

# Широкополосные силовые фильтры для систем электроснабжения с многофазными преобразователями

В. П. Довгун, Д. Э. Егоров, Н. Р. Прозоров, В. В. Новиков

## Введение

Широкое внедрение новых технологических процессов и систем привело к тому, что значительную часть нелинейных нагрузок крупных промышленных потребителей составляют многофазные статические преобразователи, имеющие большую индуктивность со стороны выпрямленного напряжения. На стороне переменного напряжения такой преобразователь ведет себя как источник гармоник тока.

Одно из преимуществ многофазных преобразователей – малый уровень гармоник в спектре сетевого тока. В идеальных условиях такие преобразователи являются источниками гармоник с порядковыми номерами

$$n = kp \pm 1, \quad (1)$$

где  $p$  – пульсность преобразователя;  $k = 1, 2, \dots$

Гармоники с порядковыми номерами, определяемыми выражением (1), получили название канонических [1, 2] или характеристических [3, 4]. Неканоническими (нехарактеристическими) называют гармоники, порядок которых не соответствует числу пульсаций выпрямленного тока. Спектр тока идеального статического преобразователя содержит только канонические гармоники. Например, для трехфазного мостового преобразователя каноническими являются 5 и 7-я гармоники тока, уровень которых составляет примерно 17 и 11% от уровня основной гармоники. Третья гармоника тока для трехфазного преобразователя является неканонической. Для шестифазного преобразователя, у которого  $p = 12$ , каноническими являются 11, 13, 17 и 19-я гармоники.

В реальных условиях спектры токов многофазных преобразователей содержат как канонические, так и неканонические гармоники, а также интергармоники, частоты которых не кратны частоте основной составляющей. Причиной возникновения неканонических гармоник может быть несимметрия фазных напряжений, разброс характеристик вентилях [1, 2, 6, 7]. Согласно оценкам, приведенным в [7], при несимметрии трехфазных напряжений уровень неканонической 3-й гармоники тока трехфазного мостового выпрямителя может превышать уровень 5-й гармоники. Для шестифазных и двенадцатифазных выпрямителей уровень неканонических 5 и 7-й гармоник может достигать 3-5 % тока основной гармоники [2].

Распространенным средством компенсации высших гармоник в системах электроснабжения с мощными нелинейными нагрузками являются пассивные силовые фильтры. Пассивные фильтры осуществляют одновременно подавление гармоник и компенсацию реактивной мощности, поэтому их часто называют фильтрокомпенсирующими устройствами (ФКУ).

Как правило, пассивное ФКУ содержит узкополосные звенья, обеспечивающие подавление наиболее мощных канонических гармоник, а также широкополосное звено для ослабления гармоник в диапазоне верхних частот (рис. 1).

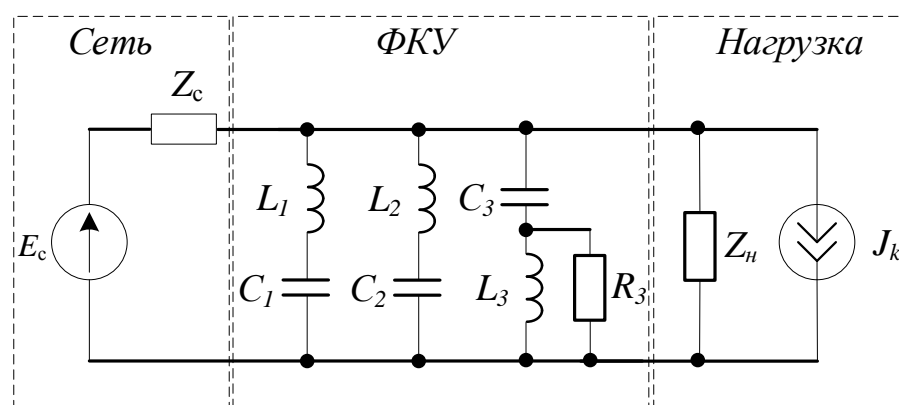


Рис. 1

Пассивное ФКУ, включающее высокочастотные звенья для подавления канонических гармоник, представляет сложную резонансную систему, в которой отдельные ветви образуют параллельные колебательные контуры с индуктивностью сети. Частоты параллельных резонансов системы пассивный фильтр – распределительная сеть чередуются с резонансными частотами отдельных ветвей фильтра. Если резонансная частота параллельного контура близка к частоте одной из неканонических гармоник тока, создаваемых нелинейной нагрузкой, произойдет усиление этой гармоники.

Примеры резонансного усиления неканонических гармоник рассмотрены в [1, 2, 4]. В [2, 4] отмечается, что воздействие неканонических гармоник на распределительную сеть может вызвать серьезные проблемы, если фильтр не содержит звеньев, настроенных на такие гармоники. Поэтому необходимо контролировать частотную характеристику системы «пассивный фильтр-распределительная сеть» во всем диапазоне, включая участки, на которых могут возникнуть неканонические или интергармоники. Это можно осуществить с помощью широкополосных фильтров (ШПФ), демпфирующих резонансные режимы в контурах, образуемых ФКУ и распределительной сетью.

Компенсирующие устройства для многофазных преобразователей на основе широкополосных фильтров рассмотрены в [1, 3, 5]. Однако методы расчета,

рассмотренные в этих работах, позволяют проектировать только фильтры 2 - 3 порядка. Такие фильтры имеют невысокую избирательность частотной характеристики. Следствием этого являются значительные потери мощности на частоте основной гармоники. Увеличение порядка ШПФ позволит снизить потери и получить требуемые частотные характеристики.

