

ШИРОКОПОЛОСНЫЕ ДЕМПФИРУЮЩИЕ ФИЛЬТРЫ ЛЕСТНИЧНОЙ СТРУКТУРЫ

Довгун ¹ В.П., Егоров ¹ Д.Э., Боярская ² Н.П., Синяговский ¹ А.Ф., Рыжов ¹ Н.А.

¹Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия

²Красноярский государственный аграрный университет, г. Красноярск, Россия

Резюме: **АКТУАЛЬНОСТЬ.** Рост числа потребителей с нелинейными вольтамперными характеристиками является одной из причин ухудшения качества электрической энергии в сетях промышленных и муниципальных потребителей. Низкое качество электроэнергии приводит к отрицательным последствиям, связанным с сокращением срока службы электрооборудования, увеличением электротехнического и технологического ущерба у потребителей. **ЦЕЛЬ.** Развитие общего метода проектирования и сравнительный анализ характеристик широкополосных пассивных фильтров (ШПФ), обеспечивающих снижение негативного влияния мощных нелинейных нагрузок на режимы электрических сетей. **МЕТОДЫ.** Процедура проектирования ШПФ основана на использовании методов оптимального синтеза линейных цепей. Рассмотрена базовая структура ШПФ в форме реактивного четырехполюсника с резистивной нагрузкой. Определены требования к структуре реактивного четырехполюсника, при выполнении которых обеспечиваются требуемые компенсационные характеристики. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** Показано, что ШПФ 2-3 порядка, используемые в промышленных СЭС, являются простейшими вариантами предложено базовой структуры. С помощью рассмотренного метода синтезированы новые варианты фильтров, реализующих требуемую частотную характеристику в полосе ослабления. Сравнение характеристик фильтров показало, что предлагаемые варианты ШПФ обладают значительными преимуществами по сравнению с традиционными фильтрами 2 порядка. На основе проведенного анализа сформулированы рекомендации по выбору структуры фильтров, используемых для ослабления характеристических и нехарактеристических гармоник. **ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** Использование предлагаемых конфигураций ШПФ позволит снизить негативное влияние мощных нелинейных потребителей на качество электроэнергии в промышленных системах электроснабжения.

Ключевые слова: гармоники; демпфирование резонансных режимов; широкополосные демпфирующие фильтры.

Для цитирования: Довгун В.П., Егоров Д.Э., Боярская Н.П., Синяговский А.Ф., Рыжов Н.А. Широкополосные демпфирующие фильтры лестничной структуры // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2024. Т.26. № 1. С. 77-92. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-1-77-92.

LADDER BROADBAND DAMPING FILTERS

Dovgun ¹ VP., Egorov ¹ DE., Boyarskaya ² NP., Sinyagovskiy ¹ AF., Ryzhov ¹ NA.

¹Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

²Krasnoyarsk State Agricultural University, Krasnoyarsk, Russia

Abstract: **RELEVANCE.** The large proliferation of various nonlinear loads has led to serious power-quality related problems in power systems. **THE PURPOSE.** In this paper, we consider design procedure of broadband passive filters with flat frequency characteristics. **METHODS.** A general method for optimally design the arbitrary order broadband passive filters (BBF) is considered. The base structure of BBF has the form of resistively loaded reactive two-port. Conditions of low fundamental frequency loss and required filter selectivity have been determined. The BBF design procedure minimizes the grid total current distortion and takes into account the power system performance. **RESULTS.** New broadband passive filter scheme are proposed. Compensating performances of different BBF configurations are discussed. Case studies demonstrated that proposed scheme can filter characteristic and damp non-characteristic

harmonic simultaneously. **CONCLUSION.** The results show that proposed broadband damping filters are the effective instrument for the power quality normalization in industrial power systems.

Keywords: harmonics; resonance damping; broadband passive filter.

For citation: Dovgun VP., Egorov DE., Boyarskaya NP., Sinyagovskiy AF., Ryzhov NA. Ladder broadband damping filters. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2024; 26 (1): 77-92. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-1-77-92.

Введение (Introduction)

Ухудшение качества электроэнергии (КЭ) в системах электроснабжения в значительной степени вызвано технологическими изменениями в различных областях промышленности. Выросла доля мощных нагрузок с нелинейными вольтамперными характеристиками – многопульсных полупроводниковых преобразователей, частотно-регулируемых электроприводов, дуговых сталеплавильных печей. Преимущество многопульсных схем заключается в малой эмиссии низкочастотных нехарактеристических гармоник. Однако в реальных условиях спектры токов многопульсных преобразователей значительно сложнее. Несимметрия напряжений трехфазной сети сопровождается появлением нехарактеристических гармоник входного тока. Кроме того, входные токи частотно-регулируемых электроприводов содержат интергармоники, уровень и частоты которых зависят от загрузки и скорости вращения двигателя.

Для улучшения качества электроэнергии в системах электроснабжения (СЭС) промышленных потребителей используются активные и пассивные силовые фильтры. Активные фильтры (АФ) представляют собой силовые электронные устройства, обеспечивающие адаптивную компенсацию искажений напряжений и токов. Серьезный недостаток АФ – их высокая стоимость.

Пассивные фильтры гармоник (ПФГ) являются стандартным решением, используемым для компенсации реактивной мощности и нормализации параметров, определяющих качество электроэнергии в сетях с мощными промышленными нагрузками [1-9]. Традиционные узкополосные пассивные фильтры в форме параллельного соединения резонансных контуров обеспечивают подавление мощных характеристических гармоник. Однако они не позволяют корректировать частотные характеристики сети в широком диапазоне частот. Кроме того, звенья узкополосного фильтра образуют параллельные контуры с внешней сетью. В результате частотная характеристика узкополосного фильтра имеет максимумы, чередующиеся с резонансными частотами отдельных звеньев. Максимумы частотной характеристики могут способствовать усилению отдельных нехарактеристических или интергармоник, что может вызвать еще большее искажение токов и напряжений сети. Для нормализации качества электроэнергии в промышленных СЭС необходимы широкополосные компенсирующие устройства, имеющие монотонную частотную характеристику, исключающую возможность резонансного усиления гармоник. Это стимулировало поиск новых структур и методов расчета пассивных фильтров [4, 7-9, 10, 11-13].

Широкополосные фильтры 2 порядка являются распространенным средством, применяемым для компенсации гармонических искажений и демпфирования резонансных явлений в электроэнергетических системах различных классов напряжения [5-7, 14, 17, 21, 22]. Примеры использования ШПФ 2 порядка в сетях с мощными промышленными нагрузками рассмотрены в [5, 6].

Недостаток демпфирующих фильтров 2 порядка – низкая энергоэффективность, вызванная большими потерями мощности в элементах фильтра. Для снижения потерь в фильтрах С-типа в поперечную ветвь последовательно с реактором включают дополнительный конденсатор. Это способствует уменьшению потерь в области низких частот.

Подробный обзор характеристик широкополосных фильтров 2-3 порядка представлен в статье [7]. Авторы получили аналитические выражения, с помощью которых проведено сравнение характеристик известных структур ШПФ. Исследовано влияние параметров фильтров (частоты настройки и добротности) на их компенсационные характеристики. Определены диапазоны частот, которые оптимальны для применения рассмотренных фильтров.

