

УДК 621.316

Исследование активного фильтро-компенсирующего устройства с общим звеном постоянного тока

В.Н. Мещеряков, М.М. Хабибуллин, И.С. Павлов
ФГБОУВПО «Липецкий государственный технический университет», г. Липецк, Российская Федерация
E-mail: mesherek@stu.lipetsk.ru, maximum@rambler.ru, pavlovigorep@ya.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса: С увеличением количества нелинейных потребителей электроэнергии в современном автоматизированном электроприводе проблема снижения качества электроэнергии в питающих сетях становится весьма актуальной. Повышение качества электроэнергии возможно за счет создания фильтро-компенсирующих устройств с новыми конструктивными и технологическими решениями.

Материалы и методы: Создание силовой структуры активного фильтро-компенсирующего устройства осуществлено за счет объединения звена постоянного тока инвертора фильтро-компенсирующего устройства и инвертора нелинейного потребителя электроэнергии. При построении системы управления разработанного устройства использован частотно-временной метод. Исследование разработанного активного фильтро-компенсирующего устройства проведено при помощи компьютерного моделирования и лабораторной установки.

Результаты: Разработано активное фильтро-компенсирующее устройство с общим звеном постоянного тока и системой управления на основе частотно-временного метода для компенсации гармонических искажений тока и реактивной мощности нелинейных потребителей электроэнергии. Результаты, полученные при исследовании компьютерных моделей и лабораторной установки, показали, что разработанное активное фильтро-компенсирующее устройство позволяет практически полностью компенсировать потребление реактивной мощности и снизить гармонические искажения тока более чем на порядок.

Выводы: Разработанное активное фильтро-компенсирующее устройство может быть использовано для повышения качества электроэнергии за счет компенсации гармонических искажений и реактивной мощности преобразователей частоты в автоматизированном электроприводе переменного тока.

Ключевые слова: качество электроэнергии, электромагнитная совместимость, гармоники тока, реактивная мощность, активный фильтр.

A study of the active filter-compensation device with a common DC link

V.N. Meshcheryakov, M.M. Khabibullin, I.S. Pavlov
Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russian Federation
E-mail: mesherek@stu.lipetsk.ru, maximum@rambler.ru, pavlovigorep@ya.ru

Abstract

Background: As the number of nonlinear power consumers produced by modern automated electric drives increases, it becomes quite urgent to solve the problem of electric power quality reduction in supply systems. The quality of electrical power can be improved by creating filter-compensation devices with new design and technological solutions.

Materials and methods: The power structures of the active filter-compensation device were constructed by combining the DC-link of a filter-compensation device inverter and a nonlinear energy consumer inverter. The time-frequency method was used for the developed device implementation. The study of the developed active filter-compensation device was conducted with the help of computer simulation and laboratory setup.

Results: An active filter-compensation device has been designed with a common DC link and a control system based on the time-frequency method for compensation of harmonic current distortion and reactive power of non-linear consumers. The results obtained by studying computer models and laboratory bench have shown that the developed active filter-compensation device can almost completely compensate for the consumption of reactive power and reduce harmonic current distortion by more than an order of magnitude.

Conclusions: The designed active filter-compensation device can be used to improve the power quality by compensating for harmonics and reactive power of the frequency converters in the automated AC electric drive.

Key words: power quality, electromagnetic compatibility, current harmonics, reactive power, active filter.

DOI: 10.17588/2072-2672.2016.1.044-051

В результате перехода промышленного сектора экономики на использование современных высокотехнологичных и энергоэффективных типов регулируемого автоматизированного электропривода значительно выросла доля электроприводов переменного тока на основе преобразователей частоты (ПЧ) и асинхронных электро-

двигателей с короткозамкнутым ротором (АД). С точки зрения взаимодействия с питающей сетью система «ПЧ–АД» является одним из главных источников нелинейных искажений токов и напряжений и потребителей реактивной мощности, что оказывает негативное влияние как на питающую сеть в целом, так и на других потребителей

электроэнергии в частности, и приводит к значительным экономическим убыткам [1].

Большая часть ПЧ регулируемого асинхронного электропривода переменного тока имеет двухзвенную структуру на основе полупроводникового выпрямительного устройства и инвертора. Поэтому в качестве нелинейной нагрузки будем рассматривать вентильный преобразователь. Для анализа влияния полупроводниковой нелинейной нагрузки на питающую сеть в программной среде Matlab 8.1 разработана компьютерная модель трехфазного неуправляемого мостового выпрямителя и смоделирована его работа на активно-индуктивную нагрузку. Параметры питающей сети и нагрузки, используемые при компьютерном моделировании следующие: $U = 380$ В, $f = 50$ Гц, $R_L = 4,5$ Ом, $L_L = 1 \cdot 10^{-4}$ Гн, $C_d = 3 \cdot 10^{-2}$ Ф. Характеристики, полученные при компьютерном моделировании, представлены на рис. 1.

Согласно графикам на рис. 1, между кривыми тока и напряжения имеется сдвиг между фазами, т. е. нелинейная нагрузка потребляет из питающей сети реактивную мощность. Анализ гармонического состава тока показывает, что суммарный уровень гармонических составляющих равен 37,54 %.

