

УДК 621.311

**АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПАССИВНЫХ  
ФИЛЬТРОКОМПЕНСИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ  
ДЛЯ СИСТЕМ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ****Д.А. Шандрыгин, Д.Э. Егоров, В.В. Новиков, В.П. Довгун**  
*Сибирский федеральный университет*

В статье исследованы возможности улучшения технико-экономических характеристик пассивных фильтрокомпенсирующих устройств (ФКУ) для систем тягового электроснабжения. Сформулированы критерии, определяющие эффективность ФКУ, используемых в тяговых сетях. На основе сформулированных критериев проведено сравнение основных конфигураций пассивных ФКУ, используемых для компенсации реактивной мощности и ослабления гармонических искажений в системах электроснабжения. Проведенный анализ показал, что для систем тягового электроснабжения перспективны ФКУ, включающие узкополосные резонансные звенья для подавления низкочастотных гармоник и широкополосное демпфирующее звено.

*Ключевые слова:* фильтрокомпенсирующие устройства, качество электроэнергии, системы тягового электроснабжения.

DOI: 10.17212/1727-2769-2019-1-91-103

**Введение**

Одной из основных причин ухудшения качества электроэнергии в сетях высокого напряжения являются мощные нелинейные нагрузки промышленных потребителей. К числу таких потребителей относятся крупные металлургические предприятия, системы тягового электроснабжения железнодорожного транспорта, предприятия нефтехимической промышленности. Низкое качество электроэнергии приводит к сокращению срока службы электрооборудования, технологическим нарушениям и дополнительным потерям электроэнергии.

Системы тягового электроснабжения (СТЭ) переменного тока являются одним из основных видов искажающих потребителей. Они представляют собой сложные электротехнические комплексы, оказывающие значительное негативное влияние на системы связи, автоматики и телемеханики, а в ряде случаев – и на сети внешнего электроснабжения.

Основным средством нормализации качества электроэнергии в СТЭ являются пассивные и активные фильтрокомпенсирующие устройства (ФКУ), осуществляющие компенсацию реактивной мощности и подавление высших гармоник тока и напряжения [1–4]. Недостаток активных ФКУ заключается в том, что они дороги, требуют квалифицированного обслуживания и специальной подготовки персонала. Поэтому основным видом компенсирующих устройств в системах тягового электроснабжения остаются пассивные ФКУ.

В настоящее время в сетях промышленных потребителей используются различные варианты ФКУ, отличающиеся схемным построением, компенсационными характеристиками, стоимостью. Сравнительный анализ топологии и характеристик пассивных ФКУ для общепромышленных систем электроснабжения проведен в работах [5]. Однако системы тягового электроснабжения имеют существенные отличия от сетей промышленных потребителей, которые необходимо учитывать при выборе компенсирующих устройств.

В отличие от многофазных приемников промышленных предприятий электроподвижной состав переменного тока представляет собой однофазную нелинейную нагрузку. Большая часть локомотивов, эксплуатируемых на отечественных железных дорогах, оснащена двухполупериодными выпрямительными установками, питающими коллекторные тяговые двигатели. В спектре тока, потребляемого такой нагрузкой, преобладают низкочастотные гармоники (3, 5, 7-я). Взаимодействие нелинейной нагрузки и контактной сети приводят к искажению напряжений на токоприемниках ЭПС. Искажение кривой напряжения вызывает снижение среднего значения выпрямленного напряжения, что ухудшает энергетические показатели ЭПС [5, 6]

На частотах, превышающих 500 Гц, контактная сеть ведет себя как линия с распределенными параметрами. Электромагнитные процессы в протяженных тяговых сетях сопровождаются резонансными явлениями, которые могут вызвать усиление гармоник высокого порядка и режимные перенапряжения, опасные для изоляции силового оборудования, устройств связи, автоматики и телемеханики, чувствительного электронного оборудования [7].

Искажения напряжений наблюдаются как в СТЭ, так и в сетях внешнего электроснабжения 110 и 220 кВ, питающих тяговые подстанции. Особенно сильно негативное влияние СТЭ проявляется в энергосистемах, имеющих малую мощность короткого замыкания [8].

Анализ взаимодействия систем тягового электроснабжения и ЭПС, проведенный в [6, 7, 9], показал, что основными факторами, оказывающими негативное влияние на качество электроэнергии в системах тягового электроснабжения являются пониженное напряжение в конце протяженных участков, перенапряжения, вызванные искажением синусоидальной формы токов и резонансными явлениями в контактной сети, уменьшение средней величины напряжения на токоприемнике ЭПС, появление дополнительных переходов кривой напряжения через нулевую линию в течение каждого полупериода основной частоты.

ФКУ, устанавливаемые в тяговых сетях, должны выполнять следующие функции:

- компенсация реактивной мощности;
- снижение режимных перенапряжений в контактной сети;
- увеличение среднего значения напряжения на токоприемниках ЭПС за счет подавления мощных низкочастотных гармоник;
- демпфирование резонансных явлений, вызванных волновыми процессами в тяговой сети;
- ослабление высокочастотных гармоник для снижения негативного влияния тяговой сети на линии связи, устройства автоматики и телемеханики.