Во многих случаях ШПФ 2 порядка и фильтры С-типа имеют недостаточную селективность частотных характеристик, что затрудняет эффективную компенсацию

характеристических и нехарактеристических гармоник, значительно различающихся по мощности. Очевидный путь улучшения компенсационных характеристик – увеличение порядка фильтра. Однако широкополосные фильтры более высокого порядка рассмотрены лишь в небольшом числе работ, опубликованных в последние годы [8, 9, 12-16]. Одна из причин состоит в том, что аналитические выражения для расчета ШПФ высокого порядка очень громоздки, что затрудняет расчет таких структур.

Цель настоящего исследования – развитие процедуры проектирования широкополосных демпфирующих фильтров на основе использования теории оптимального синтеза линейных частотно-избирательных цепей, а также сравнительный анализ характеристик ШПФ.

Научная значимость исследования состоит в развитии общего подхода, позволяющего с единых позиций рассматривать различные конфигурации широкополосных демпфирующих фильтров. Показано, что известные конфигурации ШПФ представляют собой простейшие варианты базовой структуры в форме односторонне нагруженного реактивного четырехполюсника. Определены требования к характеру продольных и поперечных ветвей лестничного четырехполюсника, при выполнении которых обеспечиваются заданная избирательность и энергоэффективность реализуемых фильтров.

Практическая значимость исследования заключается в том, что новые варианты широкополосных демпфирующих фильтров, предложенные в статье, имеют значительные технико-экономические преимущества перед традиционными структурами ШПФ, используемых в промышленных системах электроснабжения. Их использование позволит уменьшить негативное влияние мощных нелинейных нагрузок на качество электроэнергии в СЭС.

Литературный обзор (Literature review)

Широкополосный демпфирующий фильтр второго или третьего порядка можно рассматривать как LC-четырёхполюсник, к внешним зажимам которого подключен демпфирующий резистор (рис. 1).

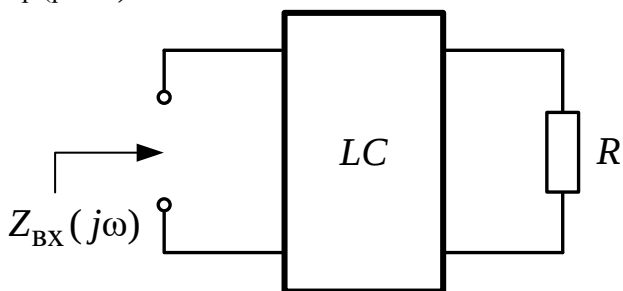


Рис. 1. Односторонне нагруженный LC-четырёхполюсник

Fig.1. Single-loaded LC-two-port

*Источник: составлено автором Source: compiled by the author

Простейшим вариантом является демпфирующий ШПФ 2 порядка (рис. 2).

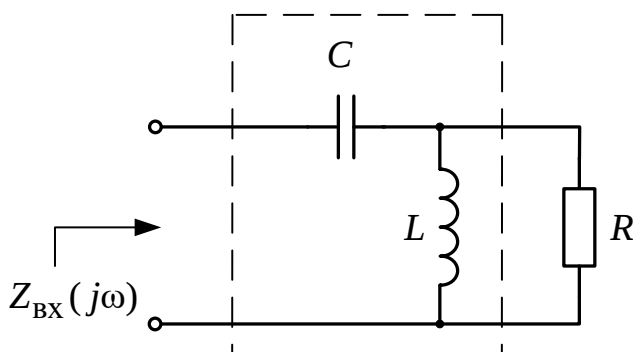


Рис. 2. Демпфирующий ШПФ 2 порядка

Fig. 2. Second-order broadband filter

*Источник: составлено автором Source: compiled by the author

Частотная характеристика сопротивления фильтра $Z_{BX}(\omega)$ имеет монотонный характер (рисунк 3). Минимум $Z_{BX}(\omega)$ находится на частоте, близкой к частоте настройки $\omega_H = 1/\sqrt{LC}$. В полосе ослабления, при $\omega > \omega_H$, сопротивление ШПФ определяется в основном сопротивлением демпфирующего резистора.

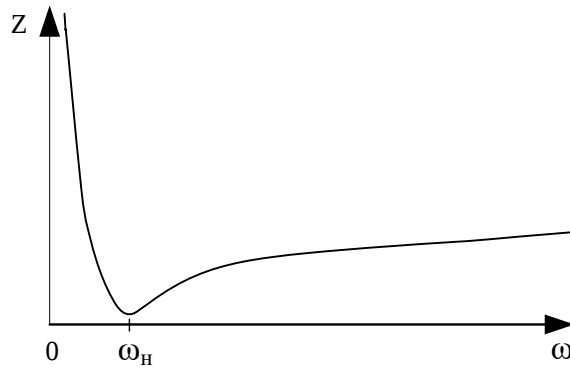


Рисунок 3. Частотная характеристика ШПФ

Fig. 3. The impedance characteristic of broadband damping filter

*Источник: составлено автором Source: compiled by the author

Добротность широкополосного фильтра пропорциональна сопротивлению демпфирующего резистора

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

Как правило, добротность ШПФ 2 порядка выбирают в интервале 0,5 - 5 [5, 6].

Реактивная мощность фильтра Q_Φ и мощность основного конденсатора C_1 связаны соотношением [2, 6]

$$Q_\Phi = \frac{n^2}{n^2 - 1} Q_{C(1)}.$$

Здесь $Q_{C(1)}$ – реактивная мощность конденсатора на частоте сети.

Активная мощность, потребляемая демпфирующим резистором

$$P_R = \sum_{n=1} R I_{R(n)}^2 = \frac{X_{L(1)}}{R} \sum_{n=1} (n I_{L(n)})^2,$$

где $X_{L(1)}$ – сопротивление реактора на частоте сети.

Приведем основные расчетные соотношения для ШПФ второго порядка [5, 6].
Емкость конденсатора

$$C_1 = \frac{Q_\Phi}{\omega_1 U^2}. \quad (1)$$

Индуктивность реактора

$$L = \frac{1}{\omega_H^2 C_1}.$$

Сопротивление демпфирующего резистора

$$R = \sqrt{\frac{L}{C_1}} Q = \frac{Q}{\omega_H C_1}.$$

Графики частотных характеристики входного сопротивления ШПФ 2 порядка, имеющих различные значения добротности, показаны на рисунке 4. Добротности фильтров равны 2 и 5.

При увеличении добротности фильтра обеспечивается эффективное подавление гармоник с частотами, близкими к частоте настройки ω_H . Однако при этом уменьшается эффективность компенсации гармоник высокого порядка. ШПФ 2 порядка в основном используются в составных фильтрах, включающих узкополосные звенья, осуществляющие подавление мощных низкочастотных гармоник. Широкополосный фильтр в такой схеме обеспечивает компенсацию гармоник высокого порядка ($n > 7$). По этой причине ШПФ 2 порядка многие авторы называют фильтрами верхних частот (high-pass filters, HPF).

Для уменьшения потерь мощности в схему ШПФ включают дополнительный конденсатор. В широкополосном фильтре 3 порядка конденсатор C_2 соединен последовательно с демпфирующим резистором (рис. 5).