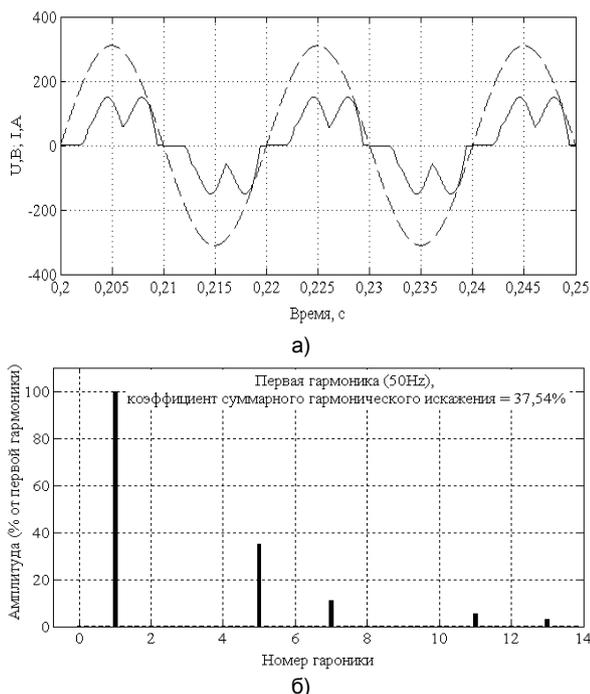


Рис. 1. Графики (а) мгновенного значения тока (сплошная линия) и напряжения (пунктирная линия) фазы А мостового выпрямителя и спектральный анализ (б) тока фазы А мостового выпрямителя

Поскольку нелинейные искажения в питающей сети в большинстве случаев возникают в результате работы нелинейных нагрузок потребителей, то потребители с нелинейными нагрузками должны компенсировать влияние своего электрооборудования на питающую сеть.

Существуют три основные группы методов повышения качества электроэнергии:

1) рационализация электроснабжения (повышение мощности сети и питание нелинейных потребителей повышенным напряжением);

2) улучшение структуры потребителей электроэнергии (обеспечение номинальной загрузки двигателей, использование многофазных схем выпрямления);

3) использование устройств коррекции качества (регуляторов одного или нескольких показателей качества электроэнергии или связанных с ними параметров потребляемой мощности).

Экономически наиболее предпочтительной является третья группа устройств коррекции качества электроэнергии, так как изменение структуры питающей сети и ее потребителей ведет к значительным затратам.

В настоящее время наиболее эффективными устройствами коррекции качества электроэнергии путем компенсации нелинейных искажений и реактивной мощности являются активные фильтры электроэнергии (АФЭ). Существующие АФЭ имеют сложные силовые структуры и системы управления на основе косвенных методов определения требуемого тока, что повышает стоимость АФЭ, снижает их надежность и качество компенсации АФЭ нелинейных искажений и реактивной мощности [2–4]. В связи с этим разработана и исследована АФЭ, адаптированного для работы в системе «ПЧ–АД», исключающего недостатки существующих АФЭ, обеспечивающего высокое качество компенсации нелинейных искажений и реактивной мощности и повышающего электромагнитную совместимость системы «ПЧ–АД» с питающей сетью, является актуальной задачей [5–7].

АФЭ, применяемые в настоящее время, состоят из автономного инвертора напряжения (АИН) на полностью управляемых силовых ключах (IGBT транзисторах) и накопительной емкости, подключенной к звену постоянного тока АИН. Однако большинство ПЧ, имеющих двухзвенную структуру, уже содержат в своем составе накопительную емкость в звене постоянного тока. Поэтому предлагается использовать АФЭ, в котором звено постоянного тока АИН АФЭ и звено постоянного тока ПЧ будут объединены. Такое техническое решение позволит исключить накопительную емкость из силовой структуры АФЭ, а также упростить систему управления АФЭ. Для реализации АФЭ с общим звеном постоянного тока целесообразно использовать систему управления на основе релейного регулятора тока (РРТ) и алгоритма управления, сочетающего в себе преимущества частотного и временного методов управления АФЭ. Такая система управления сможет характеризоваться простотой реализации, стабильностью работы, высоким быстродействием и возможностью поддержания заданной величины тока в широком диапазоне нагрузок.

Основной задачей при разработке АФЭ с общим звеном постоянного тока является построение системы управления АФЭ на основе

баланса мощности потребляемой нелинейной нагрузкой из питающей сети переменного тока и мощности, выдаваемой в звено постоянного тока, а также согласование уровней напряжения на выходе АИН АФЭ и питающей сети.

Структурная схема «ПЧ–АД – АФЭ с общим звеном постоянного тока» показана на рис. 2. В качестве согласующего элемента между выходом АИН АФЭ и питающей сетью использован повышающий трансформатор.

Предлагаемая система управления АФЭ состоит из следующих элементов: Д1 (трехфазный датчик напряжения); Д2 (трехфазный датчик тока); Д3 (датчик постоянного тока); БВН (блок вычисления основной гармоники напряжения сети); БВТ (блок вычисления требуемого тока системы «АФЭ – ПЧ–АД»); РРТ (блок регулирования выходного тока АФЭ).

Несинусоидальное напряжение питающей сети содержит основную гармонику $u_{c(1)}(t)$ и высшие гармоники $u_{c(n)}(t)$ напряжения:

$$u_c(t) = u_{c(1)}(t) + \sum_{n_{\min}}^{n_{\max}} u_{c(n)}(t), \quad (1)$$

где n_{\min} – минимальный порядок гармоники тока; n_{\max} – максимальный порядок гармоники тока.

Ток, потребляемый из питающей сети системой «ПЧ–АД», также содержит основную гармонику $i_{H(1)}(t)$ и высшие гармоники $i_{H(n)}(t)$ тока:

$$i_H(t) = i_{H(1)}(t) + \sum_{n_{\min}}^{n_{\max}} i_{H(n)}(t). \quad (2)$$

Высшие гармоники напряжения питающей сети $u_{c(n)}(t)$ и тока системы «ПЧ–АД» $i_{H(n)}(t)$ можно представить в следующем виде:

$$u_{c(n)}(t) = \sum_{n_{\min}}^{n_{\max}} U_{cm(n)} \cdot \sin(\omega_n t + \psi_n); \quad (3)$$

$$i_{H(n)}(t) = \sum_{n_{\min}}^{n_{\max}} I_{cm(n)} \cdot \sin(\omega_n t + \psi_n - \varphi_n), \quad (4)$$

где $U_{cm(n)}$ – амплитуда напряжения питающей сети; $I_{cm(n)}$ – амплитуда тока, потребляемого из се-

ти; $\omega_n t$ – частота; ψ_n – начальная фаза; φ_n – угол сдвига фаз.