Цель статьи – исследование возможности улучшения технико-экономических характеристик ФКУ для систем тягового электроснабжения за счет рационального выбора конфигураций пассивных фильтров. Сформулированы критерии, позволяющие оценить эффективность различных конфигураций пассивных ФКУ. На основе проведенного анализа выбраны наиболее перспективные варианты, позволяющие обеспечивать электромагнитную совместимость нелинейных нагрузок с системой тягового электроснабжения, а также внешней сетью.

### 1. Критерии эффективности фильтрокомпенсирующих устройств

Особенности режимов систем тягового электроснабжения, рассмотренные выше, определяют следующие критерии эффективности ФКУ, устанавливаемых в тяговых сетях.

1. Суммарный коэффициент гармоник напряжения на токоприемнике ЭПС:

$$k_U = \frac{\sqrt{\sum U_n^2}}{U_1},$$

здесь  $U_n$  – действующее значение  $n$ -й гармоники напряжения на токоприемнике ЭПС. Этот критерий характеризует способность ФКУ снижать искажения напряжений в тяговой сети.

2. Коэффициент амплитуды напряжения на токоприемнике ЭПС, равный отношению максимального значения напряжения к действующему значению:

$$k_a = \frac{U_{\max}}{U}.$$

Этот критерий позволяет оценить величину режимных перенапряжений на токоприемнике по сравнению с синусоидальным режимом. Уменьшение искажений напряжения и ограничение перенапряжений позволяют создать условия для устойчивой работы выпрямительных установок локомотивов.

3. Коэффициент формы напряжения на токоприемнике ЭПС, равный отношению действующего значения к среднему:

$$k_\Phi = \frac{U}{U_{\text{ср}}}.$$

Уменьшение коэффициента формы напряжения позволяет повысить энергетические показатели СТЭ.

4. Потери в ФКУ на частоте основной гармоники.

Поскольку реактивная мощность ФКУ может варьироваться, для оценки потерь удобно использовать критерий, равный отношению активной мощности к полной на частоте основной гармоники.

5. Стоимость ФКУ, определяемая суммарной (установленной) емкостью батарей конденсаторов и индуктивностью реакторов.

6. Уровень искажений напряжений и токов на компонентах фильтра. В работе [5] этот параметр предложено определять с помощью коэффициента, равного отношению действующего значения несинусоидальной кривой к действующему значению основной гармоники (Stress Indices).

Для конденсаторов

$$k_{sU} = \frac{U}{U_1}.$$

Для реакторов

$$k_{sI} = \frac{I}{I_1}.$$

Первые два критерия позволяют оценить, насколько эффективно ФКУ снижает искажения напряжения в тяговой сети.

Уменьшение коэффициента формы напряжения и потерь мощности в ФКУ на частоте основной гармоники позволяет повысить энергетические показатели СТЭ.

## 2. Основные структуры пассивных ФКУ

Рассмотрим основные конфигурации пассивных ФКУ, используемых для компенсации реактивной мощности и ослабления гармонических искажений в системах электроснабжения.

СТЭ, ЭПС и фильтрокомпенсирующие устройство образуют сложную резонансную систему, аналитический расчет которой связан с большими трудностями. Для исследования частотных и временных характеристик такой системы используем программу схемотехнического моделирования Pspice. Контактная сеть представлена моделью в форме каскадного соединения П-образных четырехполюсных секций [10] (рис. 1). Каждая секция соответствует участку сети длиной 10 км. Модель учитывает активное и индуктивное сопротивление проводов, емкость между контактным проводом и рельсами. ЭПС моделируется импульсным источником тока, амплитудный спектр которого (в процентах от уровня первой гармоники) приведен в табл. 1.

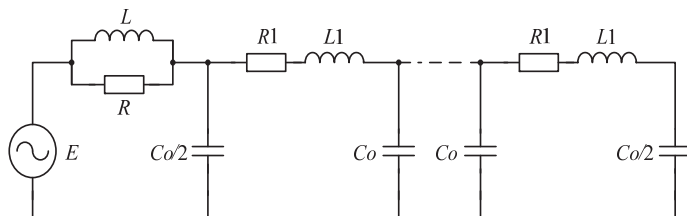


Рис. 1 – Модель контактной сети

Fig. 1 – The model contact network

При создании модели контактной сети приняты следующие условия: марка троса ПБСМ-95, контактный провод МФ-100, тип рельса Р75, действующее значение тока ЭПС 360 А.

Таблица 1 / Table 1

Амплитудный спектр гармоник  
The amplitude harmonic spectrum

3	5	7	9	11	13
31,6 %	18,3 %	11,5 %	7,8 %	4,4 %	3,4 %

Простейшим вариантом ФКУ, используемым в системах тягового электроснабжения, является однозвенный узкополосный фильтр (рис. 2). Резонансная частота фильтра

