

УДК 621.341.572

С. К. ПОДНЕБЕННАЯ, В. В. БУРЛАКА (канд. техн. наук, доц.),

С. В. ГУЛАКОВ (д-р техн. наук, проф.)

Государственное высшее учебное заведение

«Приазовский государственный технический университет»

podsvet@gmail.com

ДВУХСТУПЕНЧАТЫЙ СИЛОВОЙ ПАРАЛЛЕЛЬНЫЙ АКТИВНЫЙ ФИЛЬТР

Предложен новый подход к построению активных фильтров, заключающийся в разделении задач подавления гармоник в низко- и высокочастотном диапазонах, что достигается за счет введения в состав активного фильтра дополнительного корректирующего звена, учета запаздывания в интерфейсном фильтре и снижения частоты переключения силовых ключей основного инвертора активного фильтра. Разработан алгоритм управления, позволяющий повысить быстродействие и эффективность активного фильтра.

Ключевые слова: силовой параллельный активный фильтр, передаточная функция, интерфейсный фильтр, дополнительное корректирующее звено, коэффициент нелинейных искажений.

Для решения задачи повышения качества электроэнергии широкое применение получили устройства активной фильтрации, в частности, параллельные активные фильтры (АФ) [1]. Для обеспечения высокой скорости изменения выходного тока АФ частоту переключения силовых ключей его инвертора напряжения (ИН) устанавливают на уровне 20-25 кГц. Работа на высоких частотах приводит к повышенным потерям на переключение, что вызывает необходимость применения специальных высокочастотных коммутационных элементов, которые имеют ограничения по максимальному току и напряжению.

Целью работы является повышение эффективности параллельного АФ за счет снижения частоты переключения и разделения задач подавления гармоник в низко- и высокочастотном диапазонах.

Уменьшение частоты переключения ключей инвертора АФ позволяет уменьшить потери мощности в нем. Кроме того, это дает возможность использовать низкочастотные силовые ключи, имеющие большую надежность и меньшую стоимость при той же установленной мощности АФ. Недостатком такого способа повышения эффективности параллельного АФ является проникновение в сеть помех на частоте переключения, для качественной фильтрации которых требуется усложнение интерфейсного фильтра (ИФ), что, в свою очередь, снижает эффективность подавления высших гармоник тока.

При этом в качестве ИФ использован LCL-фильтр третьего порядка, схема включения которого приведена на рис. 1а. Это позволяет улучшить подавление помех на частоте переключения, о чем свидетельствует увеличенный наклон АЧХ ИФ третьего порядка в области высоких частот (рис. 1б). Для расчета напряжения задания ИН использованы спектральные методы, основанные на быстром преобразовании Фурье (БПФ), что позволяет учесть неравномерность АЧХ ИФ.

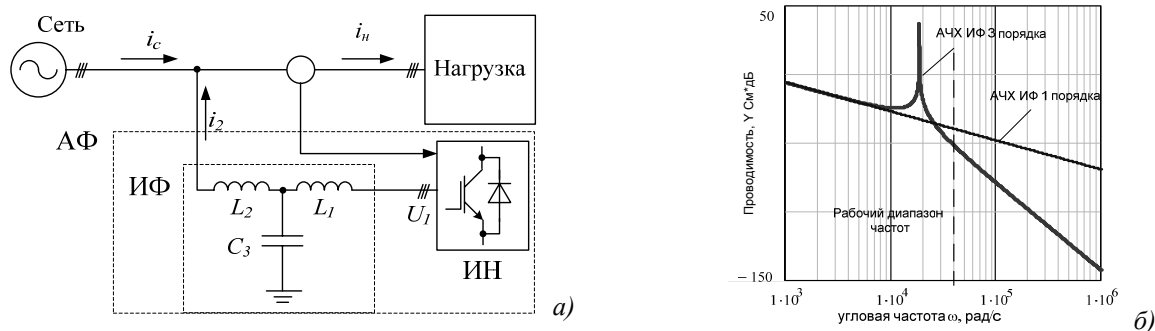


Рисунок 1 - ИФ третьего порядка: а – схема параллельного АФ с ИФ третьего порядка; б – АЧХ ИФ третьего порядка