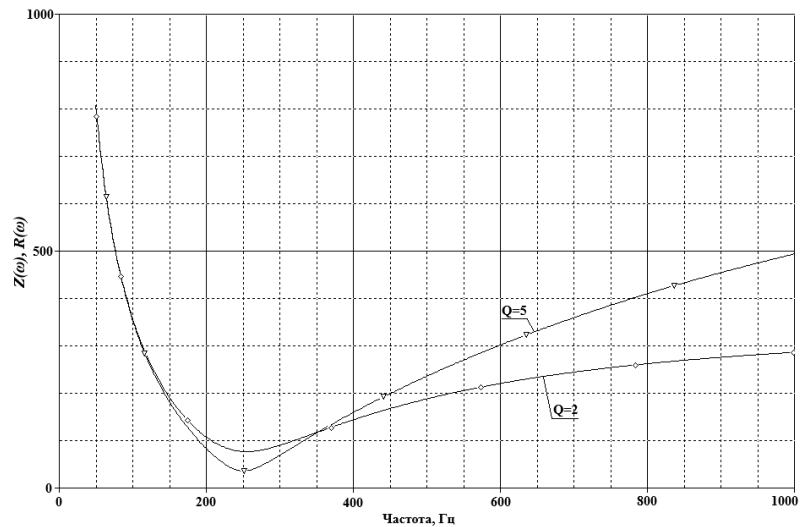


Рис. 4. Частотные характеристики сопротивления ШПФ 2 порядка Fig. 4. The impedance characteristics of second-order broadband filters

*Источник: составлено автором Source: compiled by the author

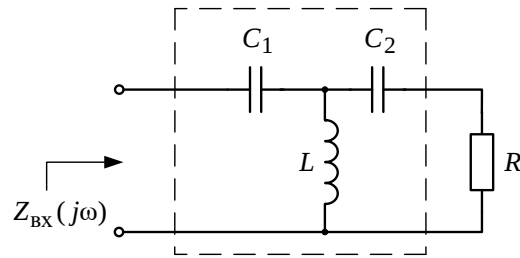


Рис. 5. Широкополосный фильтр третьего порядка Fig. 5. Third-order broadband filter

*Источник: составлено автором Source: compiled by the author

Анализ характеристик и процедура расчета ШПФ 3 порядка рассмотрены в работах [7, 11]. Емкость основного конденсатора C_1 и индуктивность реактора L рассчитываются с помощью формул

$$C_1 = Q_{\Phi} / (\omega_1 U^2) \quad (2)$$

$$L = 1 / (\omega_H^2 C_1) \quad (3)$$

В формулах (2) и (3) ω_1 – частота основной гармоники, U – напряжение сети. Для расчета дополнительного конденсатора C_2 в [7] использована формула $C_2 = C_1 / (Q^2 - 1)$.

Фильтры С-типа (рисунок 6) являются по существу модификацией ШПФ 2 порядка. Для снижения потерь мощности в демпфирующем резисторе параллельно ему включен контур $L - C_2$, настроенный в резонанс на частоту сети.

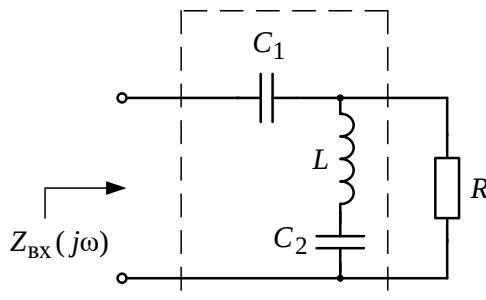


Рис. 6. Фильтр С-типа

Fig. 6. C-type filter

*Источник: составлено автором Source: compiled by the author

Примеры использования фильтров С-типа в промышленных системах электроснабжения и методы их расчета рассмотрены в работах [17-21]. Емкость основного конденсатора C_1 определяется формулой (1). Емкость вспомогательного конденсатора зависит от отношения частоты настройки и частоты сети

$$C_2 = C_1 \left(\left(\frac{\omega_H}{\omega_1} \right)^2 - 1 \right). \quad (4)$$

Индуктивность реактора должна быть такой, чтобы контур $L - C_2$ был настроен в резонанс на частоту сети:

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

Сопротивление демпфирующего резистора можно определить с помощью соотношения, предложенного в работе [18]

$$R = \frac{\omega_H L}{Q}.$$

Здесь Q – добротность широкополосного фильтра.

Исследования, проведенные в [14, 19, 22] показали, что во многих случаях ШПФ 2 порядка и фильтры С-типа имеют недостаточную избирательность для эффективной компенсации искажений токов и демпфирования резонансных режимов. Причина заключается в том, что регулирование частотной характеристики в фильтре 2 порядка осуществляется с помощью единственного свободного параметра (сопротивления демпфирующего резистора). При увеличении R обеспечивается фильтрация низкочастотных гармоник, однако это достигается за счет менее эффективного ослабления гармоник высокого порядка. Таким образом, необходимы более сложные конфигурации ШПФ, осуществляющих компенсацию широкого спектра гармоник и демпфирование резонансных режимов в сети.

Синтез широкополосных демпфирующих фильтров (Materials and methods)

Используем представление широкополосного фильтра в виде реактивного четырехполюсника лестничной структуры, нагрузкой которого является резистор R . Иллюстрацией служит лестничный фильтр 5 порядка (рис. 7).

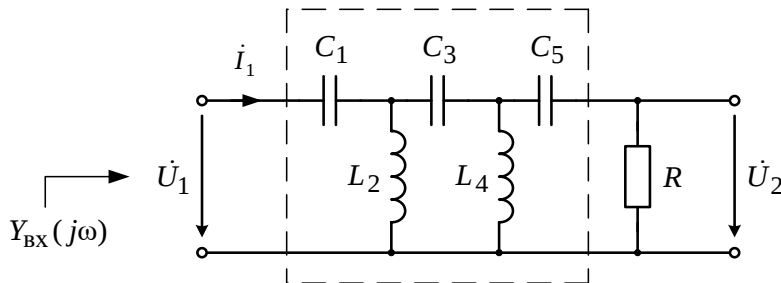


Рис. 7. Широкополосный фильтр пятого порядка Fig. 7. Fifth-order broadband filter

*Источник: составлено автором Source: compiled by the author

Передаточные функции четырехполюсника на рисунке 7

$$T_U(j\omega) = \frac{U_2(j\omega)}{U_1(j\omega)}; \quad T_I(j\omega) = \frac{I_2(j\omega)}{I_1(j\omega)}.$$

Входная проводимость $Y_{BX}(j\omega) = 1/Z_{BX}(j\omega)$ и передаточные функции цепи на рисунке 7 связаны соотношением [13]:

$$\text{Re}\{Y_{BX}(j\omega)\} = G|T_U(j\omega)|^2. \quad (5)$$

$$\text{Re}\{Z_{BX}(j\omega)\} = R|T_I(j\omega)|^2. \quad (6)$$

На рисунке 8 показаны частотные характеристики входного сопротивления $Z_{BX}(j\omega)$ и вещественной части $R(\omega) = \text{Re}\{Z_{BX}(j\omega)\}$ широкополосного фильтра 3 порядка. График $\text{Re}\{Z_{BX}(j\omega)\}$ повторяет график амплитудно-частотной характеристики фильтра верхних

частот. В полосе ослабления входное сопротивление ШПФ определяется сопротивлением демпфирующего резистора.