$$\omega_{\text{рез}} = \frac{1}{\sqrt{L_3 C_3}}.$$

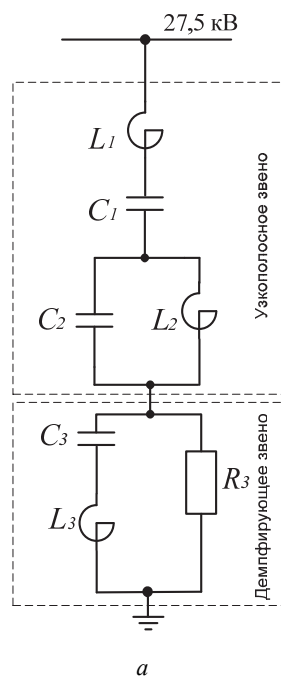
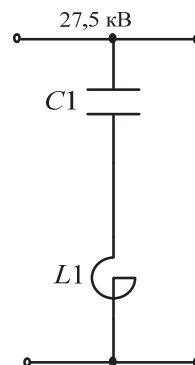
Согласно [2] резонансная частота контура должна составлять 135–143 Гц. При таких условиях ФКУ шунтирует наиболее мощную 3-ю гармонику тягового тока.

**Двухрезонансные фильтры.** В соответствии с требованиями нормативных документов [2] необходимо ослабление всего спектра гармоник тока и напряжения ( $n = 5, 7, \dots$ ). Для этого требуются более сложные схемы ФКУ, осуществляющие одновременное подавление нескольких гармоник.

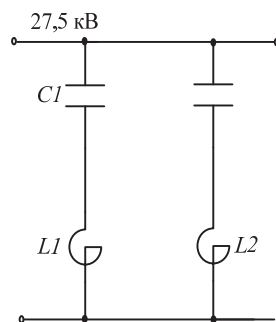
В системах тягового электроснабжения отечественных железных дорог используется двухрезонансное ФКУ, выпускаемое ООО «НИИЭФА-ЭНЕРГО»

(рис. 3, а) Оно обеспечивает компенсацию реактивной мощности и подавление наиболее мощных 3- и 5-й гармоник тока тяговой нагрузки [11, 12]. Мощность ФКУ составляет 2,8 Мвар.

Рис. 2 – Узкополосный фильтр  
Fig. 2 – The single-tuned filter



а



б

Рис. 3 – Схемы двухрезонансных фильтрокомпенсирующих устройств  
Fig. 3 – Two-resonance filtering and compensation systems

На рис. 3, а последовательный контур  $L_1 - C_1$  и параллельный контур  $L_2 - C_2$  образуют двухрезонансный фильтр, настроенный на частоты 3- и 5-й гармоник. Подобная схема впервые рассмотрена в [1]. Третье звено, состоящее из последовательного контура  $L_3 - C_3$  и резистора  $R_3$ , предназначено для демпфирования резонансных режимов на частотах высших гармоник ( $n > 10$ ). Для снижения потерь на основной частоте контур  $L_3 - C_3$  настроен в резонанс на частоту 50 Гц.

Другой вариант двухрезонансного ФКУ представляет собой параллельное соединение узкополосных звеньев, обеспечивающих компенсацию реактивной

мощности и подавление 3- и 5-й гармоник (рис. 3, б). Такая схема рассмотрена в работе [11].

На рис. 4 представлена частотная характеристика входного сопротивления относительно токоприемника ЭПС при установке ФКУ (рис. 2 и 3, а) на посту секционирования. При моделировании ФКУ «НИИЭФА-ЭНЕРГО» использовались значения элементов, представленные в [12].

Включение простейшего ФКУ (рис. 2) не позволяет ослабить высшие гармоники тока и напряжения ( $n \geq 5$ ) и демпфировать резонансные режимы в тяговой сети. Включение ФКУ (рис. 3) смещает резонанс системы «ФКУ–тяговая сеть» в область высоких частот (22–30 гармоники). Однако полностью демпфировать резонансные явления с помощью рассматриваемых устройств невозможно. На рис. 5 показана кривая напряжения на токоприемнике ЭПС при включении ФКУ.

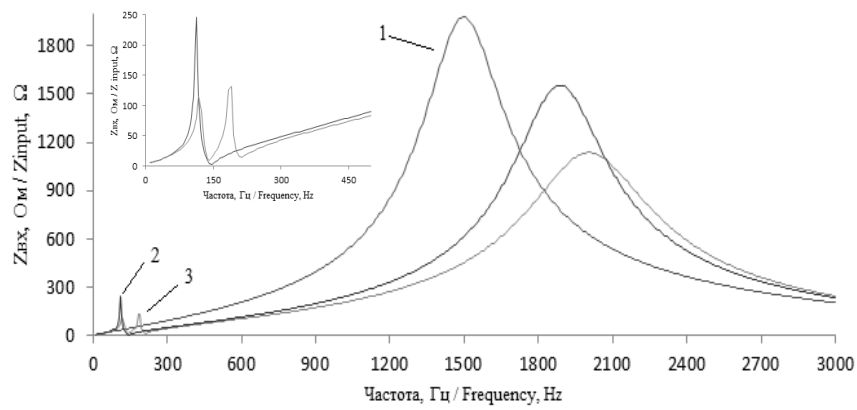


Рис. 4 – Частотные характеристики тяговой сети:

1 – без ФКУ; 2 – при включении простейшего узкополосного фильтра; 3 – при включении двухрезонансного ФКУ

Fig. 4 – Frequency responses of the traction system:

1 – no FCS; 2 – with the simplest single-tuned filter; 3 – with two-resonance FCS

