учитывающий параметры нагрузки. Предложенный метод компенсации искажений применим для управления всеми типами двигателей, питаемых от АИН с ШИМ. Численное моделирование подтвердило работоспособность разработанного алгоритма.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, выходной силовой фильтр, метод упреждающей компенсации.

Постановка проблемы. Асинхронные электроприводы широко применяются в различных областях промышленности и аграрно-промышленного комплекса. Их основным исполнительным механизмом является асинхронный двигатель (АД). При его помощи осуществляется преобразование электрической энергии в механическую. Регулировка напряжения осуществляется, преимущественно, инверторами напряжения с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ). В отдельных динамических режимах выходные фазные напряжения преобразователя частоты (ПЧ) с ШИМ являются источником искажений напряжения. Такой характер нагрузки электропривода с ШИМ приводит к следующим нежелательным явлениям и последствиям:

- увеличению добавочных потерь в электроприводе и технологической линии;
- перегревам обмоток и питающих кабелей;
- ухудшению диэлектрических свойств изоляционных материалов;
- ускоренному старению изоляции электропривода;
- увеличения общего фона акустических шумов и в спектре октавных частот;

- развитию магнитострикционных явлений в магнитной системе и отдельных деталях конструкции;
- проявлению и дальнейшему развитию релаксационных явлений в электроприводе и технологической линии;
- резонансным ферромагнитным и механическим явлениям;
- возрастанию энергозатрат на единицу вырабатываемой продукции;
- ухудшению технико-экономических показателей, как отдельных технологических линий, так и аграрного промышленного комплекса в целом.

Усматривается, что для оперативного функционирования асинхронных электроприводов целесообразно использовать векторное управление режимами двигателя и технологических линий. Для улучшения режимов электроприводов широко используются специализированные силовые LC-фильтры на выходе преобразователя частоты. Следует отметить что, пассивные фильтры искажают амплитуды и фазы первых гармоник выходных напряжений и токов, что приводит к усложнениям использования систем векторного автоматизированного управления технологическими процессами.

Эти явления существенно влияют на решение инженерных задач энергосбережения и оптимального использования электротехнического оборудования, различного вида исполнительных механизмов и микропроцессорных систем, обеспечения оптимизации и согласованности режимов ряда мощных АД в составе одного электротехнического комплекса [1,2]. С научной точки решение данного вопроса, с учетом совокупности приведенных выше факторов, представляет многопараметрическую математическую модель, решение которой представляет довольно сложные нелинейные зависимости. Полученные результаты не могут прямо использоваться на практике для различных типов и классов мощности АД. Поэтому в инженерные методики вводится ряд полуэмпирических коэффициентов при помощи которых характер зависимостей между определяющими параметрами сохраняется, а их численные значения существенно отличаются для различных типоразмеров мощных АД. С целью снижения влияния искажений напряжения и сглаживания выходного напряжения на выходе преобразователя частоты устанавливаются силовые LC-фильтры [3]. Ограничение скорости изменения напряжения и снижение перенапряжений позволяет оптимально использовать электротехническое оборудование и отказаться от увеличения номиналов напряжений инверторов за счет учета влияния обратной волны в кабелях.

Следует отметить, что в настоящее время отсутствуют инженерные и научные методики, которые позволяют одновременно учитывать все нежелательные факторы. Поэтому на практике срок службы мощных АД уменьшается на 10% относительно директивного. Необ-

ходимо отметить, что при решении инженерных задач пассивные фильтры используются в потребителях мощности более 1 МВА. Они более экономичны и их техническое обслуживание не требует дополнительных организационных и технических мероприятий. Наряду с положительными экономическими показателями пассивные фильтры искажают амплитуды и фазы основных гармоник выходных напряжений и токов. Это приводит к ухудшению динамических параметров электропривода и существенному усложнению использования методов векторного управления в электроприводах. Использование последних позволяют существенно повысить быстродействие АД и оперативность электротехнологических комплексов. В особых случаях эта проблема решается путем использования фильтра Калмана и других методов, что требует разработки специализированных программно-аналитических методик и микропроцессорных вычислительных средств [3].

Для обеспечения стабилизации динамических параметров привода в настоящей работе предложено использовать сравнительно упрощенный компенсатор в структуре которого используются перекрестные связи между соответствующими параметрами, но без учета особенностей нагрузки [5].

Формулировка целей статьи (постановка задания). Целью данной статьи является разработка метода упреждающей компенсации искажений статорного напряжения АД, вносимых силовыми фильтрами с учетом динамических параметров нагрузки.

Постановка задачи поясняется использованием функциональной схемы цепи компенсации неидеальностей пассивного силового фильтра (ПСФ), которая представлена на рис.1. На этом рисунке приняты следующие обозначения: 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.

Параметры ПСФ выбираются из условия устранения на их выходах высокочастотных помех, обусловленных ШИМ. Поэтому они являются известными, и, с учетом параметров нагрузки, 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 путем использования перекрестных связей между фазами

многофазних сигналів. Достиження цієї цілі упрощається путем преобразовання к двухфазним сигналам. Такой методологический подход позволяет осуществить решение задачи синтеза упреждающего компенсатора фильтра.