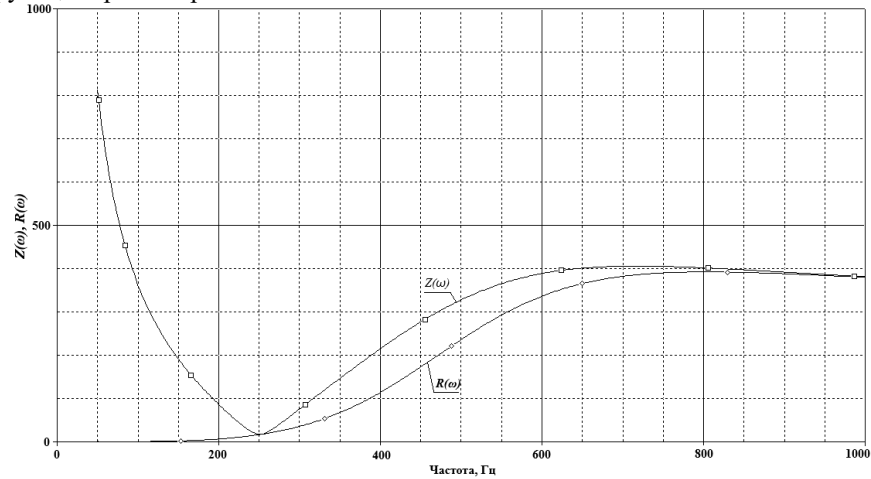


Рис. 8. Частотные характеристики ШПФ 3 порядка
Fig. 8. The frequency characteristics of the broadband third-order filter

*Источник: составлено автором. Source: compiled by the author

Заметим, что ШПФ 2 и 3 порядка на рисунках 2 и 5 представляют собой варианты односторонне нагруженного реактивного четырехполюсника.

Для подробного анализа характеристик ШПФ произвольного порядка представим его в форме каскадного соединения одноэлементных четырехполюсников (рис. 9, а, б)

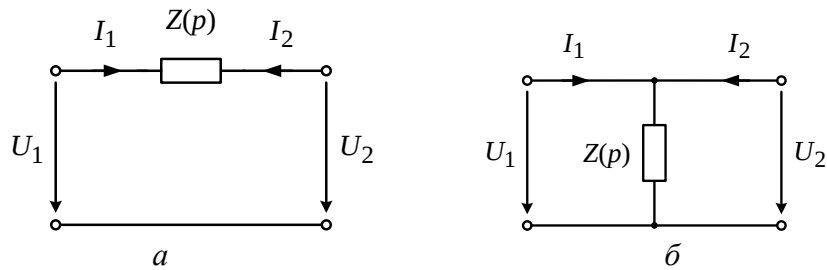


Рисунок 9. Одноэлементные четырехполюсники
Fig. 9. Single-element two-ports

Источник: составлено автором . Source: compiled by the author

Матрица цепных параметров четырехполюсника с продольной ветвью (рис. 9, а)

$$[A] = \begin{bmatrix} 1 & Z(p) \\ 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Здесь p – комплексная частотная переменная.

Цепная матрица четырехполюсника с поперечной ветвью (рис. 9, б)

$$[A] = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{Z(p)} & 1 \end{bmatrix}.$$

Матрицу цепных параметров фильтра получим, перемножая цепные матрицы элементарных четырехполюсников. Согласно (5) нули $\text{Re}\{Y_{\text{вх}}(j\omega)\}$ и нули передаточной функции $T_U(p)$ совпадают. Из теории синтеза пассивных LC-фильтров известно, что нули передачи лестничного четырехполюсника формируются полюсами сопротивлений продольных ветвей и проводимостей поперечных ветвей. Если ветви четырехполюсника имеют простейшую структуру и состоят из одиночных конденсаторов и реакторов, нули передаточной функции $T_U(p)$ расположены в начале координат:

$$T_U(p) = \frac{p^n}{p^n + a_1 p^{n-1} + \dots + a_0} = \frac{p^n}{D(p)}. \quad (7)$$

Здесь $D(p)$ – полином Гурвица.

При увеличении порядка фильтра модуль $T_U(j\omega)$ в диапазоне низких частот уменьшается. При этом уменьшается значение $\text{Re}\{Y_{\text{вх}}(j\omega)\}^2$, следовательно, снижаются потери мощности в этом диапазоне.

Дополнительные возможности для снижения потерь и увеличения избирательности дает включение резонансных контуров в поперечные или продольные ветви фильтра. При замене индуктивности одной из поперечных ветвей последовательным LC -контуром с операторным сопротивлением $Z(p) = L(p^2 + \omega_0^2)/p$ (рис. 10) передаточная функция $T_U(p)$ будет иметь нуль на частоте резонанса $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$

$$T_U(p) = \frac{p^{n-1}(p^2 + \omega_0^2)}{p^n + a_1 p^{n-1} + \dots + a_0}.$$

Одновременно уменьшается и входное сопротивление четырехполюсника на частоте ω_0 . Соответственно, уменьшается мощность, потребляемая фильтром. Такой же эффект снижения мощности дает замена одиночного конденсатора в продольной ветви параллельным резонансным контуром.

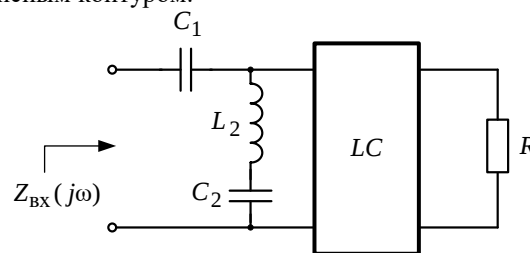


Рисунок 10. Лестничный фильтр с резонансным контуром в поперечной ветви

Fig. 10. Ladder filter with resonant circuit in the shunt branch

Источник: составлено автором Source: compiled by the author

Заметим, что фильтр С-типа на рисунке 6 представляет собой простейший вариант лестничного фильтра, в котором в поперечную ветвь включен резонансный контур.

На рисунке 11 представлен модифицированный вариант ШПФ 3 порядка, в котором реактор в поперечной ветви заменен резонансным контуром. Отличие от фильтра С-типа заключается в том, что последовательно с резистором включен дополнительный конденсатор небольшой емкости. Это позволяет значительно улучшить избирательность фильтра.

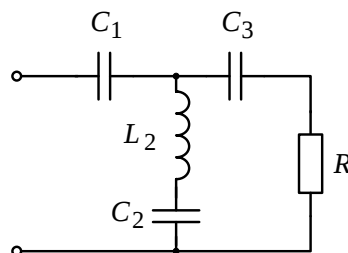


Рис. 11. ШПФ 3 порядка с резонансным контуром в поперечной ветви

Fig. 11. Third-order filter with resonant circuit in the shunt branch

Источник: составлено автором Source: compiled by the author

Замена конденсатора в продольной ветви лестничной схемы последовательным LC -контуром дает дополнительную возможность варьировать частотные характеристики фильтра в полосе ослабления. Схема демпфированного фильтра с резонансным контуром $C_1 - L_1$ в продольной ветви (рис. 12) предложена в [12, 16]. Частотная характеристика фильтра имеет минимумы на частотах 5 и 11-й гармоник.