Ширина частотного диапазона, в пределах которого АФЭ будет компенсировать нелинейные искажения первичного тока нелинейного потребителя электроэнергии, зависит от минимального n_{\min} и максимального n_{\max} порядка гармоник. Содержание гармонических составляющих тока, начиная со 2-й гармоники тока ($n_{\min} = 2$), будем нормировать аналогично нормированию содержания гармонических составляющих напряжения, т.е. до 40-го порядка ($n_{\max} = 40$).

Для компенсации нелинейных искажений первичного тока системы «ПЧ–АД» АФЭ должен сформировать ток $i_{\phi}^*(t)$, определяемый по выражению

$$i_{\phi}^*(t) = i_{\Sigma(1)}^*(t) - i_H(t) = i_{\Sigma(1)}^*(t) - i_{H(1)}(t) - \sum_{n=2}^{n=40} i_{H(n)}(t) = - \sum_{n=2}^{n=40} i_{H(n)}(t), \quad (5)$$

где $i_{\Sigma(1)}^*(t)$ – задание на полный требуемый ток системы «АФЭ – ПЧ–АД».

Принцип работы АФЭ заключается в формировании на выходе АИН АФЭ мгновенного тока, определяемого сигналом $i_{\phi}^*(t)$, компенсирующего нелинейные искажения тока и реактивную мощность, потребляемые системой «АФЭ – ПЧ–АД» из питающей сети. Задание на полный требуемый ток системы «АФЭ – ПЧ–АД» $i_{\Sigma(1)}^*(t)$ определим на основе метода баланса мощности. В таком случае полная мощность, потребляемая выпрямителем системы «ПЧ–АД» из питающей сети, равна полной мощности постоянного тока на выходе выпрямителя с учетом потерь в выпрямителе системы «ПЧ–АД» и АФЭ. Тогда равенство баланса мощностей системы «АФЭ – ПЧ–АД» будет иметь вид

$$S_1 = S_2 + \Sigma \Delta S, \quad (6)$$

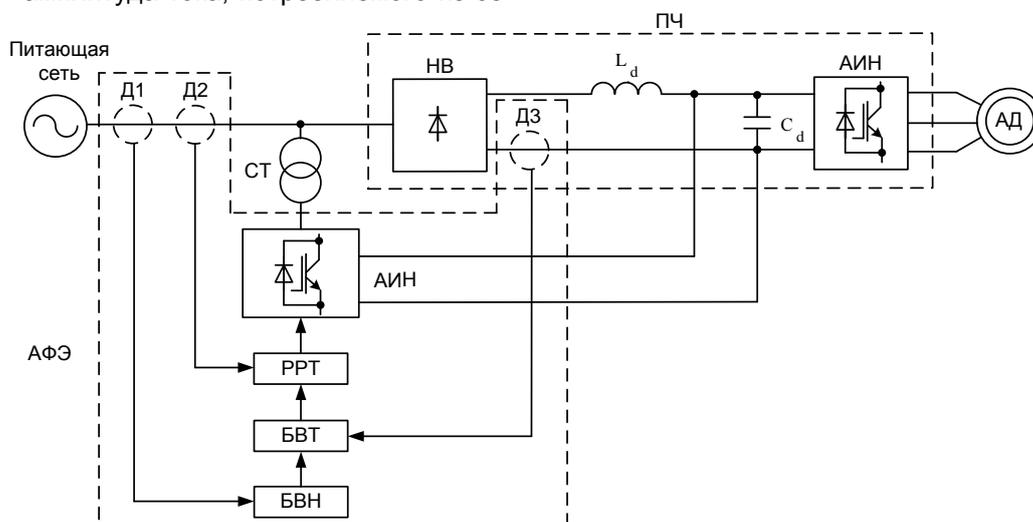


Рис. 2. Структурная схема разработанного АФЭ с общим звеном постоянного тока с системой управления на основе частотно-временного метода с РРТ

где S_1 – полная мощность на входе системы «АФЭ – ПЧ–АД»; S_2 – полная мощность на выходе выпрямителя системы «АФЭ – ПЧ–АД»; ΔS – полная мощность суммарных потерь.

Определим полную мощность S_1 , потребляемую из питающей сети системой «АФЭ – ПЧ–АД». Активная P_1 и реактивная Q_1 мощности, потребляемые из питающей сети системой «АФЭ – ПЧ–АД» составят:

$$P_1 = \sum_{n=2}^{n=40} 3U_{(n)}I_{\Sigma(n)} \cos \varphi_{(n)}; \quad (7)$$

$$Q_1 = \sum_{n=2}^{n=40} 3U_{(n)}I_{\Sigma(n)} \sin \varphi_{(n)},$$

где $U_{(n)}$ – действующее значение фазного напряжения питающей сети; $I_{\Sigma(n)}$ – действующее значение фазного тока, потребляемого из питающей сети системой «АФЭ – ПЧ–АД»; $\varphi_{(n)}$ – угол сдвига фаз между действующим напряжением и током.

Полную мощность S_1 определим по выражению

$$S_1 = \sqrt{P_1^2 + Q_1^2 + T^2} = \sum_{n=2}^{n=40} \sqrt{\left(3U_{(n)}I_{\Sigma(n)} \cos \varphi_{(n)}\right)^2 + \left(3U_{(n)}I_{\Sigma(n)} \sin \varphi_{(n)}\right)^2 + T^2}, \quad (8)$$

где T – реактивная мощность искажения.