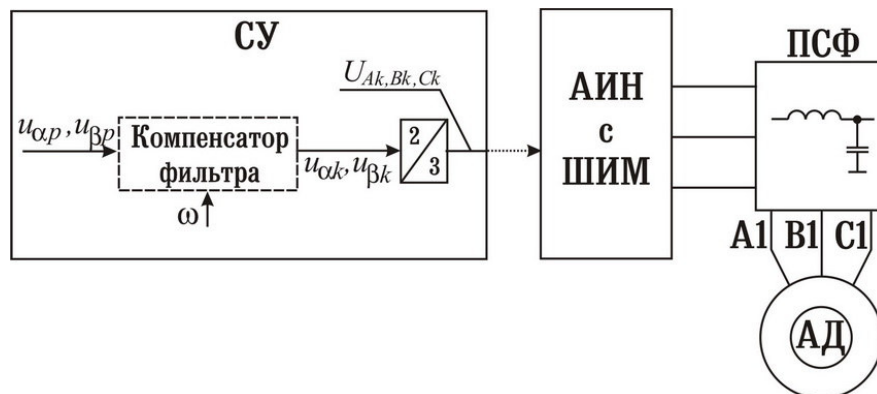


Рис. 1. Функціональна схема цепи компенсации неидеальностей ПСФ.

Основные материалы исследования. Решение поставленной научной задачи будем отыскивать путем физико-математического представления работы цепи компенсации неидеальностей ПСФ. В аналитическом виде, применительно к исследуемой модели и дальнейших теоретических исследований, программный двухфазный сигнал удобно представить в следующем виде:

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

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.

Очевидно, что для устранения искажений в (2), связанных с наличием $A(\omega)$ и $\psi(\omega)$, целесообразно использовать упреждающий компенсатор фильтра (УК), который 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

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

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

Для получения передаточной функции ПСФ рассмотрим одну фазу системы ПЧ-ПСФ-АД, которая показана на рис. 2. АД представляем в виде переменной RL-нагрузки, параметры которой (R_n, L_n) зависят от электромагнитных и конструктивных параметров двигателя, режима работы двигателя, скольжения.

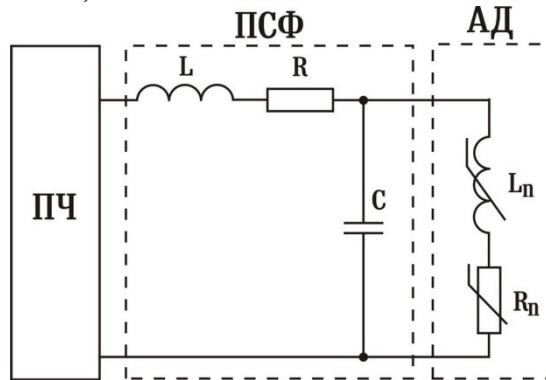


Рис. 2. Функциональная схема одной фазы системы ПЧ-ПСФ-АД.

Передаточная функция системы имеет вид

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

где U_{AD} – фазное напряжение АД, U_{PCH} – 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_{PCH} ,

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, преобразовываем к следующему виду:

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

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

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

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

Используя тригонометрические преобразования

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

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:

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

Моделирование работы упреждающего компенсатора фильтра осуществлялось согласно системы, которая приведена на рисунке 3. Модель представляет следующие последовательно соединенные звенья: 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 .

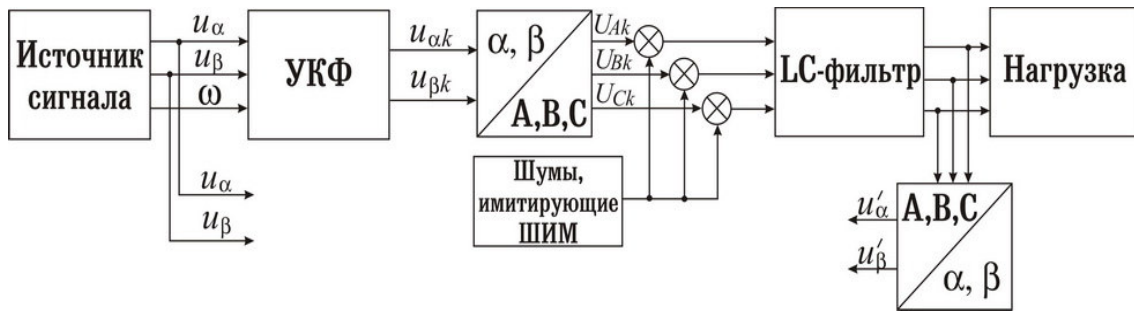


Рис. 3. Структурная схема модели упреждающего компенсатора фильтра.