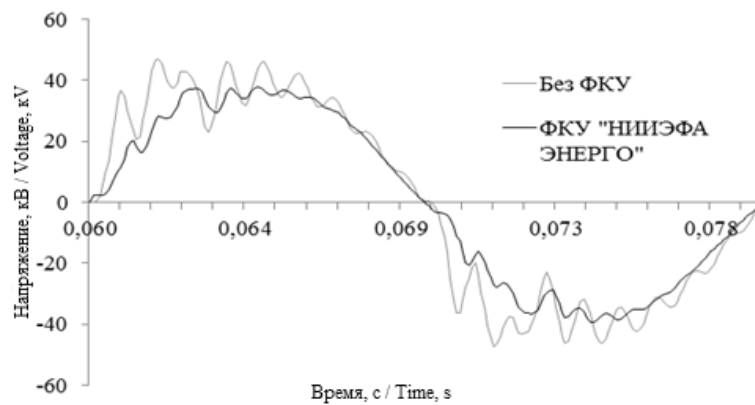


Рис. 5 – Кривые напряжения на токоприемнике ЭПС при включении двухрезонансного ФКУ

Fig. 5 – Pantograph voltage waveform

Анализ показал, что частотные характеристики двухрезонансных ФКУ (рис. 3, а и б) отличаются незначительно. Это объясняется тем, что, как показано в [9], схемы представляют собой дуальные канонические формы реализации пассивного LC-двухполосника 4-го порядка. Достоинством ФКУ (рис. 3, б) является меньшая установленная мощность конденсаторов и соответственно меньшая стоимость. Кроме того, ФКУ, образованные параллельным соединением звеньев, можно использовать для ступенчатого регулирования реактивной мощности. Для этого необходимо отключить высокочастотное звено.

*Схемы ФКУ с широкополосными звеньями.* Недостаток двухрезонансных ФКУ (рис. 3, а и б) заключается в том, что они осуществляют подавление только низкочастотных гармоник. В диапазоне частот выше 250 Гц сопротивление фильтров имеет индуктивный характер и увеличивается с ростом частоты, что не позволяет демпфировать резонансные режимы в протяженной контактной сети. Это может вызвать режимные перенапряжения, а также приводит к усилению мешающего влияния тяговой сети на линии связи.

Альтернативой резонансным фильтрам являются демпфирующие широкополосные фильтры (ШПФ) [1, 13]. Схема ФКУ с широкополосным фильтром второго порядка показана на рис. 6.

ШПФ имеет минимальное сопротивление на резонансной частоте

$$\omega_0 = 1/\sqrt{LC}.$$

На частотах, превышающих резонансную, сопротивление ШПФ имеет преимущественно резистивный характер. Это дает возможность демпфировать резонансные режимы в тяговой сети. Добротность широкополосного фильтра второго порядка

$$Q = \frac{R}{\sqrt{L/C}} = \frac{R}{X_L(\omega_0)}.$$

Как правило, значения добротности выбирают в диапазоне 0,5...5.

Недостаток низкодобротного широкополосного фильтра второго порядка – значительные потери мощности на основной частоте. Для уменьшения потерь в поперечную ветвь фильтра включают конденсатор  $C_2$  (рис. 7, а). Такая конфигурация получила название фильтра С-типа [1, 14]. Емкость конденсатора  $C_2$  выбирают такой, чтобы резонансная частота колебательного контура  $LC_2$  совпадала с частотой основной гармоники.

Поскольку колебательный контур  $LC_2$  настроен на частоту первой гармоники, сопротивление фильтра на частоте основной гармоники

$$Z(j\omega_1) = \frac{1}{j\omega_1 C_1}.$$

Таким образом, на частоте основной гармоники фильтр С-типа эквивалентен конденсатору емкостью  $C_1$ . Резонансная частота фильтра определяется по формуле