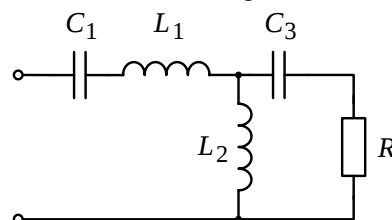


Рис. 12. Демпфированный фильтр, предложенный в [12, 16] Fig. 12. Damped high passive filter, proposed in [12, 16]

Источник: составлено автором Source: compiled by the author

Дополнительный реактор L_1 , включенный последовательно с основным конденсатором C_1 в схеме на рисунке 12, должен быть рассчитан на полный ток фильтра. Это является серьезным недостатком демпфированного фильтра на рисунке 12. Новый вариант фильтра третьего порядка с резонансным контуром $C_3 - L_3$ в продольной ветви показан на рисунке 13. В этом случае ток в дополнительном реакторе L_3 значительно меньше, чем в предыдущей схеме.

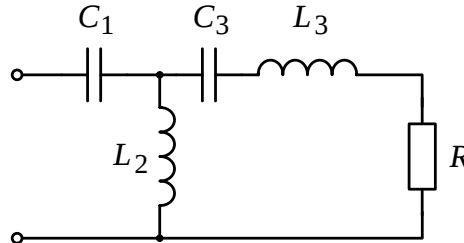


Рис. 13. Лестничный фильтр с резонансным контуром в продольной ветви Fig. 13. Third-order filter with resonant circuit in the series branch

Источник: составлено автором Source: compiled by the author

Оптимизация характеристик широкополосных фильтров. Как правило, расчет ШПФ 2 порядка и фильтров С-типа проводится с помощью аналитических соотношений [6, 7, 14, 17-19]. Однако для фильтров 3-4 порядка расчетные соотношения становятся очень громоздкими, поэтому для проектирования ШПФ целесообразно использовать численные методы. Процедура оптимизации характеристики ШПФ заключается в определении параметров реактивного четырехполюсника, при которых целевая функция, определяемая выражением (8), минимальна

$$\Phi(\bar{x}) = \sum_{(k)} \frac{|Z_{\Phi}(j\omega_k, \bar{x})|^2}{|Z_{\Phi}(j\omega_k, \bar{x}) + Z_c(j\omega_k)|^2} J_k^2, k = 1, 2, \dots, \bar{x} \in \{L_i, C_i\} \quad (8)$$

В формуле (8) $Z_{\Phi}(j\omega_k, \bar{x})$, $Z_c(j\omega_k)$ – комплексные сопротивления фильтра и сети на частоте ω_k ; J_k – k -я гармоника тока, генерируемого нелинейной нагрузкой.

Пассивный фильтр, имеющий минимальное значение целевой функции, определяемой выражением (8), обеспечивает уменьшение искажений тока во внешней сети. В отличие от аналитических методов использование методов оптимизации даст возможность учесть при определении параметров фильтра спектр тока нелинейной нагрузки и влияние внешней сети.

Для ограничения активной мощности, потребляемой фильтром на частоте сети, используется ограничение-неравенство

$$\frac{\operatorname{Re}\{Y_{\text{вх}}(j\omega_1)\}}{|Y_{\text{вх}}(j\omega_1)|} \leq \eta_0. \quad (9)$$

В соответствии с (9) коэффициент мощности фильтра не должен превышать значение η_0 .

В табл. 1 приведены параметры ШПФ 3 и 5, полученные в результате оптимизации с помощью пакета Optimization Toolbox программного комплекса MatLab. Частота настройки фильтров составляет 250 Гц.

Таблица 1
Table 1

Параметры ШПФ 3 и 5 порядка Element values of broadband filters						
Порядок фильтра	C_1 , мкФ	L_2 , мГн	C_3 , мкФ	L_4 , мГн	C_5 , мкФ	R, Ом
3	1,0	330,49	0,26	-	-	1175
5	1,0	307,8	0,215	495,6	0,47	1175

Источник: составлено автором Source: compiled by the author

Значения элементов, представленные в таблице 1, можно использовать для расчета ШПФ, обеспечивающих компенсацию заданной величины реактивной мощности. Для этого необходимо рассчитать емкость основного конденсатора и провести масштабирование параметров фильтра.

Результаты и обсуждение (Results and discussion)

В настоящем разделе проведено сравнение характеристик широкополосных демпфирующих фильтров, рассмотренных выше. Фильтры имеют одинаковую емкость основного конденсатора и, следовательно, одинаковую реактивную мощность. Рассмотрим две группы фильтров.

Широкополосный фильтр второго порядка и фильтр С-типа.

Значения элементов фильтров, имеющих частоты настройки 150 и 250 Гц, приведены в таблице 2. Частотные характеристики показаны на рисунке 14. Добротность фильтров одинакова и равна 2.

Таблица 2
Table 2

Значения элементов ШПФ 2 порядка
The parameters of the second-order broadband filters

Тип фильтра	C_1 , мкФ	L_2 , мГн	C_2 , мкФ	R_d , Ом
ШПФ 2 порядка $f_H = 150$ Гц, $Q = 5$	3,79	350	-	1400
ШПФ 2 порядка $f_H = 250$ Гц, $Q = 5$	3,79	107	-	850
ШПФ 2 порядка $f_H = 150$ Гц, $Q = 2$	3,79	297	-	560
ШПФ 2 порядка $f_H = 250$ Гц, $Q = 2$	3,79	107	-	340
С-фильтр $f_H = 150$ Гц, $Q = 2$	3,79	297	34,5	560
С-фильтр $f_H = 250$ Гц, $Q = 2$	3,79	107	91	340

Источник: составлено автором Source: compiled by the author

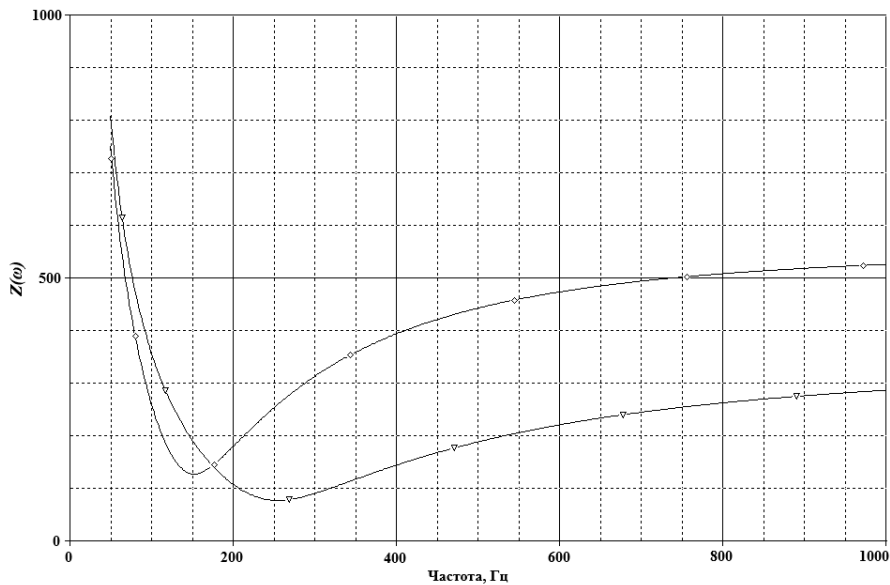


Рис. 14. Частотные характеристики ШПФ 2 порядка
Fig. 14. The impedance characteristics of 2-order BBF

Источник: составлено автором Source: compiled by the author

В соответствии с рисунком 14 снижение частоты настройки сопровождается увеличением сопротивления в полосе ослабления, при $f > f_H$. Поэтому ШПФ 2 порядка нецелесообразно использовать для ослабления мощных гармоник низкочастотного диапазона.