Общий метод расчета широкополосных силовых фильтров произвольного порядка рассмотрен в работах [8, 9]. Он основан на использовании методов синтеза пассивных  $LC$ -фильтров, хорошо разработанных в теории цепей. Это позволяет использовать для расчета ШПФ обширную справочную литературу по проектированию аналоговых фильтров. Ограничение широкополосных фильтров, рассмотренных в [8, 9], заключается в том, что они имеют монотонную частотную характеристику входного сопротивления. Однако мощности гармоник в полосе ослабления фильтра могут значительно различаться. Поэтому при расчете ШПФ необходимо учитывать относительный уровень спектральных составляющих тока, создаваемых нелинейной нагрузкой, а также частотные характеристики внешней сети.

В настоящей статье рассмотрена процедура расчета ШПФ произвольного порядка, обеспечивающих минимальное действующее значение высших гармоник, передаваемых многофазным преобразователем во внешнюю сеть. Предлагаемый метод основан на оптимизации частотной характеристики фильтра в пространстве параметров реактивных элементов. Проведен сравнительный анализ характеристик широкополосных фильтров 3 – 5 порядка. Рассмотрены примеры расчета широкополосных ФКУ для распределительных сетей с многофазными нелинейными нагрузками.

### Оптимизация характеристик широкополосных фильтров

Рассматриваемый широкополосный фильтр представляет собой односторонне нагруженный  $LC$ -четырёхполюсник лестничной структуры. В качестве примера на рис. 2 показан ШПФ 5 порядка.

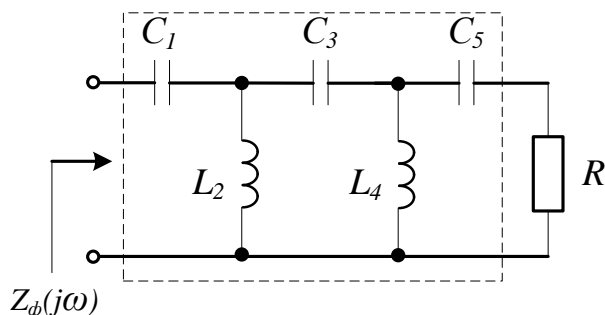


Рис. 2. Широкополосный фильтр 5 порядка

Задача оптимизации формулируется следующим образом: найти значения элементов фильтра, обеспечивающих минимум целевой функции

$$\Phi(\bar{x}) = \sum_{(k)} w_k \frac{|Z_\phi(j\omega_k, \bar{x})|^2}{|Z_\phi(j\omega_k, \bar{x}) + Z_c(j\omega_k)|^2} J_k^2, k = 1, 2, \dots, \bar{x} \in \{L_i, C_i\}, \quad (2, a)$$

при выполнении ограничения:

$$\left( \frac{\operatorname{Re}\left\{\frac{1}{Z_\phi(j\omega_1, \bar{x})}\right\}}{\operatorname{Im}\left\{\frac{1}{Z_\phi(j\omega_1, \bar{x})}\right\}} \right) \leq \eta_0 \quad (2, б)$$

В формулах (2, а, б) приняты следующие обозначения:

$Z_\phi(j\omega_k, \bar{x})$  – входное сопротивление фильтра на частоте  $\omega_k$ ;

$Z_c(\omega_k)$  – сопротивление сети на частоте  $\omega_k$ ;

$J_k$  – действующее значение  $k$ -й гармоники тока;

$w_k$  – весовые коэффициенты, учитывающие важность  $k$ -го слагаемого. Параметр  $\eta_0$  в неравенстве (2, б) определяет допустимое значение отношения активной и реактивной мощностей фильтра на частоте основной гармоники.

Множитель в формуле (2, а) представляет собой коэффициент передачи гармоник тока нелинейной нагрузки во внешнюю сеть:

$$K_I = \frac{|I_{ck}|}{J_k} = \frac{|Z_\phi(j\omega_k, \bar{x})|}{|Z_\phi(j\omega_k, \bar{x}) + Z_c(j\omega_k)|}$$

где  $I_{ck}$  – действующее значение  $k$ -й гармоники тока сети.

Коэффициент  $K_I$  определяет, как изменяются амплитуды гармоник напряжения в точке общего присоединения (ТОП) после включения ФКУ. Напряжение в точке общего присоединения до включения ФКУ

$$U_{\text{топ}} = |Z_c(\omega_k)| J_k .$$

После включения ФКУ напряжение в ТОП

$$U_{\text{топф}} = \frac{|Z_\phi(j\omega_k, \bar{x})| |Z_c(j\omega_k)|}{|Z_\phi(j\omega_k, \bar{x}) + Z_c(j\omega_k)|} J_k .$$

Из последних выражений следует, что отношение напряжений в ТОП до и после включения ФКУ

$$\frac{U_{\text{топф}}}{U_{\text{топ}}} = K_I = \frac{|Z_{\phi}(j\omega_k, \bar{x})|}{|Z_{\phi}(j\omega_k, \bar{x}) + Z_c(j\omega_k)|}.$$

В работе [4] параметр  $K_I$  назван индексом усиления гармоник (*harmonic amplification ratio – HAR*).