$$\omega_{02} = \sqrt{(C_1 + C_2)/LC_1 C_2}.$$

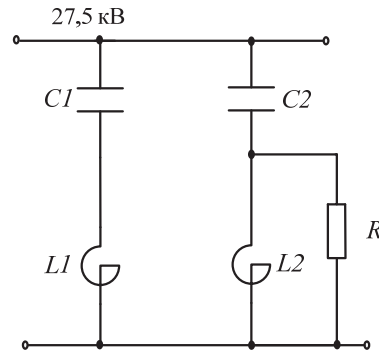


Рис. 6 – Схема ФКУ с широкополосным звеном 2-го порядка

Fig. 6 – FCS with the second-order broadband filter

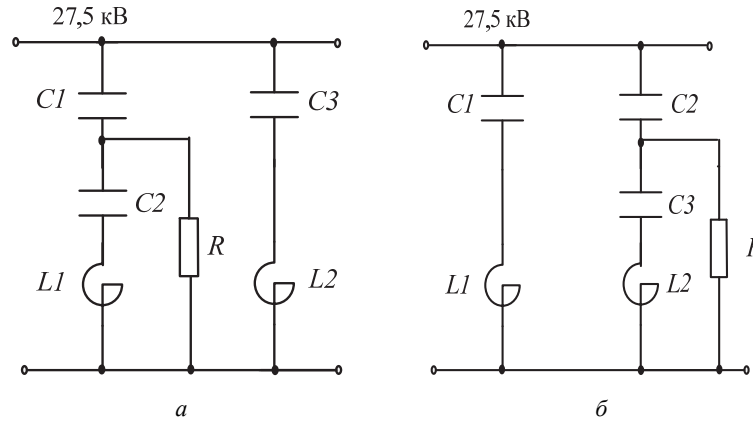


Рис. 7 – ФКУ с фильтром С-типа

Fig. 7 – FCS with the C-type filter

Фильтры С-типа обеспечивают компенсацию реактивной мощности на частоте основной гармоники и ослабление высших гармоник. В первую очередь происходит подавление гармоник, частота которой совпадает с резонансной частотой фильтра, определяемой формулой (1). Частотную характеристику фильтра в полосе ослабления можно варьировать, изменяя сопротивление демпфирующего резистора  $R$ . Увеличение  $R$  способствует более эффективному подавлению гармоник с частотой, равной  $\omega_{02}$ .

Частотные характеристики ФКУ с широкополосными звеньями показаны на рис. 8.

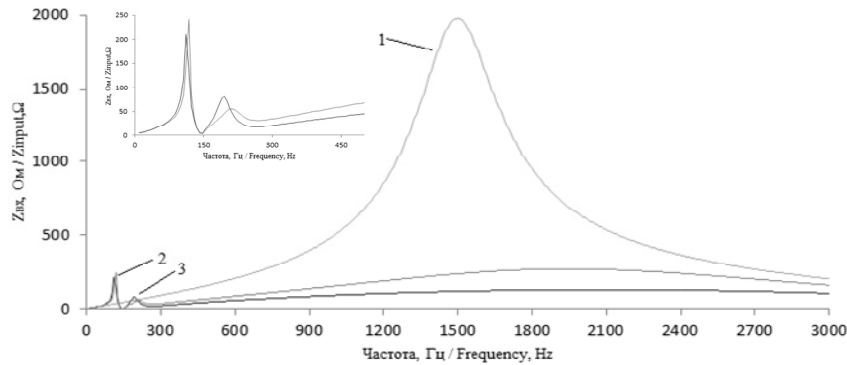


Рис. 8 – Частотная характеристика тяговой сети:

1 – без ФКУ; 2 – при включении ФКУ с С-фильтром, настроенным на 3-ю гармонику;  
3 – при включении с С-фильтром, настроенным на 5-ю гармонику

Fig. 8 – Frequency responses of the traction system:

1 – no FCS; 2 – FCS with the C-filter tuned to 3 harmonic; 3 – FCS with the C-filter tuned to 5 harmonic

ФКУ с фильтром С-типа обеспечивает более эффективное демпфирование резонансного максимума частотной характеристики, чем устройство с широкополосным фильтром второго порядка. Кроме того, фильтр С-типа имеет меньшие потери мощности на частоте основной гармоники. Платой за это является большая суммарная емкость, а следовательно, и стоимость фильтра.

Оценим теперь потери мощности на частоте основной гармоники в рассматриваемых компенсирующих устройствах. Основную долю потерь в пассивных ФКУ составляют потери в нагрузочных резисторах и реакторах. Значения активной мощности, потребляемой рассматриваемыми конфигурациями ФКУ на частоте основной гармоники, представлены в табл. 2. Добротность реакторов была принята равной 40.

### 3. Сравнение характеристик пассивных ФКУ

Оценим теперь техническую и экономическую эффективность рассмотренных конфигураций ФКУ с помощью предложенных критериев. Результаты сравнения структур ФКУ, рассмотренных выше, представлены в табл. 2. В таблице использованы следующие обозначения: УП – узкополосное резонансное звено; ШП – широкополосное звено 2-го порядка; С – фильтр С-типа. Цифра (3 или 5) обозначает порядковый номер гармоники, на которую настроен фильтр.

Таблица 2 / Table 2

**Критерии эффективности ФКУ**  
**Criteria of FCS effectiveness**

Схема ФКУ	$k_U$ , %	$k_a$	$k_{\Phi}$ При $I = 300 \text{ A}$ / $I = 600 \text{ A}$	$P/S$	$k_{sU}$	$k_{sI}$	$\Sigma C$ , мкФ	$\Sigma L$ , мГн
Тяговая сеть без ФКУ	40	2,71	1,238/ 1,490	–	–	–		
УПЗ	19,6	2,08	1,148/ 1,192	0,0035	1,031	1,27	17	70,9
УПЗ+УП5	14	1,8	1,138/ 1,176	0,0024	1,022	1,29	15,55	197
«НИИЭФА- ЭНЕРГО»	17	1,99	1,141/ 1,187	0,0072	2,6	1,49	445,3	90,3
СЗ+УП5	8,9	1,60	1,13/ 1,16	0,00219	1,02	1,2	118,8	144,1
УПЗ+С5	7,4	1,63	1,11/ 1,12	0,00221	1,01	1,2	310,8	147
УПЗ+ШП5	11	1,69	1,120/ 1,126	0,0030	1,02	1,2	16,75	185

Результаты, представленные в табл. 2, позволяют сделать следующие выводы.

Однозвенный узкополосный фильтр обеспечивает компенсацию реактивной мощности и подавление наиболее мощной третьей гармоники.