Ток задания $I_{зад}(j\omega)$, инжектируемый в точке подключения АФ, рассчитывается из условия, что АФ и нагрузка должны представлять по отношению к сети симметричную активную нагрузку с имитируемым сопротивлением R в каждой фазе. Это сопротивление устанавливается из условия баланса мощности:

$$R = \frac{U_{Arms}^2 + U_{Brms}^2 + U_{Crms}^2}{P}, \quad (1)$$

где $U_{Arms}, U_{Brms}, U_{Crms}$ – среднеквадратичные фазные напряжения сети, P – сумма активной мощности нагрузки и мощности потерь в АФ.

© Поднебенная С.К., Бурлака В.В., Гулаков С.В., 2013

Спектр инжектируемого АФ тока $I_{зад}(j\omega)$ рассчитывается следующим образом:

$$I_{зад}(j\omega) = \frac{U_c(j\omega)}{R} - I_n(j\omega), \quad (2)$$

где $U_c(j\omega)$ – спектр напряжения сети, $I_n(j\omega)$ – спектр тока нагрузки.

Компоненты спектра выходного напряжения ИН АФ определяются как:

$$U_1(j\omega) = U_c(j\omega) \cdot (L_1 \cdot C_3 \cdot (j\omega)^2 + 1) + I_{зад}(j\omega) \cdot (L_1 \cdot L_2 \cdot C_3 \cdot (j\omega)^3 + (L_1 + L_2) \cdot j\omega). \quad (3)$$

Выражение (3) позволяет учесть частотную характеристику ИФ в системе управления ИН [2].

Формирование управляющих сигналов ИН осуществлено путем использования ШИМ с треугольной несущей. Опорное напряжение для генератора ШИМ формируется как обратное преобразование Фурье от $U_1(j\omega)$.

Однако, изменение параметров ИФ и импеданса сети может привести к снижению эффективности учета ПФ ИФ параллельного АФ, что выражается в недостаточном подавлении высших гармоник тока и росту его коэффициента нелинейных искажений (КНИ).

В работе предложено решение задачи дальнейшего повышения эффективности параллельного АФ за счет реализации двухступенчатого подхода, который обеспечивается разделением задач подавления высших гармоник тока в низко- и высокочастотном диапазонах. В соответствии с этим в состав АФ введено дополнительное корректирующее звено (ДКЗ) ($E_{кор}$, рис. 2) [1], работающее в режиме источника ЭДС и включенное последовательно с конденсатором C_3 ИФ [3].

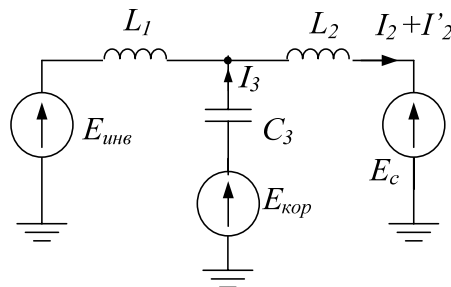


Рисунок 2 - Схема замещения силовой части АФ с подключенным КЛЗ

Главным преимуществом такого включения ДКЗ является возможность снижения уровня его выходного напряжения на порядок, что позволяет выполнить силовую часть ДКЗ с применением MOSFET транзисторов, обладающих лучшими динамическими свойствами по сравнению с IGBT [2].

Величину частичного тока I_2' , который создается ЭДС ДКЗ $E_{кор}$ и протекает в выходной цепи ИФ, формируют таким образом, чтобы устранить ошибку регулирования основного инвертора АФ:

$$I_2' = I_{зад} - I_2, \quad (4)$$

где I_2 – выходной ток АФ при работе без ДКЗ, $I_{зад}$ – ток задания АФ.

При подключении ДКЗ последовательно с конденсатором ИФ коэффициент передачи ИФ относительно ДКЗ определяется следующим образом:

$$K(s) = \frac{I_2'(s)}{E_{кор}(s)} = \frac{L_1 \cdot s}{L_1 \cdot L_2 \cdot s^2 + \frac{L_1}{C_3} + \frac{L_2}{C_3}}. \quad (5)$$

Спектр ЭДС ДКЗ определяется из выражения:

$$E_{кор}(j\omega) = \frac{I_2'(j\omega)}{K(j\omega)}. \quad (6)$$

ЭДС ДКЗ находится как обратное преобразование Фурье от $E_{кор}(j\omega)$.

