



МИНИМИЗАЦИЯ ПОТЕРЬ МОЩНОСТИ В ПАССИВНЫХ СИЛОВЫХ ФИЛЬТРАХ

Боярская Н.П.², Довгун В.П.¹, Егоров Д.Э.¹, Новиков В.В.¹, Шандрыгин Д.А.¹

¹Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия

²Красноярский государственный аграрный университет, г. Красноярск, Россия

Резюме: ЦЕЛЬ. Широкополосные силовые фильтры (ШПФ) являются эффективным средством ослабления гармонических искажений и компенсации резонансных режимов в системах электроснабжения, основной нагрузкой которых являются многопульсные полупроводниковые преобразователи и дуговые печи. Недостаток простейших широкополосных фильтров, используемых на практике – большая мощность, потребляемая демпфирующим резистором. Особенно сильно это проявляется в устройствах, предназначенных для ослабления гармоник низкого порядка. МЕТОДЫ. Рассмотрена базовая структура ШПФ в форме односторонне нагруженного четырехполюсника лестничной структуры. Определены требования к структуре фильтров, при которых обеспечиваются малые потери мощности в элементах. Предложен метод проектирования широкополосных демпфирующих фильтров произвольного порядка, основанный на использовании методов многокритериальной оптимизации. РЕЗУЛЬТАТЫ. В статье предложены новые конфигурации широкополосных фильтров лестничной структуры, обеспечивающих требуемую селективность частотных характеристик и потребляющих значительно меньшую активную мощность, чем традиционные схемы, используемые для подавления низкочастотных гармоник. Показано, что известные варианты ШПФ можно рассматривать как частные случаи предложенной структуры. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Предложенные фильтры лестничной структуры целесообразно использовать в промышленных системах электроснабжения, значительную часть нагрузки которых составляют мощные электроприемники с нелинейными характеристиками. Это позволит нормализовать качество электроэнергии и одновременно повысить энергоэффективность компенсирующих устройств.

Ключевые слова: широкополосные пассивные фильтры; характеристические и нехарактеристические гармоники; потери мощности в пассивных фильтрах.

Для цитирования: Боярская Н.П., Довгун В.П., Егоров Д.Э., Новиков В.В., Шандрыгин Д.А. Минимизация потерь мощности в пассивных силовых фильтрах // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2021. Т. 23. № 6. С. 42-52. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-6-42-52.

MINIMIZATION OF POWER LOSSES IN PASSIVE POWER FILTERS

Boyarskaya NP², Dovgun VP¹, Egorov DE¹, Novikov VV¹, Shandrigin DA¹

¹Siberian Federal University Krasnoyarsk Russia

²Krasnoyarsk State Agricultural University, Krasnoyarsk, Russia

Abstract: THE PURPOSE. Broadband passive filters (BBF) are an effective measure to mitigate harmonic resonance in power systems with nonlinear harmonic producing loads. The disadvantage of simple second-order broadband filters are pure selectivity and excessive fundamental frequency losses. This is especially evident in devices designed for low-order harmonics mitigation. This paper presents new broadband filter configurations with superior performances and low fundamental frequency losses. METHODS. A general method of broadband passive filter design is considered. The filter has the form of single-loaded ladder LC-two-port. Conditions of minimal fundamental frequency loss of the filter are determined. RESULTS. This paper presents new broadband filter configurations with superior damping performances and low fundamental frequency losses. Different broadband filter configurations are compared. The results show that 3-5 order broadband ladder filters have better filtering performance and lower power

loss than traditional C-type filters. **CONCLUSION.** The proposed broadband filters can be used for industrial power systems with powerful nonlinear loads. This will normalize the power quality and at the same time improve the energy efficiency of compensating devices.

Key words: broadband passive filters; characteristic and no characteristic harmonics; fundamental frequency power loss.

For citation: Boyarskaya NP, Dovgun VP, Egorov DE, Novikov VV, Shandrigin DA. Minimization of power losses in passive power filters. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2021; 23(6):42-52. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-6-42-52.

Введение

Одной из основных причин низкого качества электроэнергии в системах электроснабжения промышленных предприятий является широкое использование мощных нелинейных и несимметричных нагрузок [1 - 3], значительную часть которых составляют многофазные (многопульсные) полупроводниковые преобразователи, а также дуговые печи, используемые для плавки стали и производства ферросплавов. Несинусоидальные токи, создаваемые нелинейными нагрузками, вызывают искажения напряжения в узлах сети. Под действием несинусоидального напряжения происходит интенсивное старение изоляции электроустановок, увеличиваются потери мощности, возникают перенапряжения в узлах сети.

В идеальных условиях спектр тока на входе полупроводникового преобразователя содержит только характеристические гармоники, порядковые номера которых определяются выражением [4 – 6].