Основные недостатки ФКУ «НИИЭФА-ЭНЕРГО»: значительные потери мощности на частоте основной гармоники, недостаточное ослабление высокочастотных гармоник, большая установленная мощность конденсаторов. Включение третьего звена последовательно с двухрезонансным фильтром увеличивает сопротивление ФКУ для низкочастотных гармоник и ухудшает его фильтрующие свойства. Анализ, проведенный в работе [15], показал, что исключение третьего звена в схеме ФКУ «НИИЭФА-ЭНЕРГО» приводит к значительному снижению потерь. Еще одним недостатком ФКУ является большая суммарная емкость конденсаторов и соответственно большая стоимость. В [12] отмечается, что стоимость ФКУ «НИИЭФА-ЭНЕРГО» в 2...3 раза превышает стоимость простейшего компенсационного устройства такой же мощности.

Результаты анализа показывают, что минимальное значение суммарного коэффициента гармоник напряжения на токоприемнике ЭПС обеспечивают ФКУ с

широкополосными демпфирующими фильтрами. Установка таких фильтров уменьшает вероятность режимных перенапряжений. Одновременно увеличивает среднее значение выпрямленного напряжения, снижается отрицательное влияние ЭПС на устройства проводной связи, автоматики и телемеханики.

Недостаток ФКУ с широкополосным звеном второго порядка – значительные потери на частоте основной гармоники. Основное достоинство фильтра С-типа по сравнению с широкополосным фильтром второго порядка – меньшие потери мощности на частоте основной гармоники. Однако минимум потерь обеспечивается в том случае, если последовательный колебательный контур  $L-C_2$  точно настроен в резонанс на частоту основной гармоники. При отклонениях индуктивности и емкости контура от расчетных значений потери на частоте основной гармоники значительно возрастают.

Серьезный недостаток фильтров С-типа – большая суммарная емкость конденсаторов. Например, суммарная емкость конденсаторов ФКУ с фильтром С-типа, настроенным на частоту 5-й гармоники, составляет 310,8 мкФ. В то же время емкость конденсаторов ФКУ с двумя узкополосными звеньями составляет всего 15,55 мкФ.

### Заключение

В статье исследована возможность улучшения технико-экономических характеристик ФКУ для систем тягового электроснабжения за счет рационального выбора конфигураций фильтров. Проанализированы основные факторы, оказывающие негативное влияние на качество электроэнергии в системах тягового электроснабжения. Определены критерии, определяющие эффективность пассивных ФКУ, устанавливаемых в системах тягового электроснабжения. С помощью предложенных критериев проведен сравнительный анализ различных конфигураций ФКУ. Показано, что включение широкополосных демпфирующих фильтров в состав ФКУ позволяет уменьшить суммарный коэффициент гармоник напряжения на токоприемнике ЭПС, снизить режимные перенапряжения за счет демпфирования резонансных режимов, увеличить среднее значение напряжения на токоприемнике. Однако ни одно из рассмотренных устройств не отвечает всем сформулированным критериям. Необходим поиск новых, более эффективных структур ФКУ, обеспечивающих электромагнитную совместимость ЭПС с системой электроснабжения, устройствами связи, автоматики и телемеханики.

### ЛИТЕРАТУРА

1. **Аррилага Дж., Брэдли Д., Боджер П.** Гармоники в электрических системах: пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 320 с.
2. Правила устройства системы тягового электроснабжения железных дорог Российской Федерации: ЦЭ-462: утв. М-вом путей сообщ. Рос. Федерации 04.06.97. – М.: МПС РФ, 1997.
3. **Бородулин Б.М., Герман Л.А., Николаев Г.А.** Конденсаторные установки электрифицированных железных дорог. – М.: Транспорт, 1983. – 183 с.
4. **Герман Л.А., Серебряков А.С.** Регулируемые установки емкостной компенсации в системах тягового электроснабжения железных дорог: монография. – М.: МИИТ, 2012. – 211 с.
5. **Nassif A., Xu W., Freitas W.** An investigation on the selection of filter topologies for passive filter applications // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2009. – Vol. 24, N 3. – P. 1710–1718.
6. **Tan P-C., Morrison R.E., Holmes D.** Voltage form factor control and reactive power compensation in a 25-kV electrified railway system using a shunt active filter based on voltage detection // IEEE Transactions on Industry Applications. – 2003. – Vol. 39, N 2. – P. 575–581.