Частотные характеристики фильтров С-типа практически не отличаются от характеристик ШПФ 2 порядка.

Потери мощности в фильтре равны активной мощности, потребляемой демпфирующим резистором и реакторами. Результаты расчета потерь для различных вариантов ШПФ второго порядка и фильтров С-типа приведены в таблице 3. Напряжение на входе фильтра равно 10 кВ. Добротности реакторов приняты равными 40.

Таблица 3

Table 3

Потери мощности в фильтрах 2 порядка
Power losses in second-order broadband filters

Тип фильтра	Потери в демпфирующем резисторе, Вт	Потери в реакторах, Вт	Суммарные потери, Вт
ШПФ 2 порядка $f_H = 150$ Гц, $Q = 2$	2650	410	3060
ШПФ 2 порядка $f_H = 250$ Гц, $Q = 2$	505	130	635
ШПФ 2 порядка $f_H = 150$ Гц, $Q = 5$	1610	510	2120
ШПФ 2 порядка $f_H = 250$ Гц, $Q = 5$	205	130	335
С-фильтр $f_H = 150$ Гц, $Q = 2$	0	490	490
С-фильтр $f_H = 250$ Гц, $Q = 2$	0	326	326

Источник: составлено автором Source: compiled by the author

При уменьшении частоты настройки активное сопротивление ШПФ 2 порядка на основной частоте увеличивается. Это вызывает рост потерь мощности как в демпфирующем резисторе, так и в реакторе. Таким образом, ШПФ 2 порядка целесообразно использовать для ослабления высокочастотных гармоник. Последовательный колебательный контур $L - C_2$, включенный параллельно демпфирующему резистору в схеме фильтра С-типа (Рисунок 6), обеспечивает минимальные потери мощности в резисторе. Однако, согласно формуле (4), емкость вспомогательного конденсатора увеличивается пропорционально квадрату отношения $\left(\frac{\omega_n}{\omega_1}\right)$, поэтому емкость вспомогательного конденсатора быстро растет при увеличении частоты настройки. Поэтому фильтры С-типа целесообразно использовать для компенсации низкочастотных гармоник ($n = 3, 5$), когда отношение частоты настройки и основной частоты невелико.

Широкополосные фильтры лестничной структуры 3 и 5 порядка. Значения элементов лестничных ШПФ 3 и 5 порядка приведены в таблице 4. На рисунке 15 показаны частотные характеристики фильтров. Здесь же показана характеристика модифицированного ШПФ 3 порядка, в котором продольная индуктивность заменена последовательным резонансным контуром (рис. 13). Фильтры имеют одинаковую частоту настройки f_H , равную 250 Гц.

Таблица 4

Table 4

Значения элементов лестничных широкополосных фильтров

The parameters of the ladder broadband filters

Вид фильтра	C_1 , мкФ	L_2 , мГн	C_3 , мкФ	$L_4, (L_3)$, мГн	C_5 , мкФ	R_d , Ом
ШПФ 3 порядка	3,79	87,2	0,983	-	-	310
ШПФ 5 порядка	3,79	81,2	0,815	130,8	1,78	310
ШПФ с резонансным контуром в продольной ветви	3,79	86,7	0,815	37,3	-	350

Частотные характеристики, представленные на рисунке 15, ясно показывают, что увеличение порядка фильтра позволяет повысить избирательность его характеристик. Однако в полосе ослабления частотная характеристика фильтра 3 порядка может иметь максимум, обусловленный резонансом в параллельном контуре $L - C_2$. Сопротивление ШПФ в полосе ослабления можно снизить, увеличив порядок схемы. Дополнительные возможности для регулирования частотной характеристики в полосе ослабления обеспечивает включение резонансного контура в продольную ветвь фильтра, как показано на рисунках 12 и 13.

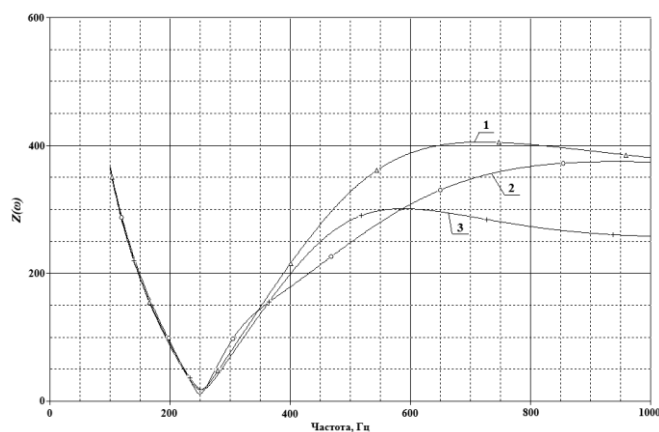


Рис. 15. Частотные характеристики лестничных ШПФ 1 – фильтр 3 порядка, 2 – фильтр 5 порядка, 3 – фильтр с резонансным контуром в продольной ветви (Рисунок 13)

Fig. 15. The impedance characteristics of ladder broadband filters 1 – 3-order filter, 2 – 5-order filter, 3 – 3-order filter with resonant circuit in the series branch

Источник: составлено автором Source: compiled by the author

Потери мощности в демпфирующих резисторах и реакторах лестничных ШПФ 3 – 5 порядка на частоте основной гармоники представлены в таблице 5.

Таблица 5

Table 5

Потери мощности в лестничных широкополосных фильтрах

Power losses in ladder broadband filters

Тип фильтра	Потери в демпфирующем резисторе, Вт	Потери в реакторах, Вт	Суммарные потери, Вт
ШПФ 3 порядка	4	108	112
ШПФ 5 порядка	0	108	108
ШПФ 3 порядка с резонансным контуром в поперечной ветви (рисунок 11)	0	100	100
ШПФ 3 порядка с резонансным контуром в продольной ветви (рисунок 14)	5	108	113

Источник: составлено автором. Source: compiled by the author

Анализ показывает, что увеличение порядка ШПФ сопровождается повышением их избирательности и снижением активного сопротивления на частоте основной гармоники. Соответственно, уменьшаются потери мощности на этой частоте. Эффективным средством уменьшения потерь мощности в демпфирующем резисторе является использование последовательного резонансного контура в поперечной ветви лестничного фильтра.

Для оценки эффективности широкополосных фильтров рассмотрим их использование в системе регулируемого электропривода установки, получающей питание по линии электропередачи напряжением 10 кВ. Необходимо обеспечить компенсацию характеристических и нехарактеристических гармоник в диапазоне частот 250-1000 Гц. Мощность устройства равна 650 квар (на фазу). Параметры компонентов рассмотренных вариантов фильтров представлены в табл. 6.

Таблица 6

Table 6

Параметры компонентов ШПФ
The parameters of broadband filters

Вид фильтра	C_1 , мкФ	L_2 , мГн	C_3 (C_2), мкФ	L_3 , мГн	R_d , Ом
ШПФ 2 порядка	52,0	7,8	-	-	65
Фильтр С-типа	52,0	7,8	1300	-	65
ШПФ 3 порядка	52,0	6,35	13,5	-	23
ШПФ с резонансным контуром в продольной ветви	52,0	6,35	11,18	2,72	26

Источник: составлено автором Source: compiled by the author

Частотные зависимости коэффициента передачи токов (рисунок 16) показывают, что фильтр 3 порядка и его модификация обеспечивают эффективную компенсацию наиболее мощных гармоник тока нагрузки в диапазоне 250 – 1000 Гц.