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

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

Согласно формуле (1) при увеличении пульсности преобразователя из спектра тока исключаются мощные низкочастотные гармоники. Однако в реальных условиях входные токи полупроводниковых преобразователей содержат и нехарактеристические гармоники, а также интергармоники, частоты которых не кратны основной частоте. Нехарактеристические гармоники многопульсных преобразователей имеют широкий спектр, включающий низкочастотный диапазон. Причиной их возникновения может быть несимметрия напряжений трехфазной цепи, разброс характеристик ветвей преобразователя, неодинаковые параметры трехфазных мостовых выпрямителей, образующих многопульсную схему [1, 6, 7].

Распространенным средством компенсации искажений в сетях высокого напряжения являются пассивные фильтры гармоник (ПФГ). Как правило, типовая схема ПФГ включает узкополосные звенья, осуществляющие подавления мощных характеристических гармоник, а также широкополосное звено второго порядка для ослабления высокочастотных составляющих в спектре искаженного тока. Частотная характеристика такой системы имеет резонансные максимумы, чередующиеся с частотами настройки звеньев. Это может вызвать усиление нехарактеристических составляющих в спектре искаженного тока, создаваемого преобразователем. Необходимо учитывать также, что спектральный состав искаженных токов и напряжений может изменяться при изменении режима работы нелинейной нагрузки или подключении новых нагрузок.

Таким образом, с помощью ПФГ на основе узкополосных звеньев невозможно обеспечить ослабление широкого спектра гармоник, создаваемых полупроводниковыми преобразователями. Для этого необходимы широкополосные фильтры (ШПФ), обеспечивающие демпфирование резонансных максимумов системы электроснабжения в диапазоне, включающем частоты как характеристических, так и нехарактеристических гармоник.

Широкополосные фильтры гармоник второго порядка рассмотрены в [3, 5, 8, 9]. Недостатки таких фильтров – невысокая избирательность и значительные потери мощности в демпфирующем резисторе. Потери увеличиваются при снижении частоты настройки. По этой причине широкополосные фильтры второго порядка обычно используются для ослабления гармоник высокочастотного диапазона.

Основным средством ослабления низкочастотных гармоник являются узкополосные фильтры и фильтры С-типа [10-14]. Однако расчеты показывают, что и в этом случае значительная часть активной мощности, потребляемой ПФГ, приходится на низкочастотные звенья. При этом преобладают потери в реакторах. Таким образом, необходимы новые

структуры компенсирующих устройств, осуществляющих эффективное подавление низкочастотных гармоник, демпфирование резонансных максимумов и одновременно позволяющих уменьшить потери мощности в элементах фильтра.

В статье рассмотрены новые конфигурации широкополосных демпфирующих фильтров, обеспечивающих требуемую селективность частотных характеристик в заданном диапазоне и потребляющих значительно меньшую активную мощность, чем известные структуры ШПФ.

Литературный обзор

Простейший широкополосный фильтр второго порядка показан на рис. 1. Демпфирующий резистор, включенный параллельно реактору, обеспечивает ослабление гармоник, частоты которых превышают частоту настройки ω_H , на которой сопротивление фильтра минимально.

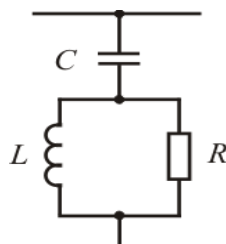


Рис. 1. Широкополосный фильтр второго порядка Fig. 1. Second-order broadband filter configuration

Характеристики и процедура расчета ШПФ второго порядка подробно рассмотрены в работах [8, 9]. На частоте настройки сопротивления реактивных элементов фильтра $X_L(\omega_H) = X_C(\omega_H)$. Модуль частотной характеристики сопротивления широкополосного фильтра имеет минимум на частоте настройки ω_H (рис. 2).

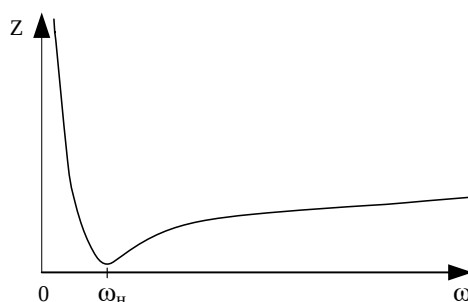


Рис. 2. Частотная характеристика широкополосного фильтра второго порядка Fig. 2. Frequency response of the second-order broadband filter

Форму частотной характеристики фильтра в полосе ослабления, при $\omega > \omega_H$ определяет параметр

$$Q = \frac{R}{\sqrt{L/C}}.$$

Значение этого параметра варьируется от 0,5 до 2 [8]. Большим значениям Q соответствует увеличение селективности фильтра и снижение потерь в демпфирующем резисторе.