Если реактивная мощность Q_1 характеризует процессы, обусловленные взаимодействием одинаковых по частоте гармоник тока и напряжения, то реактивная мощность искажения T характерна только для нелинейных систем и характеризует процессы, обусловленные взаимодействием различных по частоте гармоник тока и напряжения. Исходя из принципа работы АФЭ, система «АФЭ – ПЧ–АД» будет потреблять из питающей сети только основную гармонику требуемого тока и только активную мощность. Тогда первичный ток системы «ПЧ–АД» совпадает по фазе с напряжением сети ($\cos \varphi = 1$) и мгновенную полную мощность на входе системы «АФЭ – ПЧ–АД» определим по выражению

$$S_1 = P_1 = \sum_{n=2}^{n=40} 3U_{(n)}I_{\Sigma(1)} \cos \varphi_{(1)} = \sum_{n=2}^{n=40} 3U_{(n)}I_{\Sigma(1)}, \quad (9)$$

где $I_{\Sigma(1)}$ – действующее значение первой гармоники тока, потребляемого из питающей сети системой «АФЭ – ПЧ–АД».

Мощность, потребляемая системой «АФЭ – ПЧ–АД» из питающей сети, на выходе выпрямителя будет иметь чисто активный характер $S_2 = P_2$:

$$P_2 = \sum_{n=2}^{n=40} k_u U_{(n)} I_d, \quad (10)$$

где k_u – коэффициент схемы по напряжению (для мостовой шестипульсовой схемы $k_u = 1,35$); I_d – ток на выходе выпрямителя системы «ПЧ–АД».

Потерями $\Sigma \Delta S$ системы «АФЭ – ПЧ–АД» являются потери активной мощности $\Sigma \Delta P$ в выпрямителе системы «ПЧ–АД», АИН АФЭ и согласующем трансформаторе:

$$\Sigma \Delta P = \Delta P_B + \Delta P_{\text{и}} + \Delta P_{\text{ст}}, \quad (11)$$

где ΔP_B – потери мощности в полупроводниковых элементах выпрямителя системы «ПЧ–АД»; $\Delta P_{\text{и}}$ – потери мощности в полупроводниковых элементах АИН АФЭ; $\Delta P_{\text{ст}}$ – потери мощности в согласующем трансформаторе АФЭ.

Потери мощности выпрямителя ПЧ ΔP_B и АИН АФЭ $\Delta P_{\text{и}}$ определяем по известным выражениям в зависимости от типов полупроводниковых элементов. Потери мощности согласующего трансформатора составляют

$$\Delta P_{\text{ст}} = \Delta P_x + \Delta P_k \left(\frac{S}{S_{\text{ном}}} \right)^2, \quad (12)$$

где ΔP_x – потери холостого хода трансформатора (определяемые по паспортным данным); ΔP_k – потери короткого замыкания трансформатора; S – полная мощность нагрузки трансформатора; $S_{\text{ном}}$ – полная номинальная мощность трансформатора.

В общем случае суммарные потери $\Sigma \Delta P$ не превышают 3–5 % от полной мощности нагрузки. Для упрощения расчетов в общем виде потери $\Sigma \Delta P$ можно представить как функцию от тока I_d с помощью коэффициента $k_{\Delta P}$. Тогда баланс мгновенной мощности системы «АФЭ – ПЧ–АД» примет вид

$$\sum_{n=2}^{n=40} 3U_{(n)}I_{\Sigma(1)} = \sum_{n=2}^{n=40} k_u U_{(n)} I_d + k_{\Delta P} I_d. \quad (13)$$

Из (13) найдем действующее значение требуемого тока системы «АФЭ – ПЧ–АД», потребляемого из питающей сети:

$$I_{\Sigma(1)}^* = \sum_{n=2}^{n=40} \frac{I_d}{3} \left(k_u + \frac{k_{\Delta P}}{U_{(n)}} \right). \quad (14)$$

Тогда амплитудное значение требуемого тока системы «АФЭ – ПЧ–АД», потребляемого из питающей сети, запишем в виде

$$I_{\Sigma m(1)}^* = \sum_{n=2}^{n=40} \frac{\sqrt{2}}{3} I_d \left(k_u + \frac{k_{\Delta P}}{U_{(n)}} \right). \quad (15)$$

Мгновенные значения требуемых фазных токов системы «АФЭ – ПЧ–АД» запишем в виде

$$\begin{cases} i_{a\Sigma(1)}^*(t) = \sum_{n=2}^{n=40} \frac{\sqrt{2}}{3} I_d \left(k_u + \frac{k_{\Delta P}}{U_{a(n)}} \right) \cdot \sum_{n=1}^{n=\infty} \frac{U_{am(n)} \sin(\omega_n t + \Psi_n)}{U_{am(n)}}, \\ i_{b\Sigma(1)}^*(t) = \sum_{n=2}^{n=40} \frac{\sqrt{2}}{3} I_d \left(k_u + \frac{k_{\Delta P}}{U_{b(n)}} \right) \cdot \sum_{n=1}^{n=\infty} \frac{U_{bm(n)} \sin(\omega_n t + \Psi_n)}{U_{bm(n)}}, \\ i_{c\Sigma(1)}^*(t) = \sum_{n=2}^{n=40} \frac{\sqrt{2}}{3} I_d \left(k_u + \frac{k_{\Delta P}}{U_{c(n)}} \right) \cdot \sum_{n=1}^{n=\infty} \frac{U_{cm(n)} \sin(\omega_n t + \Psi_n)}{U_{cm(n)}}, \end{cases} \quad (16)$$

где $U_{am(n)} = U_{bm(n)} = U_{cm(n)}$ – амплитудные значения фазных напряжений питающей сети; $U_{a(n)} = U_{b(n)} = U_{c(n)}$ – действующие значения напряжений.