Для изучения возможностей разработанного параллельного АФ создана модель, имитирующая его работу (рис. 3).

Модель включает описанные выше модификации АФ, в частности, систему управления (СУ) основным инвертором с учетом передаточной функции ИФ и ДКЗ, работающее в режиме источника ЭДС. Параметры модели АФ: несущая частота ШИМ 10 кГц, $L_1 = 3$ мГн, $L_2 = 100$ мкГн, $C_3 = 47$ мкФ, напряжение звена постоянного тока ± 400 В.

Принятые допущения: среднеквадратичное фазное напряжение сети 220 В, в спектре напряжения имеется только первая гармоника, активный фильтр обеспечивает единичный коэффициент мощности, полное сопротивление сети равно нулю.

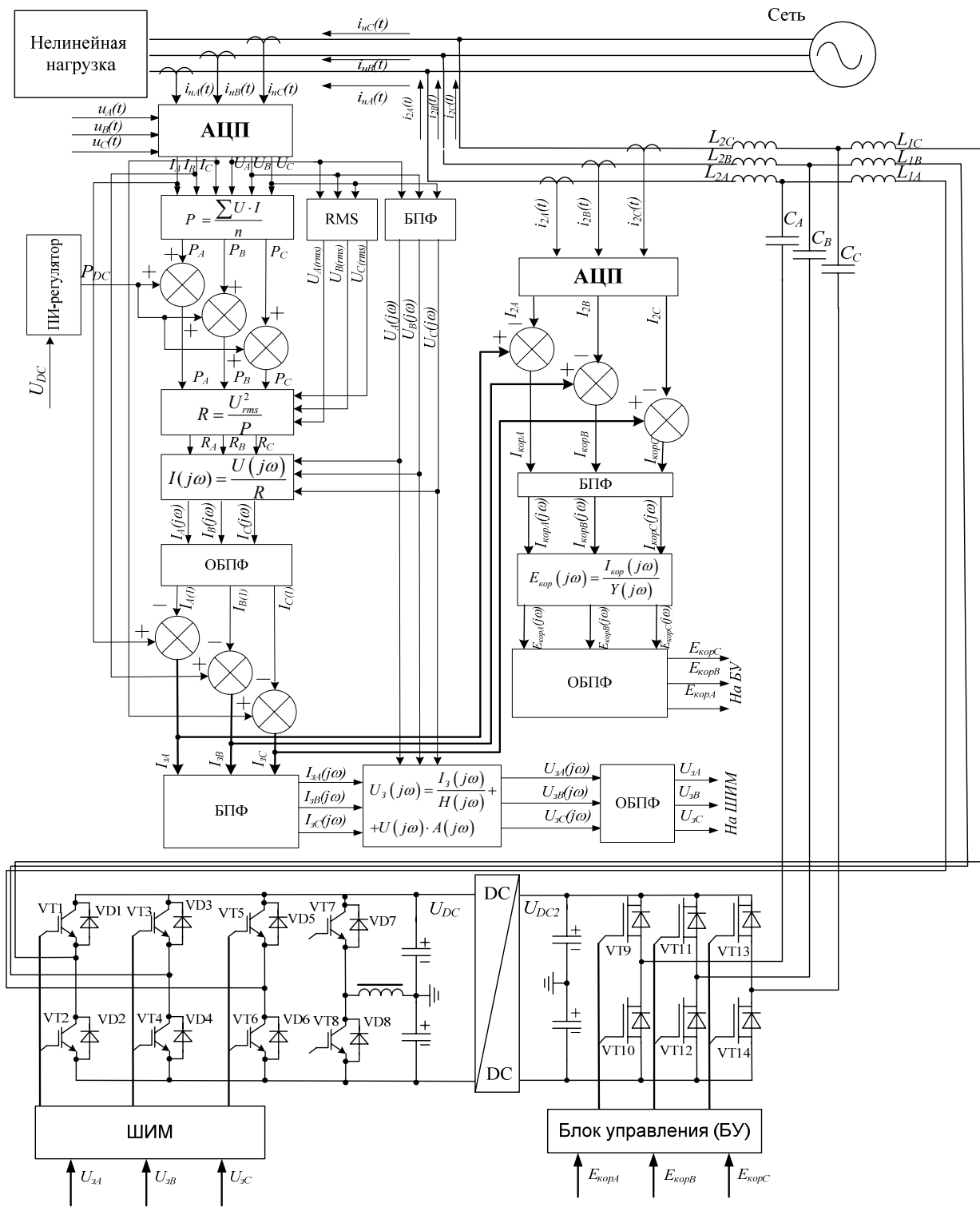


Рисунок 3 – Модель СУ АФ с корректирующим звеном

Экспериментальная проверка работоспособности АФ с корректирующим звеном проведена в лабораторных условиях. АФ собран из трех идентичных фазных модулей, имеющих общий узел измерения и стабилизации напряжения на конденсаторах звена постоянного тока, выполненный на микроконтроллере ATtiny13.