Ток k -й гармоники в реакторе

$$I_L(k) = I(k) \frac{R}{R + j\omega L} = I(k) \frac{Q}{\sqrt{Q^2 + (k/n)^2}}.$$

Здесь n – порядковый номер гармоники, соответствующей частоте настройки.

Ток в демпфирующем резисторе

$$|I_R| = \frac{I_L}{Qn}.$$

Согласно [8] потери мощности в резисторе определяются выражением

$$|I_R|^2 R = \frac{I_L^2}{Qn} X_L.$$

В соответствии с последним выражением мощность, потребляемая демпфирующим резистором на частоте основной гармоники, максимальна, если фильтр настроен на подавление низкочастотных гармоник. Поэтому на практике ШПФ второго порядка используют, как правило, для ослабления высокочастотных гармоник ($n \geq 7$). По этой причине многие авторы называют схему на рисунке 2 фильтром верхних частот [5, 7, 8].

Фильтр С-типа (рис. 3) многие авторы рассматривают как модификацию ШПФ второго порядка. Реактор L и дополнительный конденсатор C_2 образуют последовательный контур, настроенный в резонанс на частоту основной гармоники и шунтирующий демпфирующий резистор на этой частоте. ШПФ второго порядка и фильтры С-типа имеют примерно одинаковые компенсационные характеристики в полосе ослабления. Основное преимущество С-фильтров перед ШПФ 2 порядка – минимальные потери в демпфирующем резисторе на основной частоте.

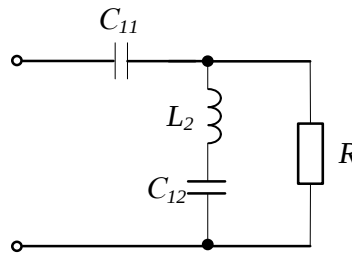


Рис. 3. Фильтр С-типа

Fig. 3. C-type filter

Спектр функций, которые выполняют фильтры С-типа, достаточно широк. Они используются для компенсации реактивной мощности, коррекции частотных характеристик систем электроснабжения, демпфирования переходных процессов, вызванных коммутациями в сети [10 – 16]. Методы расчета фильтров С-типа, предложенные в [10, 11, 13, 15, 16], позволяют получить на их основе многофункциональные устройства, обеспечивающие ослабление характеристических и нехарактеристических гармоник, а также демпфирование резонансных режимов в системе электроснабжения.

В [13, 15] показано, что сопротивление фильтра С-типа имеет индуктивный характер в полосе ослабления, если для емкостей конденсаторов C_1 и C_2 выполняется неравенство

$$C_2 \geq C_1 \frac{\left(\frac{\omega_H}{\omega_1}\right)^2 - 1}{\left(\frac{\omega_H}{\omega_1}\right)^2}.$$

Индуктивность реактора рассчитывается по формуле

$$L = \frac{1}{\omega_1^2 C_2}.$$

Сопротивление резистора определяется из условия

$$X(\omega_1) = 0.$$

Недостаток фильтров С-типа – высокая чувствительность характеристик к вариациям параметров компонентов, вызванных производственными допусками, старением, колебаниями температуры. При отклонениях параметров элементов от номинальных значений потери в демпфирующем резисторе значительно возрастают. Другой недостаток заключается в том, что реактор фильтра, рассчитанного на ослабление низкочастотных гармоник ($n=2,3$) имеет большую индуктивность и, соответственно, большое активное сопротивление. Поэтому в узкополосных схемах и фильтрах С-типа, работающих в диапазоне гармоник низкого порядка, основную часть активной мощности потребляют реакторы.

Для иллюстрации сказанного приведем результаты расчета потерь в реакторах пассивного фильтра, предназначенного для ослабления искажений напряжения на токоприемнике локомотива в тяговой сети 27,5 кВ. Фильтр включает два узкополосных

звена, настроенных на частоты 145 и 240 Гц (рис. 4). Реактивная мощность каждого звена фильтра равна 4 Мвар. Добротности реакторов одинаковы и равны 40. Потери мощности на частоте 50 Гц в первом звене составляют 23,2 кВт, а во втором звене – 11,5 кВт. Таким образом, при одинаковой реактивной мощности потери в низкочастотном звене оказываются в два раза больше.

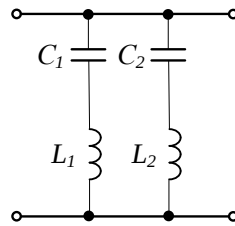


Рис. 4. Фильтр на основе узкополосных звеньев

Fig. 4. Filter with single-tuned branches

Высокие потери имеет и фильтр С-типа, настроенный на ослабление третьей гармоники.