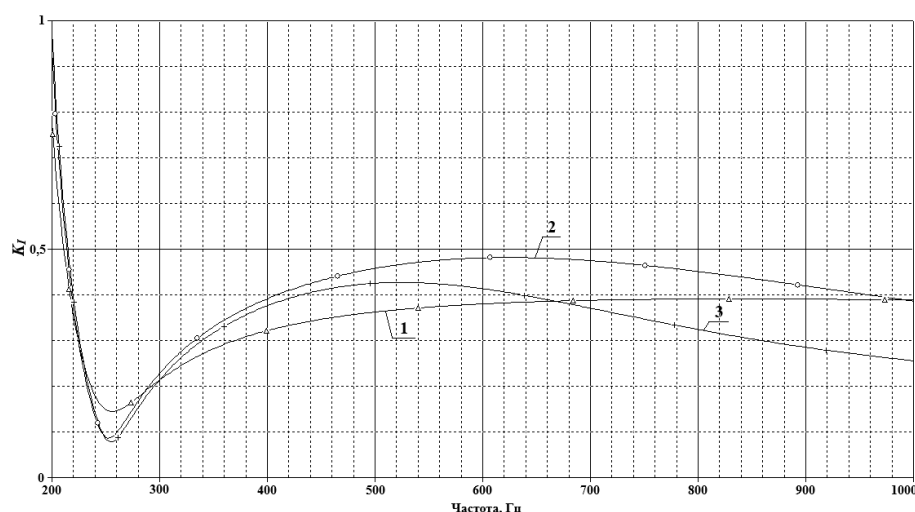


Рис. 16. Графики коэффициента передачи токов 1 – фильтр 2 порядка, 2 – фильтр 3 порядка, 3 – фильтр с резонансным контуром в продольной ветви (Рисунок 13)

Fig. 16. Frequency characteristics of the current ratio 1 – 2-order filter, 2 – 3-order filter, 3 – filter with resonant circuit in the series branch

Источник: составлено автором Source: compiled by the author

Гармонические составляющие тока нелинейной нагрузки, передаваемые в сеть (в процентах от тока основной гармоники), представлены в таблице 7.

Таблица 7
Table 7

Гармоники тока в сети
The line current spectrum

Тип фильтра	5	7	11	13	17
Без фильтра	17,5	11,0	4,5	2,9	1,5
ШПФ 2 порядка ($Q = 5$)	2,6	3,1	1,67	1,1	0,6
ШПФ 3 порядка	1,5	3,6	2,1	1,4	0,4
ШПФ с рез. контуром в продольной ветви (Рисунок 14)	1,5	3,5	1,9	1,1	0,4

Источник: составлено автором Source: compiled by the author

Таким образом, новые варианты широкополосных демпфирующих фильтров 3 – 5 порядка обеспечивают эффективное ослабление высших гармоник в заданном диапазоне частот и коррекцию частотных характеристик сети.

Следует учитывать, что увеличение порядка фильтра сопровождается ростом его стоимости. В качестве базовой структуры ШПФ, обеспечивающего требуемые компенсационные характеристики, целесообразно использовать лестничный фильтр 3 порядка (рис. 5). Сопротивление фильтра в полосе ослабления можно регулировать с помощью резонансного контура, включенного в продольную ветвь (рис. 13). В фильтрах, осуществляющих подавление гармоник низкого порядка, для снижения потерь мощности целесообразно заменить реактор поперечной ветви последовательным резонансным контуром (рис. 11).

Заключение (Conclusions)

В статье рассмотрена процедура проектирования широкополосных демпфирующих фильтров, осуществляющих снижение негативного влияния мощных нелинейных нагрузок на режимы электрических сетей. Показано, что ШПФ различного порядка можно рассматривать как варианты общей структуры в форме реактивного четырехполюсника, нагруженного на демпфирующий резистор. Определены требования к структуре ветвей четырехполюсника, при выполнении которых достигается требуемая селективность характеристик и минимизируются потери мощности в компонентах фильтра.

Процедура проектирования ШПФ, рассмотренная в статье, основана на использовании методов оптимального синтеза линейных цепей. При оптимизации характеристик фильтра учитывается спектральный состав токов искажающих потребителей, а также влияние сети.

Сравнение характеристик ШПФ показало, что новые варианты фильтров, предложенные в статье, имеют значительные технико-экономические преимущества перед традиционными фильтрами 2 порядка и фильтрами С-типа. Увеличение порядка позволяет повысить избирательность фильтров, улучшить их компенсационные характеристики. Использование новых конфигураций компенсирующих устройств позволит снизить негативное влияние мощных нелинейных потребителей на режимы электрических сетей.

Литература

1. Управление качеством электроэнергии / И. И. Карташев, В. Н. Тульский, Р. Г. Шамонов и др.; под ред. Ю. В. Шарова. – 3-е изд., – М.: Издательский дом МЭИ, 2017. – 347 с.
2. Nassif A. D., Xu W., Freitas W. An investigation on the selection of filter topologies for passive filter applications. – IEEE transactions on Power Delivery, Vol. 24, No. 3, 2009, pp. 1710-1718.
3. Das J. Passive filters – potentialities and limitations. – IEEE trans. on industry applications. Vol. 40, No. 1, January/February, 2004, pp. 232-241.
4. Nassif A. Assessing the Impact of Harmonics and Interharmonics of Top and Mudpump Variable Frequency Drives in Drilling Rigs. – IEEE trans. on Industry Applications. 2019, Vol. 55, No. 5, pp. 5574-5583.
5. Badrzadeh D., Smith K., Wilson R. Designing passive harmonic filters for an aluminum smelting plant. IEEE transactions on industry applications. 2011, Vol. 47, No. 2, pp. 973-983.
6. 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, Vol. 51, No. 2, pp. 1417-1426.
7. Wang Y., Chen P., Xu W., et al. A comprehensive investigation on the selection of high-pass harmonic filters. IEEE trans. on Power Delivery. 2022, Vol. 37, No. 5, pp. 4212-4226.
8. Довгун В. П., Егоров Д. Э., Новиков В. В. Широкополосные силовые фильтры для систем электроснабжения с многофазными преобразователями. Электротехника, 2020, № 5, с. 47-51.
9. Егоров Д.Э., Довгун В.П., Боярская Н.П., и др. 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.
10. Xu W., Ding T., Li X., et al. Resonance-free shunt capacitors: configurations, design methods and comparative analysis. IEEE Trans. on Power Delivery, 2016. V. 31. № 5. pp. 2287–2295.
11. 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.
12. Li X., Xu W., Ding T. Damped high passive filter – a new filtering scheme for multipulse rectifier systems. – IEEE transactions on power delivery, Vol. 32, No. 1, 2017, pp. 117-124.
13. Довгун В. П., Егоров Д. Э., Новиков В. В., и др. Параметрический синтез широкополосных силовых фильтров. Электричество, 2018, № 12, с. 14-21.
14. Wang Y., Xu S., Xu W., et al. Comparative Studies on Design Methods for Detuned C-Type Filter. IEEE trans. on Power Delivery. 2020, Vol. 35, No. 4, pp. 1725-1734.
15. Khattab N., El'Gharably A., Sayed M., T. et al. Optimal Multi-Objective Design of Anti-Resonance Fourth-Order Passive Power Filters Using TOPSIS-Based NSGA in Distorted Distribution Systems. 2022 23rd International Middle East Power Systems Conference (MEPCON), Kafrelshiekh University, Egypt 13-15 December 2022.
16. Li X., Xu W. A Novel Filter to Mitigate Interharmonic Problems Caused by Variable Frequency Drives. IEEE PEDS 2017, pp. 887 – 892.
17. 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.
18. Lamom A. Ahmed Ibrahim, Balc A., et al. Optimal Design and Analysis of Anti-Resonance C-Type High-Pass Filters. In Proceedings of 2017 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (IEEE IC/ICPS Europe), Milan, Italy, 6–9 June 2017.
19. Wang Y., Xu W., A shared resonance damping scheme for multiple switchable capacitors, IEEE Trans. Power Delivery, 2018, vol. 33, no. 4, pp. 1973–1980.
20. Aleem S. H. E. A., Zobaa A. F., Balci M. E., Optimal Resonance-free Third-order High-pass Filters Based on Minimization of the Total Cost of the Filters Using Crow Search Algorithm, Electric Power Systems Research, vol. 151, pp. 381-394, Oct. 2017.