ДКЗ в экспериментальном АФ выполнено в виде корректирующего линейного звена (КЛЗ) – линейного усилителя.

Для минимизации потерь мощности КЛЗ его питание осуществляется от регулируемого DC/DC преобразователя с двухполярным выходом, который также позволяет симметризовать напряжения на конденсаторах звена постоянного тока основного инвертора. Напряжение питания КЛЗ изменяется в процессе работы АФ и устанавливается минимально необходимым по условию сохранения линейного режима работы выходного каскада КЛЗ.

Упрощенная схема АФ для одной фазы приведена на рис. 4.

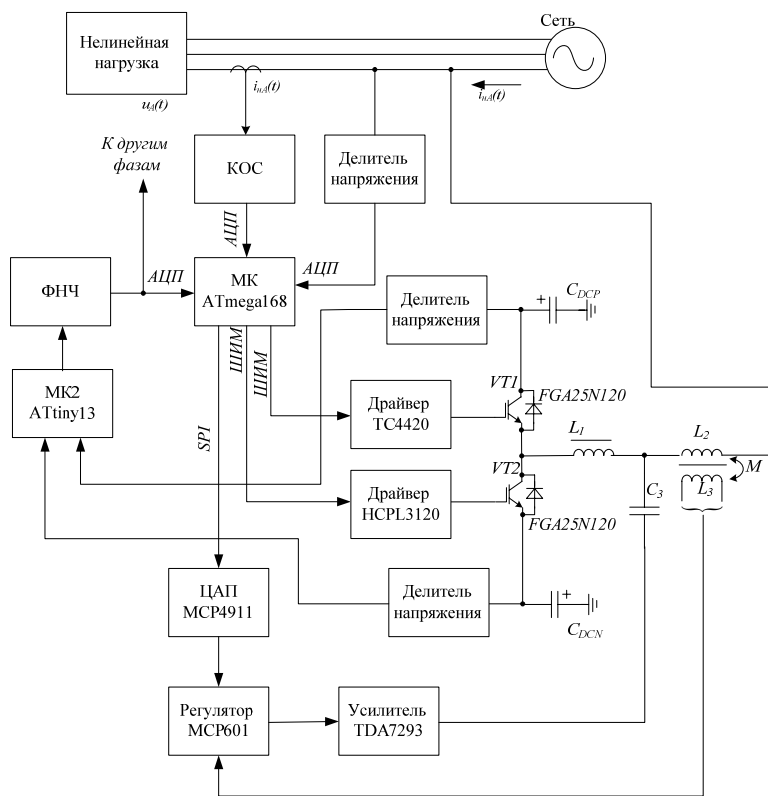


Рисунок 4 – Структурная схема СУ параллельным АФ и его силовой части на одну фазу

АФ испытывался в режимах с включенным и отключенным корректирующим звеном. Осциллограммы токов при работе фильтра приведены на рис. 5. В качестве нелинейной нагрузки использовался шестипульсный выпрямитель с активной нагрузкой. Измерения проводились с использованием токовых клещей-ваттметра Вгруппен ВМ-157 и цифрового осциллографа АКПП-4113/1.