Таким образом, для ослабления гармоник низкого порядка ($n = 2, 3$) необходимы иные конфигурации фильтров, обеспечивающих снижение потребляемой активной мощности не только в демпфирующем резисторе, но и в других элементах схемы, в первую очередь в реакторах.

Материалы и методы. Метод проектирования широкополосных фильтров с минимальными потерями в демпфирующем резисторе

Для получения новых конфигураций широкополосных фильтров используем базовую структуру ШПФ в форме односторонне нагруженного LC-четырёхполюсника (рис. 5). Такая структура ШПФ впервые была предложена в работах [17-19]. Представление широкополосного фильтра в виде реактивного четырёхполюсника позволяет использовать методы оптимального синтеза линейных частотно-избирательных цепей и получить с их помощью новые варианты ШПФ различного порядка с требуемыми характеристиками.

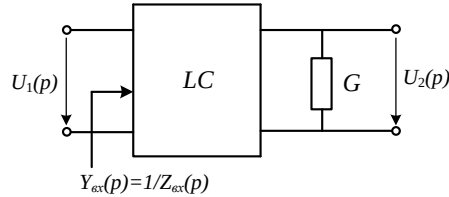


Рис. 5. LC-четырёхполюсник

Fig. 5. LC-two-port

Активная проводимость четырёхполюсника $\text{Re}\{Y_{\text{вх}}(j\omega)\}$ и модуль комплексной передаточной функции $|T_{21}(j\omega)| = \dot{U}_2(j\omega)/\dot{U}_1(j\omega)$ связаны соотношением [17, 19]

$$\text{Re}\{Y_{\text{вх}}(j\omega)\} = G|T_{21}(j\omega)|. \quad (2)$$

В соответствии с формулой (2) требуемую характеристику входной проводимости обеспечивает пассивный LC-фильтр, передаточная функция которого имеет нули в начале координат или на частоте основной гармоники:

$$T_{21}(p) = \frac{p^m}{D(p)}.$$

Здесь $D(p)$ – полином Гурвица.

В качестве примера на рис. 6 представлена схема лестничного ШПФ 5 порядка.

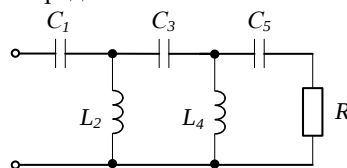


Рис. 6. Лестничный четырёхполюсник 5 порядка

Fig. 6. Ladder 5-th order two-port

Свойства лестничных четырехполюсников подробно рассмотрены в руководствах по синтезу пассивных фильтров [20]. В простейшем случае, когда ветви лестничной LC -цепи составляют одиночные емкостные или индуктивные элементы, нули передаточной функции $T_{21}(p)$ находятся в начале координат или бесконечности. Если поперечная или продольная ветви содержат последовательный или параллельный резонансный контур, то функция $T_{21}(p)$ имеет пару комплексно-сопряженных нулей на мнимой оси. Для снижения потерь в демпфирующем резисторе нули передачи $T_{21}(p)$ должны быть расположены в начале координат или на основной частоте.

Из сказанного следует, что для снижения потерь и уменьшения чувствительности функции входной проводимости можно увеличить порядок фильтра. Другой путь уменьшения потерь – включение в поперечную ветвь последовательного контура, настроенного в резонанс на частоту основной гармоники. На рисунках 7 и 8 показаны схемы широкополосных фильтров третьего и пятого порядка, в которых поперечная индуктивность заменена резонансным контуром. Контур целесообразно включать в первую поперечную ветвь фильтра. Это позволит уменьшить потери не только в демпфирующем резисторе, но и в остальных элементах фильтра.

Нетрудно видеть, что широкополосный фильтр 2 порядка (рис. 2) и фильтр С-типа (рис. 3) представляют собой простейшие варианты ШПФ лестничной структуры. Увеличение порядка фильтра дает возможность повысить селективность его характеристик, уменьшить потери, а также чувствительность к отклонениям значений элементов.

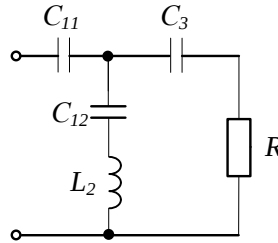


Рис. 7. Широкополосный фильтр третьего порядка с резонансным контуром в поперечной ветви

Fig. 7. Broadband third-order filter with a series resonant circuit in the shunt branch

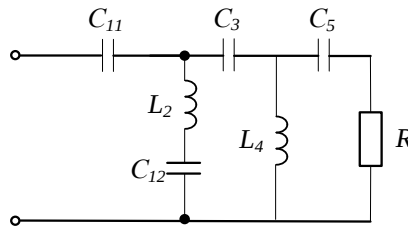


Рис. 8. Широкополосный фильтр пятого порядка с резонансным контуром в поперечной ветви

Fig. 8. Broadband fifth-order filter with a series resonant circuit in the shunt branch

Как правило, для расчета широкополосных фильтров второго порядка используются аналитические методы. Однако при увеличении порядка фильтра расчетные соотношения становятся слишком громоздкими, и в этом случае целесообразно использовать методы оптимального синтеза частотно-избирательных цепей.