Подчеркнем, что конфигурация фильтра и типы элементов в рассматриваемой задаче известны заранее. В процессе оптимизации определяются значения реактивных элементов, обеспечивающих выполнение условий (2). Если весовые коэффициенты в формуле (2, а) равны, рассчитанный фильтр обеспечивает минимальное значение действующего значения гармонических составляющих тока, передаваемых во внешнюю сеть. Выбирая соответствующим образом значения коэффициентов  $w_k$ , можно получить фильтр, осуществляющий селективное подавление определенных гармоник.

Заметим, что целевая функция в формуле (2, а) может быть модифицирована для минимизации действующего значения гармоник напряжения в точке общего присоединения ФКУ и нелинейной нагрузки.

С помощью предложенной процедуры были рассчитаны значения элементов фильтров 3 – 5 порядка для многофазных преобразователей. В качестве начального приближения использовались значения элементов LC-фильтров верхних частот, реализующих передаточную функцию Баттерворта с частотой среза 250 Гц. Оптимизация производилась с помощью функций пакета Optimization Toolbox программного комплекса MatLab. При формировании целевой функции были использованы типовые значения гармоник токов трехфазного и шестифазного выпрямителей, приведенные в стандарте IEEE [10, 11] (табл. 1).

Таблица 1. Спектральный состав гармоник тока, генерируемых многофазными преобразователями (в процентах от основной гармоники).

Число фаз	5	7	11	13	17	19	23	25
3	17,5	11,0	4,5	2,9	1,5	1,0	0,9	0,8
6	2,6	1,6	4,5	2,9	0,2	0,1	0,9	0,8

В табл. 2 приведены значения элементов фильтров 3-5 порядка, предназначенных для компенсации гармоник тока, создаваемых трехфазными выпрямителями. Сопротивление демпфирующего резистора равно 1 Ом.

Таблица 2. Значения элементов широкополосных фильтров 3-5 порядка для сети с трехфазным (шестипульсным) преобразователем.

Порядок $N$	$C_1$ , мкФ	$L_2$ , мГн	$C_3$ , мкФ	$L_4$ , мГн	$C_5$ , мкФ
3	1180	0,28	306	-	-
4	1180	0,267	287	0,732	-
5	1180	0,261	255	0,42	554

Оптимизация характеристик ШПФ для случая шестифазных (12-пульсных) преобразователей показала, что одиночные фильтры 3-5 порядка не обладают достаточной избирательностью, чтобы одновременно ослабить канонические и неканонические гармоники в широком диапазоне частот. В этом случае целесообразно использовать ФКУ, включающие узкополосные и широкополосные звенья. ШПФ осуществляют ослабление групп соседних гармоник. Такая составная структура позволяет уменьшить потери активной мощности на частоте основной гармоники и обеспечивает ослабление как канонических, так и неканонических гармоник. В табл. 3 представлены нормированные параметры двух вариантов широкополосных фильтров, предназначенных для ослабления высших гармоник токов, создаваемых 12-пульсными преобразователями. Первый вариант включает узкополосное звено, предназначенное для подавления 5-й гармоники, и широкополосные звенья 5 и 3 порядка, настроенные на ослабление 7 и 11-й гармоник соответственно. Второй вариант ФКУ содержит узкополосное звено и три ШПФ третьего порядка, настроенных на ослабление 7, 11, 17-й гармоник. Емкости конденсаторов даны в мкФ, индуктивности реакторов – в мГн. Сопротивления демпфирующих резисторов нормированных ШПФ одинаковы и равны 1 Ом.

Таблица 3. Значения элементов широкополосных ФКУ для сети с двенадцатипульсными преобразователями.

Вар	№ звена	Значения элементов (мкФ, мГн)				
		$C_1$	$L_2$	$C_3$	$L_4$	$C_5$
1	2	828	0,218	115	0,14	255
	3	573	0,139	32	-	-
2	2	923	0,208	64	-	-
	3	580	0,132	57	-	-
	4	344	0,094	32	-	-

### Расчет широкополосных фильтров

Значения элементов фильтров-прототипов, представленные в табл. 2, 3, могут служить основой для простой процедуры расчета широкополосных фильтров, имеющих требуемую реактивную мощность. Исходными данными для расчета являются порядок фильтра и его реактивная мощность.

Расчет проводится в следующей последовательности.

1. Вначале определяется емкость конденсатора  $C_{10}$ , обеспечивающего требуемую величину реактивной мощности ФКУ на частоте основной гармоники  $f_1$ :

$$C_{10} = \frac{Q}{2\pi f_1 U^2}.$$

2. На втором шаге определяется сопротивление демпфирующего резистора:

$$R_n = C_1^{(1)} / C_{10}.$$

3. Затем осуществляется денормирование реактивных элементов по уровню сопротивления

$$L_i^{(2)} = R_n L_i^{(1)}; C_i^{(2)} = C_i^{(1)} / R_n.$$

В последних выражениях  $L_i^{(1)}$ ,  $C_i^{(1)}$  - значения параметров нормированного фильтра, имеющего сопротивление демпфирующего резистора, равное 1 Ом.

Рассмотрим примеры расчета широкополосных ФКУ для многофазных статических преобразователей.

*Пример 1.* Необходимо рассчитать фильтрокомпенсирующее устройство для системы регулируемого электропривода буровой установки. Установка подключена к воздушной ЛЭП напряжением 10 кВ. Реактивная мощность одной фазы ФКУ составляет 650 квар. Устройство должно обеспечивать ослабление 5, 7, 11 и 13-й гармоник в спектре тока сети.