Поскольку при разработке системы управления АФЭ напряжение питающей сети считаем несинусоидальным, то полученные значения требуемых фазных токов системы «АФЭ – ПЧ–АД» будут

содержать все гармонические составляющие, содержащиеся в напряжении питающей сети. Тогда рассчитанный полный требуемый ток системы «АФЭ – ПЧ–АД» $i_{\Sigma(1)}^*(t)$ не сможет обеспечить полной компенсации нелинейных искажений и реактивной мощности системы «ПЧ–АД». Мгновенные несинусоидальные фазные напряжения запишем в следующем виде:

$$\begin{cases} u_a(t) = U_{am(1)} \sin(\omega_1 t + \psi_1) + \sum_{n=2}^{\infty} U_{am(n)} \sin(\omega_n t + \psi_n), \\ u_b(t) = U_{bm(1)} \sin(\omega_1 t + \psi_1) + \sum_{n=2}^{\infty} U_{bm(n)} \sin(\omega_n t + \psi_n), \\ u_c(t) = U_{cm(1)} \sin(\omega_1 t + \psi_1) + \sum_{n=2}^{\infty} U_{cm(n)} \sin(\omega_n t + \psi_n). \end{cases} \quad (17)$$

Согласно (17), для исключения влияния гармонических составляющих напряжения питающей сети необходимо устранить все гармонические составляющие, за исключением основной гармоники из сигналов мгновенных фазных напряжений питающей сети. Для осуществления таких преобразований воспользуемся частотным методом на основе быстрого преобразования Фурье и разложим мгновенные несинусоидальные напряжения с датчиков обратной связи по напряжению АФЭ в гармонический ряд, содержащий гармоники напряжения. При этом необходимо учитывать, что увеличение количества рассматриваемых гармоник функции напряжения, раскладываемых в ряд Фурье, приводит к увеличению вычислений и увеличению времени их обработки системой управления АФЭ. Однако, зная частоту основной гармоники напряжения питающей сети, достаточно определить единственную гармонику напряжения. При этом поскольку частота напряжения в системе электроснабжения является системообразующим ПКЭ, то она является практически постоянной, а ее допустимые колебания малы, как следствие, расчет напряжений путем выделения гармоники с частотой питающей сети будет выполнен без существенных погрешностей в точности. Тогда

$$\begin{cases} u_a(t) = u_{a(1)}(t) = U_{am(1)} \sin(\omega_1 t), \\ u_b(t) = u_{b(1)}(t) = U_{bm(1)} \sin(\omega_1 t + 120^\circ), \\ u_c(t) = u_{c(1)}(t) = U_{cm(1)} \sin(\omega_1 t - 120^\circ). \end{cases} \quad (18)$$

Тогда мгновенные значения требуемых фазных токов системы «АФЭ – ПЧ–АД» с учетом полученных мгновенных несинусоидальных фазных напряжений примут вид

$$\begin{cases} i_{a\Sigma(1)}^*(t) = \frac{\sqrt{2}}{3} I_d \left(k_u + \frac{k_{\Delta P}}{U_{a(1)}} \right) \sin(\omega_1 t), \\ i_{b\Sigma(1)}^*(t) = \frac{\sqrt{2}}{3} I_d \left(k_u + \frac{k_{\Delta P}}{U_{b(1)}} \right) \sin(\omega_1 t + 120^\circ), \\ i_{c\Sigma(1)}^*(t) = \frac{\sqrt{2}}{3} I_d \left(k_u + \frac{k_{\Delta P}}{U_{c(1)}} \right) \sin(\omega_1 t - 120^\circ). \end{cases} \quad (19)$$

Таким образом, требуемый полный ток системы «АФЭ – ПЧ–АД» содержит все те же гармоники, что и ток нагрузки, но противофазные ему.

При расчете полного требуемого тока системы «АФЭ – ПЧ–АД» $i_{\Sigma(1)}^*(t)$ примем $U_{a(1)} = U_{b(1)} = U_{c(1)} = U$ и введем коэффициент преобразования

$$k_{\text{пр}} = \frac{\sqrt{2}}{3} \left(k_u + \frac{k_{\Delta P}}{U} \right). \quad (20)$$

Тогда в окончательном виде мгновенные значения требуемых фазных токов системы «АФЭ – ПЧ–АД» запишем как

$$\begin{cases} i_{a\Sigma(1)}^*(t) = I_d k_{\text{пр}} \sin(\omega_1 t), \\ i_{b\Sigma(1)}^*(t) = I_d k_{\text{пр}} \sin(\omega_1 t + 120^\circ), \\ i_{c\Sigma(1)}^*(t) = I_d k_{\text{пр}} \sin(\omega_1 t - 120^\circ). \end{cases} \quad (21)$$

Особенность классической схемы параллельного АФЭ заключается в том, что он является повышающим преобразователем. В таком АФЭ ко входу АИН подключена накопительная емкость, а к выходу – индуктивность и питающая сеть. Тогда величина напряжения в звене постоянного тока АИН АФЭ выше, чем величина средневыпрямленного напряжения в звене постоянного тока нелинейной нагрузки. Если звено постоянного тока АИН АФЭ и звено постоянного тока нелинейной нагрузки объединить, то ЭДС самоиндукции синхронизирующей индуктивности L_Φ , возникающей при переключении ключей АИН АФЭ, становится недостаточно для заряда конденсаторной батареи C_d звена постоянного тока до уровня напряжения, превышающего средневыпрямленное напряжение мостового выпрямителя. Поэтому для функционирования разработанного параллельного АФЭ необходимо обеспечить согласование уровня напряжения в звене постоянного тока и уровня напряжения в питающей сети таким образом, чтобы АФЭ мог не только потреблять мощность из питающей сети, но и отдавать ее обратно в питающую сеть. Для согласования уровня напряжения с выхода АИН с уровнем напряжения в питающей сети используется согласующий трансформатор.