Задачу синтеза ШПФ, имеющего требуемые компенсационные характеристики, будем рассматривать как задачу определения параметров реактивного четырехполюсника, при которых целевая функция

$$\Phi(\bar{x}) = \frac{|Z_\phi(j\omega_k, \bar{x}) Z_c(j\omega_k)|^2}{|Z_\phi(j\omega_k, \bar{x}) + Z_c(j\omega_k)|^2} J_k^2 =$$

$$\min, k = 1, 2, \dots, \bar{x} \in \{L_i, C_i\}$$

Широкополосный фильтр, имеющий минимальное значение критерия, определяемого выражением (3), обеспечивает снижение суммарного коэффициента гармоник напряжения в точке подключения нелинейной нагрузки. В процессе минимизации критерия (3)

учитывается влияние внешней сети на характеристики фильтра. Активная мощность, фильтра регулируется с помощью ограничения-неравенства

$$\frac{\operatorname{Re}\{Y_{\text{вх}}(j\omega_1)\}}{|Y_{\text{вх}}(j\omega_1)|} \leq \eta_0. \quad (4)$$

Ограничение (4) задает верхний предел активной мощности, потребляемой фильтром. Отношение активной и полной мощностей фильтра не превышает заданное значение. η_0

В табл. 1 приведены параметры нормированных ШПФ 3 и 5 порядка, полученных с помощью рассмотренной процедуры оптимизации для двух значений параметра η_0 . Частота настройки фильтра равна 3 рад/с. Оптимизация проводилась с помощью пакета *Optimization Toolbox* программного комплекса *MatLab*.

Таблица 1

Параметры нормированных ШПФ 3 и 5 порядка							
Порядок фильтра	η_0	C_1 , Ф	L_2 , Гн	C_3 , Ф	L_4 , Гн	C_5 , Ф	R
3	0,05	0,446	0,189	0,11	-	-	1
	0,1	0,383	0,220	0,11	-	-	1
5	0,05	0,448	0,168	0,1324	0,132	1	1
	0,1	0,382	0,197	0,1319	0,132	1	1

Параметры нормированных фильтров, представленные в табл. 1, могут использоваться при проектировании фильтров, имеющих заданные реактивную мощность и частоту настройки. Для этого необходимо провести масштабирование параметров нормированного фильтра по заданным частоте настройки и величине реактивной мощности.

Результаты и обсуждение

Проведем сравнительный анализ характеристик широкополосных демпфирующих фильтров, имеющих одинаковую частоту настройки, равную 150 Гц. Рассмотрим следующие варианты ШПФ.

1. Фильтр С-типа (рис. 3).
2. Лестничный фильтр третьего порядка.
3. Лестничный фильтр третьего порядка с резонансным контуром в поперечной ветви (рис. 7).
4. Лестничный фильтр пятого порядка (рис. 6).
5. Лестничный фильтр третьего порядка с резонансным контуром в поперечной ветви (рис. 8).

Фильтры имеют одинаковую реактивную мощность. Фильтр С-типа рассчитан с помощью алгоритма, предложенного в [11]. Для расчета лестничных фильтров использованы параметры в табл. 1. Значения элементов фильтров представлены в табл. 2. Частотные характеристики фильтров показаны на рис. 9. Характеристики лестничных фильтров одинакового порядка практически совпадают на частотах, превышающих 100 Гц.

Таблица 2

Значения элементов широкополосных фильтров							
Вар	C_{11} , мкФ	C_{12} , мкФ	L_2 , мГн	C_3 , мкФ	L_4 , мГн	C_5 , мкФ	R, Ом
1	22,2	177,6	57,1	-	-	-	270
2	22,2	-	38,5	5,48	-	-	65
3	22,2	263,0	38,5	5,48	-	-	65
4	22,2	-	34,5	6,59	26,9	49,8	70
5	22,2	294,0	34,5	6,59	26,9	49,8	70