Значения элементов широкополосных ФКУ 3 – 5 порядка приведены в табл. 4.

Таблица 4. Значения элементов широкополосных ФКУ 3-5 порядка (к примеру 1).

Порядок $N$	$C_1$ , мкФ	$L_2$ , мГн	$C_3$ , мкФ	$L_4$ , мГн	$C_5$ , мкФ	$R_d$ , Ом
3	52,0	6,35	13,5	-	-	22,7
4	52,0	6,02	12,6	16,5	-	22,7
5	52,0	5,92	11,9	9,53	24,4	22,7

На рис. 3 показаны частотные характеристики модуля входного сопротивления рассчитанных фильтров.

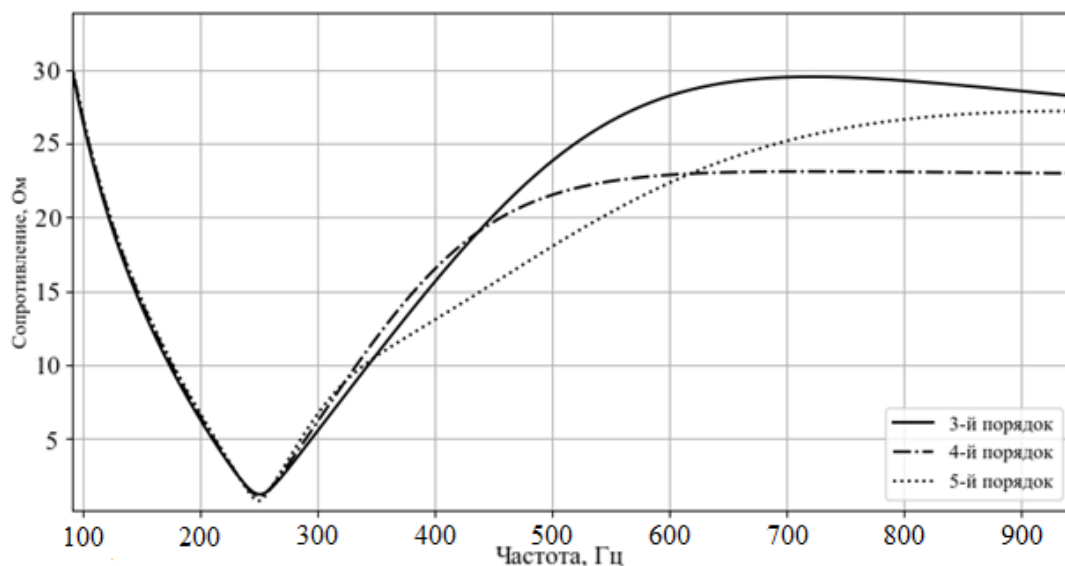


Рис. 3. Частотные характеристики сопротивления широкополосных фильтров 3-5 порядка (к примеру 1)

На рис. 4 показаны частотные характеристики коэффициента передачи токов гармоник во внешнюю сеть при установке широкополосных ФКУ. Параметры сети:  $R_c = 5 \text{ Ом}$ ,  $L_c = 15 \text{ мГн}$ .