7. Показатели качества электроэнергии на токоприемнике и взаимодействие ЭПС с системой тягового электроснабжения переменного тока / В.А. Кучумов, Д.В. Ермоленко, Н.И. Молин, И.В. Павлов, Н.Н. Широченко, А.В. Ермоленко // Вестник ВНИИЖТ. – 1997. – № 2. – С. 11–16.
8. **Герман Л.А., Серебряков А.С., Максимова А.А.** Фильтрокомпенсирующие установки в тяговых сетях переменного тока // Вестник ВНИИЖТ. – 2016. – Т. 75, № 1. – С. 26–34.
9. **Довгун В.П., Сташков И.А.** Двухрезонансные силовые фильтры для систем тягового электроснабжения // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2015. – № 2. – С. 217–220.
10. **Савоськин А.Н., Кулинич Ю.М., Алексеев А.С.** Математическое моделирование электромагнитных процессов в динамической системе «контактная сеть – электровоз» // Электричество. – 2002. – № 2. – С. 29–35.
11. **Герман Л.А., Серебряков А.С., Дуленов Д.Е.** Исследование переходных процессов в двухступенчатой установке поперечной емкостной компенсации в системе электроснабжения железных дорог // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2011. – № 4 (91). – С. 198–202.
12. Эффективность фильтрокомпенсирующих устройств в тяговой сети переменного тока / Л.А. Герман, А.С. Серебряков, В.П. Гончаренко, А.В. Мизинцев // Вестник ВНИИЖТ. – 2013. – № 5. – С. 56–62.
13. **Das J.** Passive filters – potentialities and limitations // IEEE Transactions on Industry Applications. – 2004. – Vol. 40, N 1. – P. 232–241.
14. **Dugan R., McGranaghan M.** Electrical power systems quality. – New York: McGraw-Hill, 2002.
15. **Черемисин В.Т. Квашук В.А., Бренков С.Н.** Двухрезонансные фильтрокомпенсирующие устройства электрифицированных железных дорог // Наука и транспорт. – 2008. – Спец. вып.: Модернизация железнодорожного транспорта. – С. 48–51.

#### ANALYSIS OF THE EFFECTIVENESS OF PASSIVE FILTER-DEVICES FOR TRACTION POWER SUPPLY

**Shandrigin D.A., Egorov D.E., Novikov V.V., Dovgun V.P.**  
*Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia*

Problems of improving technical and economic performance of filtering and compensation systems (FCS) for railway AC traction systems are considered in this paper. Criteria of FCS effectiveness in railway traction systems are proposed. Different FCS topologies providing reactive power compensation and harmonic mitigation were investigated through the use of the proposed criteria. It is shown that appropriate solutions for railway traction systems are FCS including single-tuned sections for low-frequency harmonics and broadband damping sections.

*Keywords:* passive filtering and compensation systems, power quality, railway traction systems.

DOI: 10.17212/1727-2769-2019-1-91-103

#### REFERENCES

1. Arrillaga J., Bradley D.A., Bodger P.S. *Power system harmonics*. Chichester, UK, Wiley, 1985 (Russ. ed.: Arrilaga Dzh., Bredli D., Bodzher P. *Garmoniki v elektricheskikh sistemakh*. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1990. 320 p.).
2. *Rules of the structure of system of traction power supply of the railroads of the Russian Federation, Order of MPS RF №TsE-462 of April 06, 1997*. Moscow, RF Ministry of Railways Publ., 1997. 79 p.
3. Borodulin B.M., German L.A., Nikolaev G.A. *Kondensatornye ustanovki elektrifitsirovannykh zheleznikh dorog* [Capacitor units of electrified railways]. Moscow, Transport Publ., 1983. 183 p.
4. German L.A., Serebryakov A.S. *Reguliruyemye ustanovki emkostnoi kompensatsii v sistemakh tyagovogo elektrosnabzheniya zheleznikh dorog* [Adjustable installations of capacitive compensation in the systems of traction power supply of railways]. Moscow, MIIT Publ., 2012. 211 p.

5. Nassif A., Xu W., Freitas W. An investigation on the selection of filter topologies for passive filter applications. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2009, vol. 24, no. 3, pp. 1710–1718.
6. Tan P.-C., Morrison R.E., Holmes D. Voltage form factor control and reactive power compensation in a 25-kV electrified railway system using a shunt active filter based on voltage detection. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2003, vol. 39, no. 2, pp. 575–581.
7. Kuchumov V.A., Ermolenko D.V., Molin N.I., Pavlov I.V., Shirochenko N.N., Ermolenko A.V. Pokazateli kachestva elektroenergii na tokopriemnike i vzaimodeistvie EPS s sistemoi tyagovogo elektrosnabzheniya peremennogo toka [Quality indices of electric energy on pantographs and interaction between electric rolling stock and AC traction electric supply system]. *Vestnik nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta – Vestnik of the Railway Research Institute*, 1997, no. 2, pp. 11–16.
8. German L.A., Serebryakov A.S., Maksimova A.A. Fil'trokompensiruyushchie ustanovki v tyagovykh setyakh peremennogo toka [Filter compensating installations in AC traction networks]. *Vestnik nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta – Vestnik of the Railway Research Institute*, 2016, vol. 75, no. 1, pp. 26–34.
9. Dovgun V.P., Stashkov I.A. Dvukhrezonansnye silovye fil'try dlya sistem tyagovogo elektrosnabzheniya [Two-resonance power filters for electric traction systems]. *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka – Scientific problems of transportation in Siberia and the Far East*, 2015, no. 2, pp. 217–220.
10. Savos'kin A.N., Kulinich Yu.M., Alekseev A.S. Matematicheskoe modelirovanie elektromagnitnykh protsessov v dinamicheskoi sisteme "kontaktnaya set' – elektrovoz" [Mathematical modeling of electromagnetic transients in a dynamic system: contact network – electric locomotive]. *Elektrichestvo – Electrical Technology Russia*, 2002, no. 2, pp. 29–35.
11. German L.A., Serebryakov A.S., Dulepov D.E. Issledovanie perekhodnykh protsessov v dvukhstupenchatoi ustanovke poperechnoi emkostnoi kompensatsii v sisteme elektrosnabzheniya zheleznykh dorog [The research of initiation transients of two-stage crossover capacitive compensation facility in railway power supply system]. *Trudy NGTU im. R.E. Alekseeva – Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev*, 2011, no. 4 (91), pp. 198–202.
12. German L.A., Serebryakov A.S., Goncharenko V.P., Mizintsev A.V. Effektivnost' fil'trokompensiruyushchikh ustroystv v tyagovoi seti peremennogo toka [Efficiency of Filter Compensating Devices as Used with AC Traction Power Supply System]. *Vestnik nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta – Vestnik of the Railway Research Institute*, 2013, no. 5, pp. 56–62.
13. Das J. Passive filters – potentialities and limitations. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2004, vol. 40, no. 1, pp. 232–241.
14. Dugan R., McGranaghan M. *Electrical power systems quality*. New York, McGraw-Hill, 2002.
15. Cheremisin V.T., Kvashchuk V.A., Brenkov S.N. Dvukhrezonansnye fil'trokompensiruyushchie ustroystva elektrifitsirovannykh zheleznykh dorog [Two-resonance filtering and compensating systems for electrified railways]. *Nauka i transport – Science and Transport*, 2008, Spec. iss. *Modernizatsiya zheleznodorozhnogo transporta* [Modernization of railway Transport], pp. 48–51.