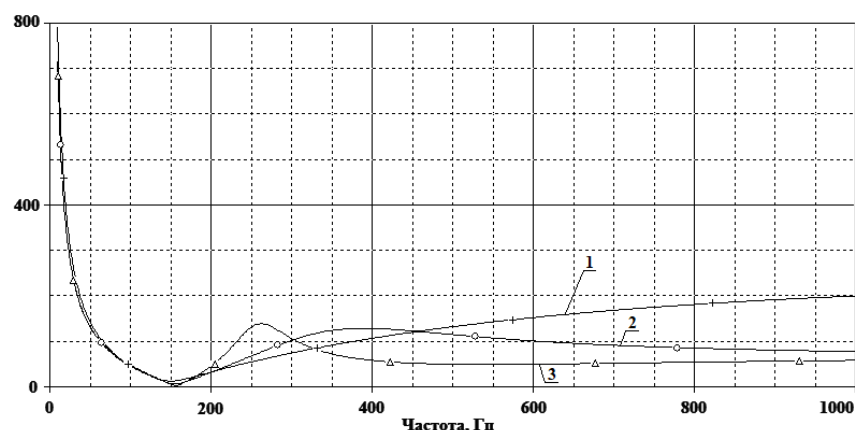


Рис. 9. Частотные характеристики широкополосных фильтров: 1 – С-типа, 2 – ШПФ третьего порядка, 3 – ШПФ 5 порядка

Fig. 9. Frequency characteristics of broadband filters: 1 – C-type, 2 – third order BBF, 3 – fifth order BBF

Значения потерь мощности в элементах фильтров на частоте основной гармоники приведены в табл. 3.

Таблица 3

Вариант	Потери мощности в элементах фильтров, кВт		Суммарные потери
	в реакторах	в демпфирующем резисторе	
1	79	0,4	79,4
2	67	2	69
3	54	0	54
4	59	0	59
5	47,5	0	47,5

Результаты проведенного анализа показывают, что предлагаемые широкополосные фильтры имеют значительные технико-экономические преимущества перед фильтрами С-типа. Использование методов оптимального синтеза позволяет получить новые варианты широкополосных фильтров с требуемыми частотными характеристиками. Важное достоинство ШПФ 3-5 порядка заключается в том, что они потребляют значительно меньшую активную мощность по сравнению с известными структурами ПФГ. Включение резонансного контура в поперечную ветвь лестничного фильтра позволяет дополнительно снизить потери мощности в реакторах. При этом потери в демпфирующем резисторе на частоте 50 Гц снижаются практически до нуля.

Широкополосные фильтры 3-5 порядка целесообразно использовать в системах электроснабжения, значительную часть нагрузки которых составляют мощные электроприемники с нелинейными характеристиками. Это позволит нормализовать качество электроэнергии и одновременно повысить энергоэффективность компенсирующих устройств.

Заключение

Искаженные токи, создаваемые нелинейными нагрузками промышленных потребителей, имеют широкий спектр, включающий как характеристические, так и нехарактеристические гармоники. Применение традиционных узкополосных фильтров может вызвать резонансное усиление нехарактеристических гармоник. В системах электроснабжения промышленных предприятий целесообразно использовать широкополосные фильтры, обеспечивающие ослабление гармоник, а также демпфирование резонансных режимов в СЭС.

Основным видом пассивных фильтров, используемых в промышленных системах электроснабжения для нормализации качества электроэнергии являются фильтры С-типа. Их преимущество – малые потери мощности в демпфирующем резисторе на основной частоте. Однако фильтры С-типа, настроенные на подавление гармоник низкого порядка, имеют значительные потери мощности в реакторах.

В статье рассмотрено новое семейство широкополосных фильтров лестничной структуры, позволяющих уменьшить активную мощность, потребляемую элементами схемы. Показано, что известные варианты ШПФ, такие как фильтр С-типа, можно рассматривать как частные случаи предложенной структуры.

Анализ характеристик лестничных ШПФ 3-5 порядка показал, что они обеспечивают эффективную компенсацию характеристических и нехарактеристических гармоник, создаваемых многопульсными преобразователями. При этом предлагаемые фильтры имеют значительно меньшие потери в реакторах и демпфирующем резисторе, чем традиционные фильтры С-типа.