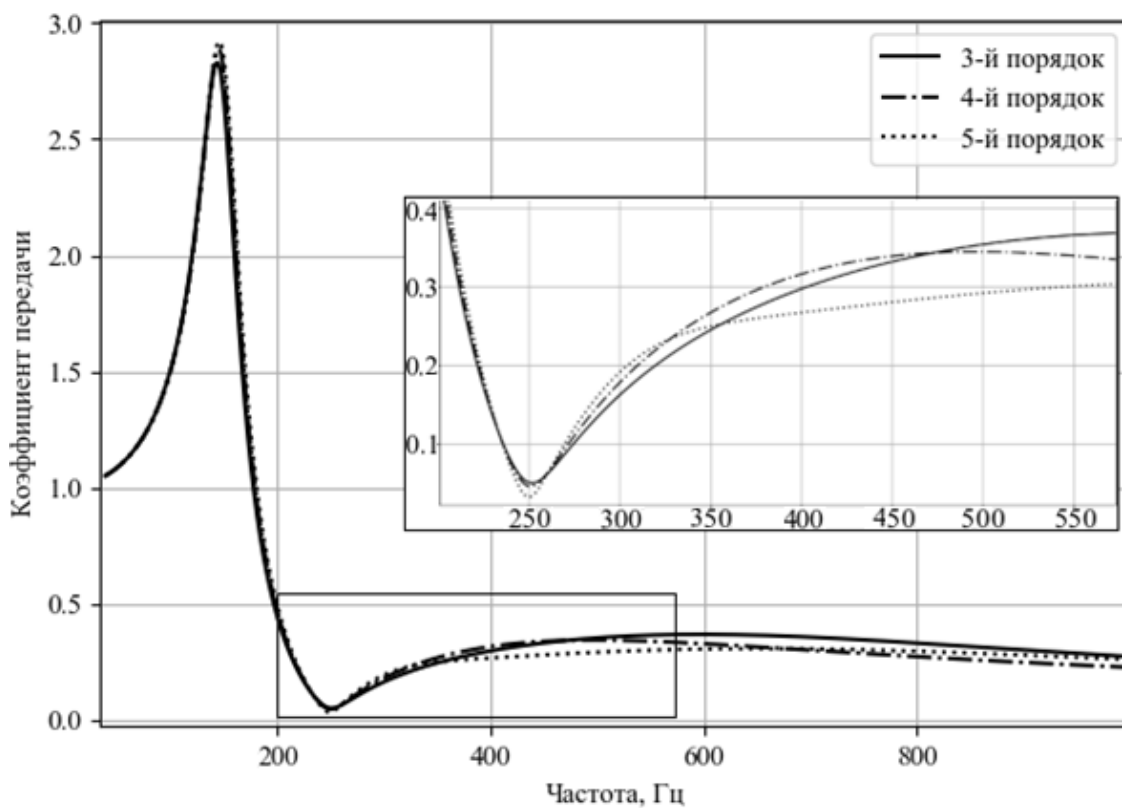


Рис. 4. Коэффициент передачи тока нагрузки во внешнюю сеть (к примеру 1)



В табл. 5 приведены значения гармоник тока во внешней сети (в процентах от основной гармоники) после установки рассчитанных фильтров.

Таблица 5. Значения гармоник токов в сети с трехфазным преобразователем при установке широкополосного фильтра (в процентах от основной гармоники)

Порядок фильтра $N$	Порядковые номера гармоник				
	5	7	11	13	17
Без фильтра	17,5	11,0	4,5	2,9	1,5
3	0,9	2,8	1,65	1,05	0,5
4	0,8	2,9	1,45	0,7	0,35
5	0,6	2,7	1,3	0,86	0,3

Сравнение характеристик показывает, что при увеличении порядка фильтра снижается его сопротивление в полосе ослабления. Это способствует более эффективному ослаблению высокочастотных гармоник. Кроме того, расчеты показывают, что при увеличении порядка снижаются потери мощности в демпфирующем резисторе на частоте основной гармоники.

*Пример 2.* Необходимо рассчитать ФКУ для подстанции металлургического завода. Нелинейной нагрузкой являются 12-пульсные выпрямители. Назначение ФКУ – компенсация реактивной мощности и подавление гармоник, создаваемых выпрямителями. Мощность ФКУ (на фазу) составляет **23,5** Мвар.

В качестве прототипов использованы варианты ФКУ, параметры которых приведены в табл. 3. Значения элементов денормированных фильтров приведены в табл. 6. В обоих вариантах для подавления пятой гармоники используется одинаковый узкополосный фильтр. Емкости конденсаторов даны в мкФ, индуктивности реакторов – в мГн. На рис. 5 показана схема первого варианта фильтра, включающего звенья 2, 5 и 3 порядка.

Таблица 6. Значения элементов ФКУ для сети с двенадцатипульсными преобразователями (к примеру 2)

Вар.	№ звена	Значения элементов					
		$C_1$	$L_2$	$C_3$	$L_4$	$C_5$	$R$
1	1	1,0	433,0	-	-	-	-
	2	2,07	87,2	0,29	56,0	0,64	400
	3	1,43	55,6	0,08	-	-	400
2	1	1,0	433,0	-	-	-	-
	2	1,75	109,8	0,12	-	-	528
	3	1,1	69,7	0,108	-	-	528
	4	0,65	49,6	0,06	-	-	528

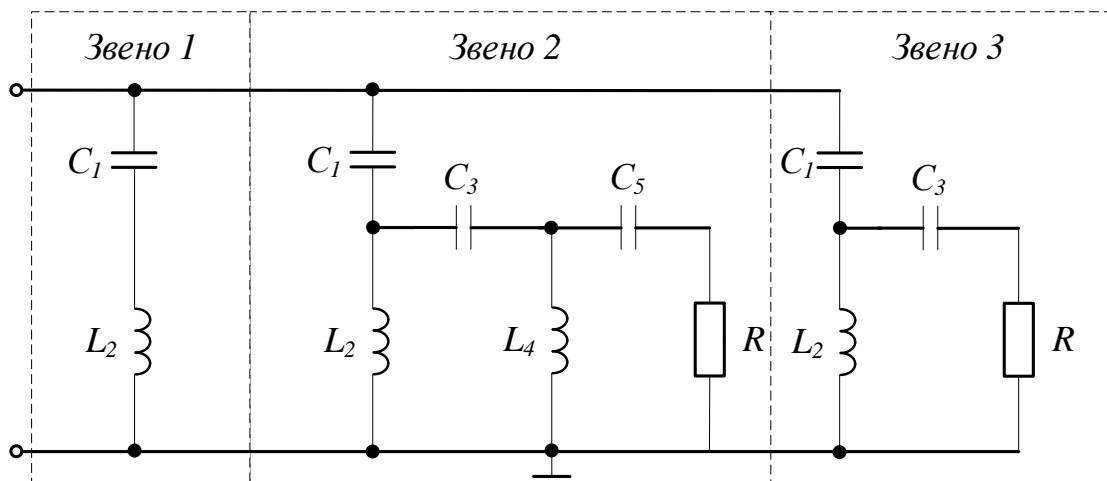


Рис. 5. Схема широкополосного ФКУ (вариант 1)

На рис. 6 показаны частотные характеристики коэффициента передачи тока гармоник во внешнюю сеть. Для сравнения на этом же рисунке приведена частотная характеристика аналогичного ФКУ, рассмотренного в работе [3] (вариант 3). Схема ФКУ, предложенного в [3], показана на рис. 7. Она содержит узкополосное звено для подавления 5-й гармоники и три широкополосных звена второго порядка.