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

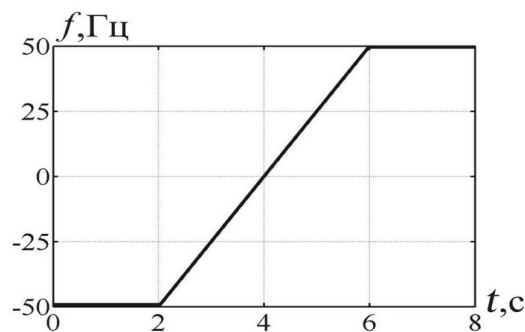


Рис. 4. График изменения частоты сигнала источника в процессе моделирования.

Моделирование осуществлялось при следующих параметрах фильтра: $R=0.01$ Ом, $L=0.01$ Гн, $C=40$ мкФ. Перед LC-фильтрами в блоке формирования ШИМ-сигналов на основной сигнал накладывались шумы, имитирующие искажения вносимые ШИМ, амплитудой в 2 раза большей амплитуды полезного сигнала и частотой 4 кГц. Дискретность алгоритма УК составляла 200 мкс. Результаты исследований приведены на рис. 5, откуда видно, что наблюдается рассогласование между желаемыми и выходными сигналами по каналам α и β

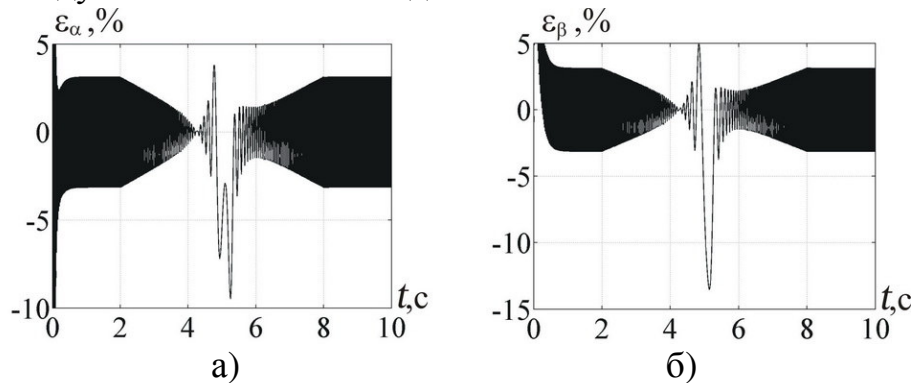


Рис. 5. Результаты моделирования УК:
а, б – ошибки по каналам α и β , соответственно.

Как следует из результатов моделирования (рис. 5), предложенный компенсационный фильтр работоспособен во всем диапазоне частот ± 50 Гц. При этом имеет место 3% ошибка в амплитуде, обусловленная шумами, имитирующими режимы ШИМ. Таким образом предложенный компенсационный фильтр снижает амплитуду шумов и одновременно исключаются искажения главной гармоники по амплитуде и фазе. Сопоставительный анализ результатов выполненных исследований по сравнению с полученными с помощью фильтра Калмана, который использовался в качестве прототипа [3]), показал, что разработанный метод отличается алгоритмической простотой и более приемлем для решения инженерных задач.

Выводы. Приведенные результаты исследований позволяют сформулировать следующее:

1. Разработанный метод упреждающей компенсации искажений статорного напряжения АД, вносимых силовыми фильтрами, позволяет учитывать реальные параметры нагрузки, что более приемлемо для решения практических инженерных задач.

2. Предложенное решение отличается алгоритмической простотой по сравнению с прототипом (фильтром Калмана) за счет использования системы компенсации входящей в состав основной программы управления ПЧ и не требует дополнительных затрат.

3. Использование цепей компенсатор – пассивный фильтр позволяет снизить амплитуду шумов, при погрешности главной гармоники по амплитуде не превышающей 3% и отсутствии по фазе.

4. Разработанный метод работоспособен в диапазоне частот сигнала от 0 до 50 Гц и может использоваться для управления всеми типами асинхронных электроприводов, питаемых от АИН с ШИМ.

Список использованных источников.

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 // Радіоелектроніка. Інформатика. Управління.–2007.–№2.–С.148–151.

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПЕРЕКРУЧУВАНЬ СТАТОРНОЇ НАПРУГИ АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА З ВИХІДНИМИ СИЛОВИМИ ФІЛЬТРАМИ

Зіновкін В.В., Бондаренко В.І., Соломаха О.В.

Анотація - розроблено метод упереджуючої компенсації перекручувань статорної напруги асинхронного двигуна, що внесені вихідними силовими фільтрами, з врахуванням параметрів навантаження. Запропонований метод компенсації перекручувань може застосовуватись для керування всіма типами двигунів, що живляться від АІН із ШІМ. Чисельне моделювання підтвердило працездатність розробленого алгоритму.

RESEARCH OF INFLUENCE OF STATOR VOLTAGE DISTORTION OF ASYNCHRONOUS ELECTRIC DRIVE WITH AN OUTPUT POWER FILTERS

V. Zinovkin, V. Bondarenko, A. Solomakha

Summary

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 used for control of all kind of motors, powered by VSI with PWM. Numerical modeling of serviceability of the designed algorithm has confirmed.