Литература

1. Жежеленко И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий. 6-е изд. М., Энергоатомиздат, 2010. 375 с.
2. Коверникова Л.И., Тульский В.Н., Шамонов Р.Г. Качество электроэнергии в ЕЭС России: текущие проблемы и необходимые решения // Электроэнергия: Передача и распределение. 2016. № 2 (35). С. 28-38.
3. Orcajo G.A., Aduro P., Rodrigues J., et al. Overcurrent protection response of a hot rolling mill filtering system: analysis of the process conditions. IEEE trans. on Industry Applications. 2017. V. 53. No. 3. pp. 2596-2607.
4. Singh B., Gairola S., Singh B. N., Chandra A., Al-Haddad K. Multipulse AC-DC Converters for Improving Power Quality: A Review IEEE trans. on Power Electronics. 2008. V. 23. No. 1. pp. 260-281.
5. Badrzadeh B., Smith K., Wilson R. Designing passive harmonic filters for an aluminum smelting plant. IEEE trans. on Industry Applications. 2011. V. 47. N. 2. pp. 973-983.
6. Nascimento C., Watanabe E., Diene O., Dietrich A., Goedel A., Gyselinck J., Dias R. Analysis of noncharacteristic harmonics generated by voltage-source converters operating under unbalanced voltage. IEEE trans. on Power Delivery. 2017. V. 32. No. 2. pp. 951-961.
7. Li X., Xu W., Ding T. Damped high passive filter – a new filtering scheme for multipulse rectifier systems. – IEEE trans. on Power Delivery. 2017. V. 32. No. 1. pp. 117-124.
8. Das J. Design and Application of a Second-Order High-Pass Damped Filter for 8000-hp ID Fan Drives – A Case Study. IEEE trans. on Industry Applications. 2015 V. 51. No. 2. pp. 1417-1426.
9. Allenbaugh M., Dionise T., Natali T. Harmonic Analysis and Filter Bank Design for a New Rectifier for a Cold Roll Mill. IEEE trans. on Industry Applications. 2013. V. 49. No. 3. pp. 1161-1170.
10. Wang Y., Xu S., Xu W., et al. Comparative Studies on Design Methods for Detuned C-Type Filter. IEEE trans. on Power Delivery. 2020. V. 35. No. 4. pp. 1725-1734.
11. Horton R., Dugan R., Hallmark D. Novel Design Methodology for C-Type Harmonic Filter Banks Applied in HV and EHV Networks. Proceedings of the Conference PES T&D 2012, Orlando, FL, USA. 7–10 May 2012. pp. 1–6.
12. Lamlom A. Ahmed Ibrahim, Balci A., M., Karadeniz A., Abdel Aleem, S.H.E. Optimal Design and Analysis of Anti-Resonance C-Type High-Pass Filters. In Proceedings of the IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2017 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (IEEEIC/IE&CPS Europe), Milan, Italy, 6–9 June 2017.
13. Zhang G., Wang Y., Xu W., Sittler E. Characteristic parameter-based detuned C-type filter design. IEEE power and energy technology systems journal., 2018. V. 5. No. 2. pp. 65-72.
14. Lange A., Redlarski G. Selection of C-type filters for reactive power compensation and filtration of higher harmonics injected into the transmission system by arc furnaces. Energies. 2020. V.13. pp.2330. doi: 10.3390/en13092330.
15. Xu W., Ding T., Li X., Liang H., Resonance-free shunt capacitors configurations, design methods and comparative analysis. IEEE Trans. on Power Delivery, 2016. V. 31. №. 5. pp. 2287–2295.
16. Wang Y., Xu W., A shared resonance damping scheme for multiple switchable capacitors, IEEE Trans. Power Delivery. 2018. V. 33. No. 4. pp. 1973–1980,
17. Довгун В.П., Егоров Д.Э., Новиков В. В., Звягинцев Е. С. Параметрический синтез широкополосных силовых фильтров. Электричество. 2018. № 12. С. 14-21.
18. Довгун В.П., Егоров Д.Э., Широкополосные силовые фильтры для систем электроснабжения с многофазными преобразователями Электротехника. 2020. № 5. с. 47-51.
19. Егоров Д.Э., Довгун В.П., Боярская Н.П., Ян А.В., Слюсарев А.С. Коррекция коэффициента мощности в системах электроснабжения с многофазными нелинейными нагрузками // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2020. Т. 22. № 6. С. 3-15. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-6-3-15.
20. Улахович Д. А. Основы теории линейных электрических цепей: СПб.: БХВ-Петербург, 2009. 816 с.

Авторы публикации

Боярская Наталья Петровна – канд. техн. наук, доцент кафедры «ТОЭ», Красноярский государственный аграрный университет. E-mail: bnp2006dvg@mail.ru.

Довгун Валерий Петрович – д-р. техн. наук, профессор кафедры «Системы автоматизации, автоматизированного управления и проектирования», Сибирский федеральный университет. E-mail: vdovgun55@mail.ru, vdovgun@sfu-kras.ru.

Егоров Денис Эдуардович – канд. техн. наук, доцент, Сибирский федеральный университет. E-mail: denis.egorov.90@br.ru, deegorov@sfu-kras.ru.

Новиков Виктор Валерьевич – канд. техн. наук, доцент, Сибирский федеральный университет. E-mail: nvv@iksib.ru.

Шандрыгин Денис Александрович – аспирант, Сибирский федеральный университет. E-mail: Shandrigin2012@yandex.ru.