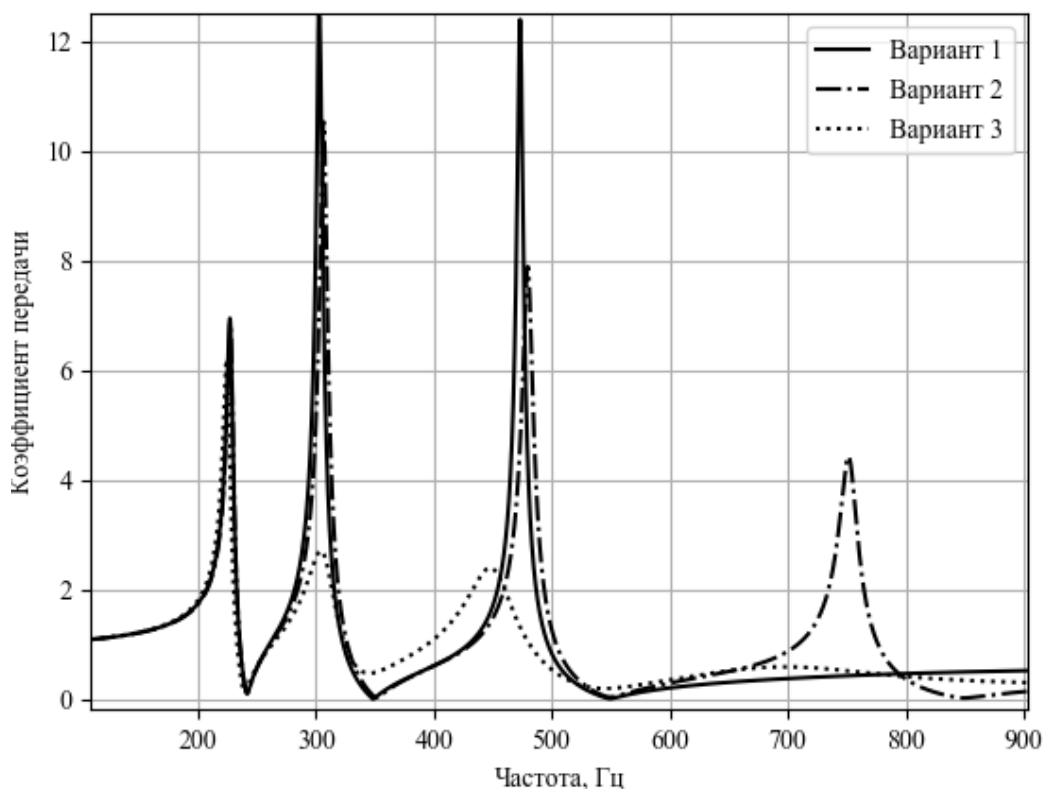


Рис. 6. Частотные характеристики системы ФКУ-внешняя сеть

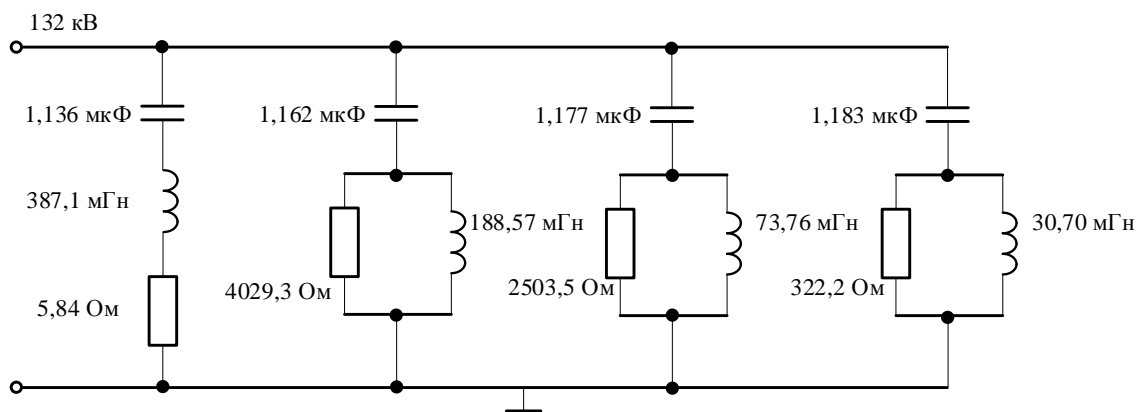


Рис. 7. Схема ФКУ, рассмотренного в [3]

Значения гармоник токов (в процентах по отношению к основной гармонике), передаваемых во внешнюю сеть при установке рассматриваемых вариантов фильтров, приведены в табл. 7.

Таблица 7. Значения гармоник токов, передаваемых в распределительную сеть (к примеру 2)

Схема	$n = 5$	$n = 7$	$n = 11$	$n = 13$	$n = 17$
Без фильтра	2,6	1,6	4,5	2,9	0,2
Вар. 1	1,5	0,1	0,2	1,0	0,1
Вар. 2	1,5	0,05	0,3	1,6	0
Вар. 3	1,5	0,8	0,1	1,6	0,1

Анализ показывает, что предлагаемые широкополосные ФКУ обеспечивают эффективное ослабление канонических и неканонических гармоник, создаваемых многофазными нелинейными нагрузками.