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



**Шандрыгин Денис Александрович** – родился в 1995 году, аспирант кафедры систем автоматики, автоматизированного управления и проектирования, Институт космических и информационных технологий, ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет». Область научных интересов: электроэнергетика, тяговое электроснабжение железных дорог. (Адрес: 660074, Россия, г. Красноярск, ул. Киренского, 26. E-mail: shandrygin2012@yandex.ru).

**Shandrygin Denis Aleksandrovich** – (b. 1995) – post-graduate student at the department of Systems of automatic equipment, automated management and design, Institute of Space and Information Technologies, Siberian Federal University. His research interests are currently focused on energy system, traction power supply of railways. (Address: 26, Kirensky St., Krasnoyarsk, 660074, Russia. E-mail: shandrygin2012@yandex.ru).



**Егоров Денис Эдуардович** – родился в 1990 году, канд. техн. наук, старший преподаватель кафедры систем автоматики, 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. (Адрес: 660074, Россия, г. Красноярск, улица Киренского, 26. E-mail: denis.egorov.90@bk.ru).

**Egorov Denis Eduardovich** (b. 1990) – Candidate of Sciences (Eng.), 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 specialty «Information systems and technologies (in power engineering)». He defended his thesis in 2015. (Address: 26, Kirensky St., Krasnoyarsk, 660074, Russia. E-mail: denis.egorov.90@bk.ru).



**Новиков Виктор Валерьевич** – родился в 1983 году, канд. техн. наук, доцент кафедры систем автоматики, автоматизированного управления и проектирования, Институт космических и информационных технологий, ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет». Область научных интересов: электроэнергетика, системы управления качеством электроэнергии. Опубликовано 18 научных работ. (Адрес: 660074, Россия, г. Красноярск, ул. Киренского, 26. E-mail: nvfagot@mail.ru).

**Novikov Viktor Valerievich** (b. 1983) – Candidate of Sciences (Eng.), associate professor at the Department of Automation Systems, Automated Control and Design, Institute of Space and Information Technologies, Siberian Federal University. His research interests are currently focused on energy systems, power quality management systems. He is author of 18 scientific papers. (Address: 26, Kirensky St., Krasnoyarsk, 660074, Russia. E-mail: nvfagot@mail.ru).



**Довгун Валерий Петрович** – родился в 1955 году, д-р техн. наук, профессор кафедры систем автоматики, автоматизированного управления и проектирования, Институт космических и информационных технологий, ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет». Область научных интересов: синтез аналоговых и цифровых цепей и систем; системы управления качеством электроэнергии. Опубликовано 161 научная работа. (Адрес: 660074, Россия, г. Красноярск, ул. Киренского, 26. E-mail: valerydovgun@gmail.com).

**Dovgun Valery Petrovich** (b. 1955) – Doctor of Sciences (Eng.), professor at the department of Systems of automatic equipment, automated management and design, Institute of Space and Information Technologies, Siberian Federal University. His research interests are currently focused on synthesis of analog and digital circuits and systems, power quality management systems. He is author of 161 scientific papers. (Address: 26, Kirensky St., Krasnoyarsk, 660074, Russia. E-mail: valerydovgun@gmail.com).

Статья поступила 04 март 2019 г.  
Received March 04, 2019

#### To references:

Shandrigin D.A., Egorov D.E., Novikov V.V., Dovgun V.P. Analiz effektivnosti passivnykh fil'trokompensiruyushchikh ustroystv dlya sistem tyagovogo elektrosnabzheniya [Analysis of the effectiveness of passive filter-devices for traction power supply]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2019, no. 1 (42), pp. 91–103. DOI: 10.17212/1727-2769-2019-1-91-103.