References

1. Zhezhelchenko IV. *Vysshie garmoniki v sistemakh promyshlennogo elektrosnabzheniya prompredpriyati*. Moscow: Energoatomizdat Publ., 2000, 331 p.
2. Kovernikova LI, Tulckiy VN, Shamonov RG. Katchestvo elektrenergii v EES Rosii, tekustchie problem i neobkhodimye resheniya. *Elektroenergiya. Peredatcha I raspredelenie*. 2016;2 (35):28-38.
3. Orcajo GA, Adruga P, Rodrigues J, et al. *Overcurrent protection response of a hot rolling mill filtering system analysis of the process conditions*. IEEE trans. on industry applications. 2017;53(3):2596-2607.
4. Singh B, Gairola S, Singh BN, et al. *Multipulse AC–DC Converters for Improving Power Quality: A Review* IEEE trans. on Power Electronics. 2008;23(1):260-281.
5. Badrzadeh B, Smith K, Wilson R. *Designing passive harmonic filters for an aluminum smelting plant*. IEEE trans. on industry applications. 2011;47(2):973-983.
6. Nascimento C, Watanabe E, Diene O, et al. *Analysis of noncharacteristic harmonics generated by voltage-source converters operating under unbalanced voltage*. IEEE trans. on Power Delivery. 2017; 32(2):951-961.
7. Li X, Xu W, Ding T. Damped high passive filter – a new filtering scheme for multipulse rectifier systems. IEEE trans. on Power Delivery. 2017;32(1):117-124.
8. Das J. *Design and Application of a Second-Order High-Pass Damped Filter for 8000-hp ID Fan Drives A Case Study*. IEEE trans. on Industry Applications. 2015;51(2):1417-1426.
9. Allenbaugh M, Dionise T, Natali T. *Harmonic Analysis and Filter Bank Design for a New Rectifier for a Cold Roll Mill*. IEEE trans. on Industry Applications. 2013;49(3):1161-1170.
10. Wang Y, Xu S, Xu W, et al. *Comparative Studies on Design Methods for Detuned C-Type Filter*. IEEE trans. on Power Delivery. 2020;35(4):1725-1734.
11. Horton R., Dugan R., Hallmark D. Novel Design Methodology for C-Type Harmonic Filter Banks Applied in HV and EHV Networks. Proceedings of the Conference PES T&D 2012, Orlando, FL, USA, 7–10 May 2012; pp. 1–6.
12. Lamlo A, Ahmed Ibrahim A, Balc M, et al. *Optimal Design and Analysis of Anti-Resonance C-Type High-Pass Filters*. In Proceedings of the IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2017 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC/I&CPS Europe), Milan, Italy, 6–9 June 2017.
13. Zhang G, Wang Y, Xu W, Sitther E. *Characteristic parameter-based detuned C-type filter design*. IEEE power and energy technology systems journal. 2018;5:2:65-72.
14. Lange A, Redlarski G. Selection of C-type filters for reactive power compensation and filtration of higher harmonics injected into the transmission system by arc furnaces. *Energies*, 2020;13:2330; doi: 10.3390/en13092330.
15. Xu W, Ding T, Li X, et al. *Resonance-free shunt capacitors configurations, design methods and comparative analysis*. IEEE Trans. on Power Delivery. 2016;31(5):2287–2295.
16. Wang Y, Xu W, A shared resonance damping scheme for multiple switchable capacitors. IEEE Trans. Power Delierly. 2018;33(4):1973–1980.
17. Dovgun VP, Egorov DE, Novikov VV, et al. Parametritcheskii sintez shirokopklosnyh filtrov. *Elektrichestvo*. 2018;12:14-21.

18. Dovgun VP, Egorov DE. Shirokogokosnyye silovye filtry dlya system elektrosnabgeniya s mnogofaznymi preobrazovatelyzmi. *Elektrotekhnira*. 2020;5:47-51.

19. Egorov DE, Dovgun VP, Boyzrskaya NP, et al. Korrekciya koefficienta moshnosti v sistemakh s mnogofaznymi nelineynyvi nagruzkami. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. PROBLEMY ENERGETIKI*. 2020;22:6:3-15. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-6-3-15.

20. Ulakhovich DA. Osnovy teorii lineynykh elektricheskikh cepey: ucheb.posobie. SPb.: BXV-Peterburg, 2009. 816 p.

Authors of the publication

Nataliya P. Boyarskaya – Krasnoyarsk State Agricultural University, Krasnoyarsk, Russia.

Valery P. Dovgun – Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia.

Denis E. Egorov – Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia.

Viktor V. Novikov – Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia.

Denis A. Shandrigin – Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia.

Получено **12.12.2021 г.**

Отредактировано **13.12.2021 г.**

Принято **14.12.2021 г.**