Важным параметром, определяющим эффективность ФКУ, являются потери активной мощности на частоте основной гармоники. Поскольку реактивная мощность ФКУ может быть различной, о величине потерь удобно судить по отношению активной и полной мощностей, т.е. по коэффициенту мощности фильтра. Оценим потери мощности на частоте основной гармоники в демпфирующих резисторах и реакторах ФКУ. В табл. 8 приведены значения коэффициента мощности. Добротность реакторов была принята равной 40.

Таблица 8. Коэффициенты мощности ФКУ на частоте основной гармоники (к примеру 2)

Схема	Коэффициент мощности
Вариант 1	$0,93 \cdot 10^{-3}$
Вариант 2	$0,82 \cdot 10^{-3}$
Вариант 3	$1,26 \cdot 10^{-3}$

Расчеты показывают, что увеличение порядка широкополосных звеньев позволяет значительно уменьшить потери на частоте основной гармонике.

### ***Заключение***

В статье рассмотрен общий метод проектирования широкополосных ФКУ произвольного порядка для сетей с многофазными преобразователями, имеющими нелинейные характеристики. Задача расчета ФКУ рассматривается как задача построения односторонне нагруженного  $LC$ -четырёхполюсника, обеспечивающего передачу минимального действующего значения токов гармоник во внешнюю сеть. Для определения параметров ФКУ использованы методы оптимизации. При расчете учитывается спектр тока нелинейной нагрузки, а также частотные характеристики внешней сети.

С помощью предложенного метода определены параметры нормированных широкополосных фильтров 3-5 порядка. Нормированные фильтры можно использовать в качестве прототипов при расчете ШПФ с требуемыми частотными характеристиками. В этом случае расчет сводится к денормированию элементов по уровню реактивной мощности фильтра.

Примеры расчета, рассмотренные в статье, показывают, что широкополосные ФКУ, синтезированные с помощью предложенного метода, имеют ряд существенных преимуществ перед известными конфигурациями. Увеличение порядка фильтра дает дополнительные возможности для получения требуемых характеристик. ФКУ, спроектированные с помощью предлагаемого метода, обеспечивают подавление как канонических, так и неканонических гармоник. Кроме того, предлагаемые ФКУ имеют малые потери на частоте основной гармонике.

### **Литература**

1. Аррилага, Дж. Гармоники в электрических системах / Дж. Аррилага, Д. Брэдли, П. Боджер.: пер. с англ. – М: Энергоатомиздат, 1990.
2. Жежеленко И. В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий. – 6-е изд., - М., Энергоатомиздат, 2010. – 375 с.
3. Badrzadeh B., Smith K., Wilson R. Designing passive harmonic filters for an aluminum smelting plant. – IEEE trans. on industry applications, Vol. 47, No. 2, 2011, pp. 973-983.
4. Li X., Xu W., Ding T. Damped high passive filter – a new filtering scheme for multipulse rectifier systems. – IEEE trans. on power delivery, Vol. 32, No. 1, 2017, pp. 117-124.
5. Ding T., Xu W., Liang H. Design method for third-order high-pass filter. – IEEE trans. on power delivery, Vol. 31, No. 1, 2016, pp. 402, 403.

6. Chang G., Chen S.-K. An analytical approach for characterizing harmonic and interharmonic currents generated by VSI-fed adjustable speed drivers. – IEEE transactions on power delivery, Vol. 20, No. 4, 2005, pp. 2585-2593.
7. Lee K., Venkataran G., Jahns T. Source current harmonic analysis of adjustable speed drivers under input voltage unbalance and sag conditions – IEEE transactions on power delivery, Vol. 21, No. 2, 2006, pp. 567-576.
8. Довгун В. П., Боярская Н. П., Егоров Д.Э., Синяговский А.Ф. Синтез широкополосных фильтров гармоник. Известия вузов. Проблемы энергетики. 2014, № 5-6, с. 85-91.
9. Синтез фильтрокомпенсирующих устройств для систем электроснабжения: коллективная монография / Н. П. Боярская, В. П. Довгун, Д. Э. Егоров и др.; под ред. В. П. Довгуна. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2014. – 192 с.
10. IEEE guide for harmonic control and reactive compensation of static power converters, IEEE Standard 519, 1981.
11. Peeran S., Cascadden W. Application, design, and specification of harmonic filters for variable frequency drives. – IEEE trans. on industry applications, Vol. 31, No. 4, July/August 1995, pp. 841-247.

## Аннотация

к статье В. П. Довгуна, Д. Э. Егорова, В. В. Новикова **Широкополосные силовые фильтры для систем электроснабжения с многофазными преобразователями**

Многофазные статические преобразователи являются распространенным видом нагрузок крупных промышленных потребителей. Преимуществом таких преобразователей является малый уровень высших гармоник в спектре входного тока. Однако в реальных условиях спектр тока многофазного преобразователя содержит, помимо канонических, неканонические гармоники, а также интергармоники.

Основным средством ослабления высших гармоник, создаваемых мощными нелинейными нагрузками, являются пассивные фильтры гармоник. Как правило, такой фильтр содержит узкополосные звенья, настроенные на частоты канонических гармоник в спектре тока нагрузки. Отдельные звенья фильтра образуют параллельные резонансные контуры с индуктивностью сети. Это может вызвать усиление неканонических гармоник, создаваемых многофазными нелинейными нагрузками.