Согласующий трансформатор выбирается исходя из обеспечения условия

$$U_d > U_{2m}, \quad (22)$$

где U_{2m} – амплитуда напряжения на вторичной обмотке трансформатора.

При таком соотношении ток может протекать от активного фильтра в трансформатор и далее в питающую сеть (при открытии транзи-

стором) в любой момент времени, даже когда напряжение на вторичной обмотке проходит через амплитудное значение. Желательно, чтобы U_d было на 15–20 % больше, чем U_{2m} , чтобы иметь запас по напряжению, так как имеется падение напряжения на трансформаторе. При этом если первичную и вторичную обмотки согласующего трансформатора рассматривать как две индуктивно-связанные и встречно включенные катушки индуктивности, то возможно исключить синхронизирующую индуктивность L_{ϕ} из структуры параллельного АФЭ путем приведения ее индуктивности к индуктивности рассеяния L_s согласующего трансформатора. Определение индуктивности рассеяния обмоток согласующего трансформатора L_s , приведенной к фазе вторичной обмотки, произведем на основе выражения

$$L_s = \frac{x_{TP}}{\omega_1} \approx k_L \frac{sU_d}{(p-1)^2 I_d f_1 B_m} \sqrt{\frac{U_d I_d}{s f_1 B_m}} =$$

$$= L_2 + L_1' = L_2 + L_1 \left(\frac{E_2}{U_1} \right)^2, \quad (23)$$

где k_L – схемы выпрямителя; s – число стержней трансформатора; B_m – амплитуда магнитной индукции в магнитопроводе трансформатора; p – число чередующихся секций обмоток; E_2 – ЭДС вторичной обмотки трансформатора; U_1 – напряжение первичной обмотки трансформатора.

Для определения требуемой емкости конденсаторной батареи C_d ПЧ для АФЭ с общим звеном постоянного тока был произведен расчет требуемой емкости конденсаторной батареи C_{ϕ} классического АФЭ:

$$C_{\phi} = 2 \frac{\int_0^{T/12} (S_u + P_{\Sigma}) dt}{\Delta U_d (\Delta U_d + 2U_d)}, \quad (24)$$

где S_u – мощность искажения, вызывающая изменение напряжения в звене постоянного тока АФЭ; T – период сетевого напряжения; P_{Σ} – полные потери на АИН АФЭ; U_d – напряжение на конденсаторе.

Из проведенного расчета следует, что емкость конденсатора ПЧ линейно зависит от компенсируемой мощности нелинейной нагрузки. В процессе работы АФЭ с общим звеном постоянного тока, в зависимости от состояния ключей АИН ПЧ и АИН АФЭ, возможны два предельных режима работы конденсаторной батареи C_d . В первом режиме требуемая емкость конденсаторной батареи C_d уменьшится по сравнению с расчетной емкостью C_{ϕ} . Во втором режиме требуемая емкость конденсаторной батареи C_d возрастет. Однако емкость конденсаторной батареи C_d в звене постоянного тока ПЧ обычно выбирается исходя из мощности АИН ПЧ и, как правило, составляет не менее 100 мкФ на 1 кВт мощности ПЧ и имеет запас около 20 %. Кроме того, в системе «ПЧ–АД» мощность ПЧ подбирают на одну или несколько ступеней выше номинальной мощности используемого АД, и в большинстве

случаев АД общепромышленных механизмов работают лишь с частичной загрузкой, когда момент на валу АД составляет менее 50 % от номинального момента. При этом основные меры по обеспечению электромагнитной совместимости направлены не на полную компенсацию нелинейных искажений и реактивной мощности системы «ПЧ–АД», а на их снижение до допустимого уровня. Таким образом, емкости звена постоянного тока C_d ПЧ в большинстве случаев использования АФЭ с общим звеном постоянного тока будет достаточно для осуществления компенсации гармонических составляющих тока и реактивной мощности системы «ПЧ–АД» до приемлемого уровня. В случаях же недостаточной емкости конденсатора C_d возможна установка дополнительного конденсатора в звено постоянного тока АИН АФЭ с общим звеном постоянного тока аналогично классическому АФЭ. При этом величина дополнительной емкости конденсатора АИН АФЭ будет меньше величины емкости конденсатора C_{ϕ} классического АФЭ.

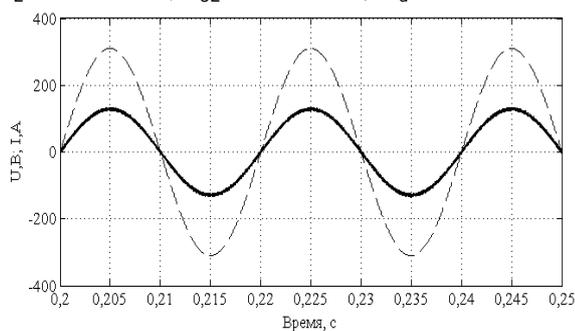
Для работы системы управления АФЭ предельно задается значение гистерезиса РРТ. Уровень гистерезиса определяет скорость отработки задания АФЭ при изменении тока в цепи нагрузки, а также точность отработки заданных значений. В процессе работы на РРТ происходит сравнение мгновенных значений «идеальных» токов нагрузки и мгновенных значений реальных токов нагрузки. На выходе РРТ формируются сигналы управления ключами АИН. Эти сигналы формируют на выходе АИН мгновенные значения тока АФЭ. Мгновенные значения тока АФЭ поступают на повышающий трансформатор. С выхода трансформатора мгновенные значения тока поступают в питающую сеть и компенсируют несинусоидальность токов нагрузки. Таким образом, система «ПЧ–АД – АФЭ с общим звеном постоянного тока» будет потреблять из сети ток с формой, максимально приближенной к синусоиде.