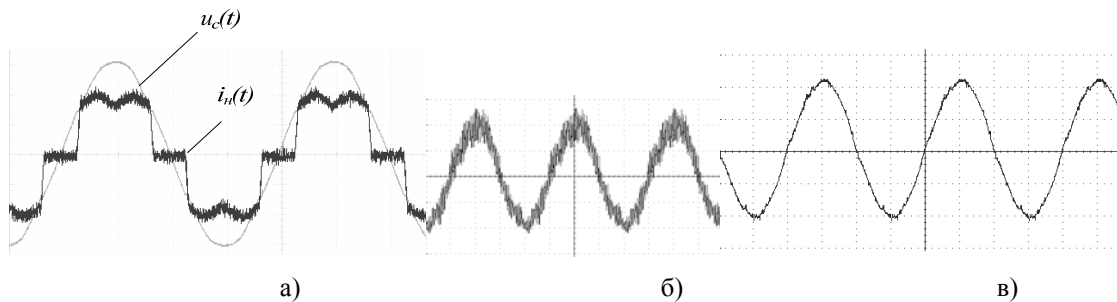


Рисунок 5 – Осциллограммы: а – тока нагрузки, $KНН_{In} = 29\%$ и напряжения сети, $KНН_{Uc} = 2,5\%$; б – токи сети при работе АФ без КЛЗ, $KНН_{Ic} = 6,7\%$; в – токи сети при работе АФ с КЛЗ $KНН_{Ic} = 2,9\%$.

Результаты экспериментов подтвердили корректность теоретических положений, изложенных в работе, и показали соответствие параметров работы АФ расчетным.

Описанные модификации АФ в перспективе дают возможность расширить область применения параллельных АФ с непосредственным подключением к сети среднего напряжения, где на сегодняшний день АФ практически не применяются либо подключаются через согласующий трансформатор. Низкая частота переключения ИН дает возможность использовать в качестве силовых ключей запираемые тиристоры ИГСТ, рабочий частотный диапазон которых не превышает 2 кГц при напряжении 10 кВ. ДКЗ при этом может быть выполнено низковольтным, на уровне 0,4 кВ. При этом возможно построение силовой части АФ с использованием NPC (NeutralPointClamped) инвертора.

Выводы. Разработан и научно обоснован новый подход к расширению полосы подавления и снижения потерь мощности в параллельном АФ за счет снижения частоты переключения силовых ключей ИН, введения в состав АФ дополнительного корректирующего звена и учета запаздывания в ИФ.

Предложен алгоритм управления дополнительным корректирующим звеном, позволяющий повысить быстродействие активного фильтра и улучшить подавление высших гармоник.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Бурлака В.В. Параллельный активный фильтр с повышенным коэффициентом подавления высших гармоник тока / В.В. Бурлака, С.В. Гулаков, С.К. Бублик, М.Д. Дьяченко // Вісник Приазовського державного технічного університету: Зб. наук. пр. Маріуполь. - 2009. – Вип. 19. – С. 237 – 241.
2. Поднебенная С.К. Исследование влияния интерфейсного фильтра на подавление высших гармоник силовым параллельным активным фильтром / С.К. Поднебенная, В.В. Бурлака, С.В. Гулаков // II-я международная научно-практическая конференция [«Физико-технологические проблемы радиотехнических устройств, средств телекоммуникаций, нано- и микроэлектроники»], (Черновцы, 25-27 октября 2012). – Черновцы: Черновицкий национальный университет имени Ю. Федьковича, 2012. – С. 125-126.
3. Поднебенная С.К. Повышение эффективности силового параллельного активного фильтра путем подключения корректирующего линейного звена / С.К. Поднебенная, В.В. Бурлака, С.В. Гулаков // Автоматика та електротехніка: Матеріали Всеукраїнської науково-технічної конференції молодих учених та студентів з міжнародною участю. – Миколаїв: НУК, 2012. – С. 64 – 67.