Эффективность пассивных фильтров можно улучшить, заменив узкополосные звенья широкополосными, обеспечивающими одновременное ослабление нескольких гармоник. Однако в большинстве случаев известные методы позволяют рассчитывать фильтры 2 – 3 порядка. Такие фильтры обладают недостаточной избирательностью, а также имеют значительные потери в демпфирующем резисторе на частоте основной гармоники. Увеличение порядка ШПФ позволит снизить потери в нагрузочном резисторе и получить требуемые частотные характеристики.

В статье рассмотрен общий метод проектирования широкополосных фильтров (ШПФ) произвольного порядка. Задача расчета ШПФ рассматривается как задача построения пассивного  $LC$ -четырёхполюсника, реализующего заданную частотную характеристику входного сопротивления. Предложенный метод основан на минимизации целевой функции в пространстве значений реактивных элементов фильтра. Метод позволяет учесть спектр тока, генерируемого преобразователем, а также частотную характеристику распределительной сети.

С помощью предложенного метода определены значения элементов ШПФ 3-5 порядка. Проведено сравнение характеристик полученных фильтров с известными вариантами. Показано, что предложенные ШПФ имеют существенные технико-экономические преимущества перед известными.

**Ключевые слова:** качество электроэнергии, гармоники, широкополосные пассивные фильтры.

## **Broadband power harmonic filters for distribution systems with multiphase transducers**

**Valery P. Dovgun, Denis E. Egorov, Victor V. Novikov,**

**Abstract:** Multiphase static converters are commonly used for industrial distribution systems. The advantage of a multiphase configuration is a low harmonic emission. However they generate a small amount of noncharacteristic low-order harmonics and interharmonics.

Passive harmonic filters are effective devices for power factor correction and mitigating current and voltage harmonics produced by powerful nonlinear loads. Such filter is composed of narrow-band branches tuned for the most powerful characteristic harmonics. The serious disadvantage of narrow-band filters is that they form a parallel resonant circuit with the distribution system inductance. Parallel resonance may cause amplification of noncharacteristic harmonics, produced by multiphase converters.

The passive filter effectiveness can be improved by using broadband filters (BBF), providing simultaneous attenuation of several harmonics. Unfortunately, in most cases the known design procedures are restricted by the second and third order BBF. Such filters have pure selectivity and considerable fundamental frequency losses in the load resistance. Enhancement of the filter order allows to reduce losses in reactors and the load resistor and to obtain the required frequency response.

This paper presents a general method for the broadband passive filter design. The BBF design problem is considered as a construction of a single-terminated LC-two-port realizing the prescribed transmittance characteristic. The method is based on the objective function minimization defining a total current harmonic distortion. The proposed method takes into consideration transducer current spectrum and frequency characteristic of the distribution system.

Element values of 3-5 order BBF were defined by means of the proposed method. Performance of the new broadband filters have been investigated and compared with example taken from the existing publications. It is demonstrated that the proposed broadband filters have significant technical advantages in comparison with the known variants.

**Key words:** power quality, harmonics, broadband passive filter.

## Сведения об авторах статьи

### «Широкополосные силовые фильтры для систем электроснабжения с многофазными преобразователями»

Довгун Валерий Петрович, доктор технических наук, профессор института космических и информационных технологий Сибирского федерального университета, руководитель научно-учебной лаборатории Информационных систем в энергетике. Член-корреспондент Академии электротехнических наук РФ. Окончил Красноярский политехнический институт в 1977 году. Докторскую диссертацию защитил в 1999 году. Тел.8-913-519-0796, E-mail: [vdovgun@sfu-kras.ru](mailto:vdovgun@sfu-kras.ru).

Егоров Денис Эдуардович, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры Систем автоматизации, автоматизированного управления и проектирования Сибирского федерального университета. Окончил Сибирский федеральный университет в 2012 году по специальности «Информационные системы и технологии (в энергетике)». Кандидатскую диссертацию защитил в 2015 году. Тел.8-923-299-7145, E-mail: [denis.egorov.90@bk.ru](mailto:denis.egorov.90@bk.ru).

Новиков Виктор Валерьевич, кандидат технических наук, доцент института космических и информационных технологий Сибирского федерального университета. Окончил Красноярский государственный технический университет в 2004 году. Кандидатскую диссертацию защитил в 2009 году.

Прозоров Никита Романович, магистрант Сибирского федерального университета. Окончил Сибирский федеральный университет в 2015 году по специальности «Программная инженерия».

Valery P. Dovgun, doctor of technical sciences, professor of Siberian Federal University, the head of scientific and educational laboratory of Information systems in power engineering. Corresponding member of Academy of Electrotechnical Sciences of the Russian Federation. Has graduated from the Krasnoyarsk polytechnic institute in 1977.

Denis E. Egorov, candidate of technical sciences, senior tutor of department of Systems of automatic equipment, automated management and design of Siberian Federal University. Has graduated from Siberian Federal University in 2012.



Victor V. Novikov, Candidate of technical sciences, associated professor of institute of space and information technologies of Siberian Federal University. Has graduated from the Krasnoyarsk state technical university in 2004.

Nikita R. Prozorov, student of Siberian Federal University. Has graduated from Siberian Federal University in 2015.

Dovgun, V.P., Egorov, D.E., Prozorov, N.R. *et al.* Broadband Power Filters for Power Supply Systems with Multiphase Converters. *Russ. Electr. Engin.* **91**, 330–334 (2020). <https://doi.org/10.3103/S106837122005003X>