На основе математического описания работы АФЭ в программной среде Matlab 8.1 создана компьютерная модель АФЭ с общим звеном постоянного тока. В качестве нелинейного потребителя используется трехфазный неуправляемый мостовой выпрямитель с активно-индуктивной нагрузкой. Параметры моделирования следующие: $U = 380$ В, $f = 50$ Гц, $R_L = 4,5$ Ом, $L_L = 1 \cdot 10^{-4}$ Гн, $C_d = 3 \cdot 10^{-2}$ Ф, $L_{3L} = 1 \cdot 10^{-4}$ Гн. Результаты, полученные по итогам компьютерного моделирования работы системы «неуправляемый выпрямитель – АФЭ», представлены на рис. 3.

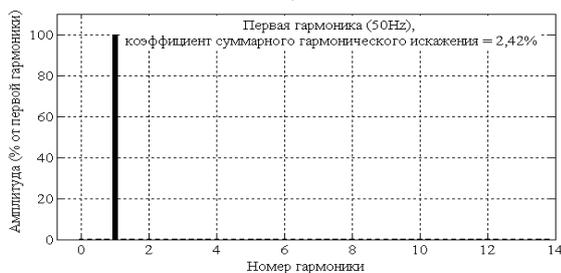
Согласно графикам на рис. 3, кривая тока системы «неуправляемый выпрямитель – АФЭ» имеет синусоидальную форму и совпадает по фазе с напряжением питающей сети. Таким образом, нелинейная нагрузка не потребляет реактивную мощность из питающей сети. Спектральный анализ тока (рис. 3) показывает, что уровень суммарного коэффициента гармонических иска-

жений тока системы «неуправляемый выпрямитель – АФЭ» составляет 2,42 %.

Для экспериментального подтверждения характеристик АФЭ с общим звеном постоянного тока, полученных в результате компьютерного моделирования, была разработана однофазная установка АФЭ с общим звеном постоянного тока и нелинейным потребителем в виде мостового выпрямителя с активно-индуктивной нагрузкой. Параметры экспериментальной установки следующие: $U = 50$ В, $f = 50$ Гц, $R_L = 10$ Ом, $L_L = 1 \cdot 10^{-6}$ Гн, $L_{3L} = 1 \cdot 10^{-5}$ Гн, $C_d = 2 \cdot 10^{-3}$ Ф.



а)



б)

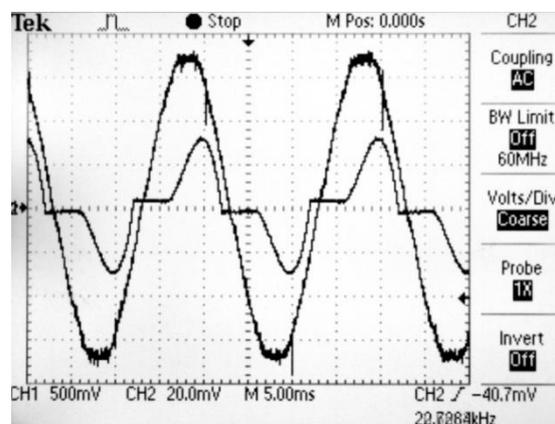
Рис. 3. Графики (а) мгновенного значения тока (сплошная линия) и напряжения (пунктирная линия) фазы А системы «неуправляемый выпрямитель – АФЭ с общим звеном постоянного тока» и спектральный анализ (б) тока фазы А системы «неуправляемый выпрямитель – АФЭ с общим звеном постоянного тока»

Основными элементами экспериментальной установки являются: силовой модуль Mitsubishi PS22054; модуль отладочной платы Mitsubishi 1200V DIP IPM (PS22054) EVALUATION BOARD фирмы Mitsubishi Electric (реализация АИНАФЭ); DSP (Digital signal processor) контроллер Piccolo TMDX28069USB фирмы Texas Instruments (реализация PPT); линейный датчик тока CSLA1CH фирмы Honeywell (измерение переменного тока на входе нагрузки и тока в звене постоянного напряжения); датчик напряжения CSLW6B40M фирмы Honeywell (измерение входного напряжения). Измерения выходных параметров установки производились с помощью осциллографа TDS1002 фирмы Tektronix и мультиметра M890F фирмы Mastech.

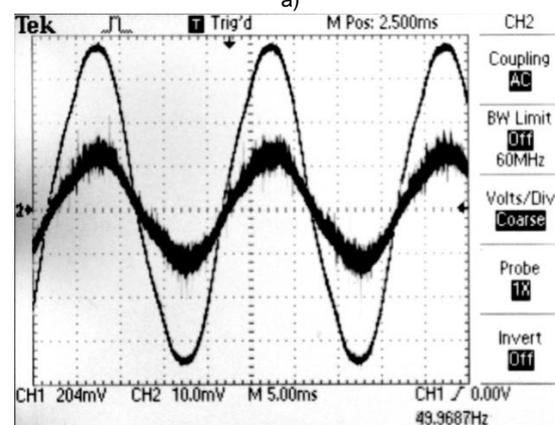
Первоначально с помощью разработанной установки были сняты характеристики входного тока и напряжения нелинейного потребителя при выключенном АФЭ (рис. 4,а). Далее АФЭ установки был включен. Характеристики, полученные при работе системы «неуправляемый выпрями-

тель – АФЭ с общим звеном постоянного тока» приведены на рис. 4,б.

Анализ графиков (рис. 4) показывает, что экспериментальные результаты, полученные с помощью разработанной установки, совпадают с результатами, полученными по итогам компьютерного моделирования, и подтверждают работоспособность АФЭ с общим звеном постоянного тока.