REFERENCES

1. Burlaka V.V., Gulakov S.V., Bublik S.K., Dyachenko M.D. Shunt Active Filter With Improved Suppression Of High-Order Current Harmonics. Visnik Priazovskogo Derzhavnogo Technichnogo Univercitetu. 2009; 19: 237 – 241.
2. Podnebennaya S.K., Burlaka V.V., Gulakov S.V. Investigation Of Interface Filter's Influence On Harmonic Suppression Efficiency Of Shunt Active Power Filter. Physical And Technological Problems of Radio Engineering Devices, Telecommunication, Nano- and Microelectronics. Proceedings of the II-th International Scientific-Practical Conference. Chernivtsi, Ukraine, Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University. 2012; 125 – 126.
3. Podnebennaya S.K., Burlaka V.V., Gulakov S.V. Improving the Efficiency of Shunt Active Power Filter by Connection Correction Linear Stage. Avtomatika ta Eectrotehnika. Vseukrajinska Naukovo-Tehnichna Konferencija Molodih Uchenih ta Studentiv z Mizhnarodnoju Uchastu (Automatics and Electrotechnics. Ukrainian Scietific-Technical Conference of Young Scientifics and Students with International Participation). Nikolaev. 2012; 64-67.

Надійшла до редакції 28.02.2013

Рецензент: Е.Г. Курінний

С.К. ПОДНЕБЕННА, В.В. БУРЛАКА, С.В. ГУЛАКОВ

Державний вищий навчальний заклад «Приазовський державний технічний університет»

Двоступеневий силовий паралельний активний фільтр. Запропонований новий підхід до побудови активних фільтрів, що полягає в розділенні задач придушення гармонік в низько - та високочастотному діапазонах, що досягається за рахунок введення до його складу додаткової коригувальної ланки, врахування запізнювання в інтерфейсному фільтрі та зниження частоти перемикаць силових ключів основного інвертора активного фільтра. Розроблений алгоритм управління, що дозволяє підвищити швидкодію та ефективність активного фільтра.

Ключові слова: силовий паралельний активний фільтр, передавальна функція, інтерфейсний фільтр, додаткова коригувальна ланка, коефіцієнт нелінійних викривлень.

S. PODNEBENNAYA, V. BURLAKA, S. GULAKOV

State Institution of Higher Education “Priazovsky State Technical University”

Two-Stage Shunt Active Power Filter. A new topology of shunt active power filter (APF) with improved efficiency is proposed. The main feature of proposed APF is that the tasks of eliminating high-order harmonics in low-frequency and high-frequency bands are separated. The power circuit of APF consists of high-power main inverter with reduced switching frequency connected to mains via third-order LCL interface filter with fast AFC roll-off to attenuate switching noise. Additionally, APF contains high-speed low-voltage correction stage coupled to mains via interface filter capacitance. The correction stage greatly reduces APF output current error, increasing effective bandwidth, and further attenuates residual switching noise. Experimental APF prototype is built. APF operates in open-loop mode (only load current is measured). The main inverter is controlled using 10 kHz triangular-carrier PWM, its reference voltage is generated with interface filter's transfer function taken into account (using FFT / IFFT). Correction stage control system is built using negative feedback loop with P-type controller. The usage of different methods for controlling main inverter and correction stage (frequency domain for main inverter, time domain for correction stage) ensures APF stability. Laboratory experiments have shown that residual mains current THD is decreased several times by activating high-speed correction stage. Nonlinear load was represented by a 6-pulse rectifier with active load (current THD was 29 %). With APF, current THD was 6,7 % with correction stage switched off and 2,9 % with correction stage switched on. Voltage THD was 2,5 %, APF control was set to emulate purely active resistance. The use of proposed shunt APF topology allows for creating high-efficiency wide-bandwidth medium-voltage class APFs with direct connection to the mains. Main inverter in this case can be NPC- or multilevel-type employing high-voltage IGCT working with relative low switching frequency (~ 1 kHz), while correction stage can be realized using 1200V-class IGBTs switching at 10-25 kHz.

Key words: shunt active power filter, transfer function, interface filter, additional correction stage, coefficient of nonlinear distortions.