21. Xu S., Wang Y., Xiao X., et al. Adaptive Damping –An Improved Resonance Mitigation Scheme for Shunt Capacitors. IEEE Trans. Power Delivery, 2022, Vol. 37, no. 2, pp. 755-764.
22. Zhang G., Wang Y., Xu W., et al. Characteristic parameter-based detuned C-type filter design. – IEEE power and energy technology systems journal. Vol. 5, No. 2, 2018, pp. 65-72

Авторы публикации

Довгун Валерий Петрович – д-р техн. наук, профессор кафедры Систем автоматизации, автоматизированного управления и проектирования Сибирского федерального университета. E-mail: vdovgun55@mail.ru.

Егоров Денис Эдуардович – канд. техн. наук, доцент Сибирского федерального университета. E-mail: denis.egorov.90@br.ru.

Боярская Наталия Петровна – канд. техн. наук, доцент кафедры ТОЭ Красноярского государственного аграрного университета. E-mail: bnp2006dvg@mail.ru

Синяговский Артем Феликсович – канд. техн. наук, доцент кафедры Систем автоматизации, автоматизированного управления и проектирования Сибирского федерального университета. E-mail: daily@bk.ru

Рыжов Никита Андреевич – аспирант Сибирского федерального университета. E-mail: ryzhov.nikita.andreevich@mail.ru.

References

1. Upravlenie kachestvom elektroenergii /I. I/ Kartashev, V.N. Tul'skiy, R.G. Shamonov I dr.; pod red, Uy.V. Sharova. – 3-e izd., – M.: Izdatel'skiy dom MEI, 2017. – 347 s.
2. Nassif A. D., Xu W., Freitas W. An investigation on the selection of filter topologies for passive filter applications. – IEEE transactions on Power Delivery, Vol. 24, No. 3, 2009, pp. 1710-1718.
3. Das J. Passive filters – potentialities and limitations. – IEEE trans. on industry applications. Vol. 40, No. 1, January/February, 2004, pp. 232-241.
4. Nassif A. Assessing the Impact of Harmonics and Interharmonics of Top and Mudpump Variable Frequency Drives in Drilling Rigs. – IEEE trans. on Industry Applications. 2019, Vol. 55, No. 5, pp. 5574-5583.
5. Badrzadeh D., Smith K., Wilson R. Designing passive harmonic filters for an aluminum smelting plant. IEEE transactions on industry applications. 2011, Vol. 47, No. 2, pp. 973-983.
6. 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, Vol. 51, No. 2, pp. 1417-1426.
7. Wang Y., Chen P., Xu W., et al. A comprehensive investigation on the selection of high-pass harmonic filters. IEEE trans. on Power Delivery. 2022, Vol. 37, No. 5, pp. 4212-4226.
8. Dovgun V. P., Egorov D. E., Novikov V.V. Shirokopolosnye silovye filtry dlya sistem elektrosnabzheniya s mnogofaznymi preobrazovatel'nyimi. Elektrotekhika, 2020, № 5, s. 47-51.
9. Egorov D.E., Dovgun V. P., Boyarskaya N.P., et al. Power factor correction in power delivery systems with multipulse nonlinear loads. // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. PROBLEMY ENERGETIKI, 2020. T. 22. № 6. S. 3-15. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-6-3-15.
10. Xu W., Ding T., Li X., et al. Resonance-free shunt capacitors: configurations, design methods and comparative analysis. IEEE Trans. on Power Delivery, 2016. V. 31. № 5. pp. 2287–2295.
11. 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.
12. Li X., Xu W., Ding T. Damped high passive filter – a new filtering scheme for multipulse rectifier systems. – IEEE transactions on power delivery, Vol. 32, No. 1, 2017, pp. 117-124.
13. Dovgun V. P., Egorov D. E., Novikov V.V., et al. Parametricheskii sintezshirokopolosnykh shirokopolosnykh silovykh filtrov. Elektrichestvo, 2018, № 12, s. 14-21.
14. Wang Y., Xu S., Xu W., et al. Comparative Studies on Design Methods for Detuned C-Type Filter. IEEE trans. on Power Delivery. 2020, Vol. 35, No. 4, pp. 1725-1734.
15. Khattab N., El'Gharaby A., Sayed M., T. et al. Optimal Multi-Objective Design of Anti-Resonance Fourth-Order Passive Power Filters Using TOPSIS-Based NSGA in Distorted Distribution Systems. 2022 23rd International Middle East Power Systems Conference (MEPCON), Kafrelsheikh University, Egypt 13-15 December 2022.
16. Li X., Xu W. A Novel Filter to Mitigate Interharmonic Problems Caused by Variable Frequency Drives. IEEE PEDS 2017, pp. 887 – 892.

17. 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.
18. Lamlo A. Ahmed Ibrahim, Balci A., et al. Optimal Design and Analysis of Anti-Resonance C-Type High-Pass Filters. In *Proceedings of 2017 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (IEEE IC/ICPS Europe)*, Milan, Italy, 6–9 June 2017.
19. Wang Y., Xu W., A shared resonance damping scheme for multiple switchable capacitors, *IEEE Trans. Power Delivery*, 2018, vol. 33, no. 4, pp. 1973–1980.
20. Aleem S. H. E. A., Zobaa A. F., Balci M. E., Optimal Resonance-free Third-order High-pass Filters Based on Minimization of the Total Cost of the Filters Using Crow Search Algorithm, *Electric Power Systems Research*, vol. 151, pp. 381-394, Oct. 2017.
21. Xu S., Wang Y., Xiao X., et al. Adaptive Damping –An Improved Resonance Mitigation Scheme for Shunt Capacitors. *IEEE Trans. Power Delivery*, 2022, Vol. 37, no. 2, pp. 755-764.
22. Zhang G., Wang Y., Xu W., et al. Characteristic parameter-based detuned C-type filter design. – *IEEE power and energy technology systems journal*. Vol. 5, No. 2, 2018, pp. 65-72

Authors of the publication

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

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

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

Artyom F. Sinyagovsky – Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia.

Nikita A. Ryzhov – Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia.

Шифр научной специальности: 2.4.3 Электроэнергетика.

Получено **13.12.2023 г.**

Отредактировано **25.12.2023 г.**

Принято **09.01.2024 г.**