а)



б)

Рис. 4. Графики мгновенного значения тока и напряжения: а – нелинейной нагрузки; б – системы «неуправляемый выпрямитель – АФЭ с общим звеном постоянного тока»

Таким образом, на основании проведенных теоретических расчетов, полученных результатов компьютерного моделирования и экспериментальных результатов можно сделать вывод о том, что разработанные силовая структура АФЭ с общим звеном постоянного тока и система управления АФЭ с расчетом полного требуемого тока системы «АФЭ – ПЧ–АД» методом баланса полной мгновенной мощности, коррекции напряжения питающей сети при помощи быстрого преобразования Фурье (частотно-временной метод), формированием и поддержанием выходного тока АФЭ при помощи PPT позволяют АФЭ:

- функционировать в нормальном режиме работы при несинусоидальном напряжении питающей сети, что повышает работоспособность АФЭ;

- обеспечивать высокое быстродействие и высокую точность компенсации (достигается практически полная компенсация нелинейных

искажений потребляемого тока и реактивной мощности системы «ПЧ–АД»);

– упростить конструкцию АФЭ (исключить из структуры АФЭ накопительную емкость, синхронизирующую индуктивность, устройство предварительного заряда накопительной емкости и систему управления предварительным зарядом накопительной емкости).

Совокупность полученных результатов позволяет рассматривать разработанный АФЭ как эффективное средство компенсации гармонических искажений и реактивной мощности в системе «ПЧ–АД».

Список литературы

1. Жежеленко И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 160 с.

2. Климов В.П. Современные направления развития силовых преобразователей переменного тока // Практическая силовая электроника. – 2007. – № 25. – С. 43–51.

3. Sandeep G.J., Rasoolahammed Sk. Importance of Active Filters for Improvement of Power Quality // International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT). – 2013. – Vol. 4. – P. 1164–1171.

4. Xiaobo F., Dairun Z., Qian S. Hysteresis Current Control Strategy for Three-phase Three-wire Active Power Filter // Automation of Electric Power Systems. – 2007. – Issue 31, vol. 18. – P. 57–61.

5. Мещеряков В.Н., Хабибуллин М.М. Система управления параллельным активным фильтро-компенсирующим устройством на базе релейного регулятора тока в трехфазных электрических сетях // Электротехнические комплексы и системы управления. – 2012. – № 2. – С. 49–54.

6. Мещеряков В.Н., Хабибуллин М.М. Компенсация гармонических искажений и реактивной мощности в однофазных электрических сетях посредством параллельного активного фильтра электроэнергии на базе релейного регулятора тока // Известия высших учебных заведений. Электротехника. – 2013. – № 4. – С. 54–57.

Мещеряков Виктор Николаевич,
ФГБОУВПО «Липецкий государственный технический университет»,
доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой электропривода,
e-mail: mesherek@stu.lipetsk.ru

Хабибуллин Максим Маратович,
ФГБОУВПО «Липецкий государственный технический университет»,
аспирант кафедры электропривода,
e-mail: maximum@rambler.ru

Павлов Игорь Сергеевич,
ФГБОУВПО «Липецкий государственный технический университет»,
аспирант кафедры электропривода,
e-mail: pavlovigorep@ya.ru

7. Мещеряков В.Н., Хабибуллин М.М. Активный фильтр электроэнергии с общим звеном постоянного тока и системой управления на основе релейного регулятора тока // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2014. – № 7. – С. 26–33.

References

1. Zhezhelenko, I.V. *Vysshie garmoniki v sistemakh elektrosnabzheniya prompredpriyatiy* [Higher harmonics in power supply systems of industrial enterprises]. Moscow, Energoatomizdat, 1984. 160 p.

2. Klimov, V.P. *Sovremennye napravleniya razvitiya silovykh preobrazovateley peremennogo toka* [Modern trends in AC power converters development]. *Prakticheskaya silovaya elektronika*, 2007, no. 25, pp. 43–51.

3. Sandeep, G.J., Rasoolahammed, Sk. Importance of Active Filters for Improvement of Power Quality. *International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT)*, 2013, vol. 4, pp. 1164–1171.

4. Xiaobo, F., Dairun, Z., Qian, S. Hysteresis Current Control Strategy for Three-phase Three-wire Active Power Filter. *Automation of Electric Power Systems*, 2007, issue 31, vol. 18, pp. 57–61.

5. Meshcheryakov, V.N., Khabibullin, M.M. Sistema upravleniya parallel'nym aktivnym fil'tro-kompensiruyushchim ustroystvom na baze reley'nogo regul'yatora toka v trekhfaznykh elektricheskikh setyakh [The control system of the parallel active filter-compensation device based on the current relay controller in three-phase electrical networks]. *Elektrotekhnicheskie komplekсы i sistemy upravleniya*, 2012, no. 2, pp. 49–54.

6. Meshcheryakov, V.N., Khabibullin, M.M. Kompensatsiya garmonicheskikh iskazheniy i reaktivnoy moshchnosti v odnofaznykh elektricheskikh setyakh posredstvom parallel'nogo aktivnogo fil'tra elektroenergii na baze reley'nogo regul'yatora toka [Compensation of harmonic distortions and reactive power in single-phase electrical networks with a parallel active electric power filter managed by a current relay controller]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Elektromekhanika*, 2013, no. 4, pp. 54–57.

7. Meshcheryakov, V.N., Khabibullin, M.M. Aktivnyy fil'tr elektroenergii s obshchim zvenom postoyannogo toka i sistemoy upravleniya na osnove reley'nogo regul'yatora toka [Active electric power filter with a common dc link and a control system based on current relay controller]. *Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol', diagnostika*, 2014, no. 7, pp. 26–33.