© Егоров Д.Э, Довгун В.П, Боярская Н.П, Ян А.В., Слюсарев А.С.

(cc) BY

УДК 621.314 DOI:10.30724/1998-9903-2020-22-6-3-15

КОРРЕКЦИЯ КОЭФФИЦИЕНТА МОЩНОСТИ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С МНОГОФАЗНЫМИ НЕЛИНЕЙНЫМИ НАГРУЗКАМИ

Егоров Д.Э[1], Довгун В.П[1], Боярская Н.П.[2], Ян А.В.[1],Слюсарев А.С[1].

[1]Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия
[2]Красноярский государственный аграрный университет, г. Красноярск, Россия

Резюме: *ЦЕЛЬ. Многофазные (многопульсные) выпрямители являются одной из основных нелинейных нагрузок в системах электроснабжения промышленных предприятий. Преимуществом многофазных схем является меньший уровень низкочастотных гармоник тока на стороне переменного напряжения. В реальных условиях токи многофазных выпрямителей имеют широкий спектр, включающий как характеристические, так и нехарактеристические гармоники. Это отрицательно сказывается на качестве электроэнергии. МЕТОДЫ. Традиционным средством компенсации реактивной мощности в сетях промышленных потребителей являются конденсаторные установки. Однако включение конденсаторов приводит к образованию параллельных резонансных контуров с индуктивностью сети. Это может вызвать резонансное усиление отдельных гармоник, генерируемых нелинейной нагрузкой. РЕЗУЛЬТАТЫ. В статье рассмотрены устройства параллельной емкостной компенсации для систем электроснабжения, питающих многофазные нелинейные нагрузки, в форме параллельного соединения широкополосных пассивных фильтров лестничной структуры. Они обеспечивают не только компенсацию реактивной мощности, но и коррекцию частотных характеристик сети для демпфирования резонансных режимов. Рассмотрен аналитический метод расчета предложенных широкополосных фильтров, основанный на денормировании фильтра-прототипа по частоте и реактивной мощности. Метод позволяет варьировать уровень ослабления отдельных гармоник, передаваемых во внешнюю сеть, за счет распределения мощности компенсирующего устройства между звеньями. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Сравнительный анализ различных конфигураций показал, что предложенные ФКУ на основе широкополосных фильтров позволяют компенсировать реактивную мощность на частоте основной гармоники, а также снизить уровень гармоник, создаваемых многофазными нелинейными нагрузками, до значений, определяемых ГОСТ 32144-2013. Предложенные в статье фильтры обеспечивают эффективное подавление как характеристических, так и нехарактеристических гармонических составляющих, а также имеют меньшие потери мощности на частоте основной гармоники по сравнению с известными решениями.*

Ключевые слова: *коэффициент мощности, гармоники, многопульсные нелинейные нагрузки, широкополосные пассивные фильтры*.

Для цитирования: 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.

POWER FACTOR CORRECTION IN POWER DELIVERY SYSTEMS WITH MUTIPULSE NONLINEAR LOADS

DE. Egorov [1], VP. Dovgun[1], NP. Boyarskaya [2], Jan AW[1], AS. Slyusarev [1]

[1]Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia
[2]Krasnoyarsk State Agricultural University, Krasnoyarsk, Russia

Abstract: *THE PURPOSE. Mutipulse rectifiers are widely used as a nonlinear loads in industrial distribution systems. The advantage of mutipulse rectifiers is low harmonic emission and high power factor. However input currents of mutipulse rectifiers have a wide spectrum including characteristic and noncharacteristic harmonics. This has a negative impact on the power quality. Shunt capacitors are the simplest form of reactive power compensation in industrial power distribution systems. However power systems with nonlinear loads suffer from severe harmonic distortion due to the parallel resonance between capacitors and system inductance. Special compensating devices for reactive power compensation and correction of power system frequency response for resonances damping are necessary. METHODS. In this paper shunt compensating devices for power delivery systems with multipulse nonlinear loads are considered. Proposed devices are composed of 3-5 order parallel connected passive broadband filters. They provide power factor correction, voltage and current harmonics mitigation and resonance modes damping. A general broadband filter design procedure based on frequency and reactive power scaling of normalized filter parameters is developed. RESULTS. Characteristics of different compensating devices configurations using broadband passive filters are discussed. It is shown that broadband filtering devices enable compensation of fundamental frequency reactive power as well as mitigation of voltage harmonic level to values determined by Russian and international standards. Proposed devices have lower fundamental power losses in comparing with known solutions. CONCLUSION. Proposed analytical design method is applicable to broadband filters of different orders.*

Keywords: *power factor, harmonics, multipulse nonlinear loads, broadband passive filters*

For citation: Egorov DE, Dovgun VP, Boyarskaya NP, Jan AW, Slyusarev AS. Power factor correction in power delivery systems with mutipulse nonlinear loads. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2020;22(6):3-15. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-6-3-15.

Введение и литературный обзор

Во многих системах электроснабжения (СЭС) промышленных предприятий наблюдаются значительные отклонения показателей качества электроэнергии (КЭ) от требований ГОСТ 32144-2013. Несоответствие показателей КЭ требованиям стандартов приводит к снижению энергетических показателей, технологическим нарушениям, ухудшению функционирования оборудования как у конечных потребителей, так и в СЭС в целом [1, 2].

В отличие от сетей низкого напряжения, в которых преобладают маломощные однофазные нелинейные приемники, в сетях промышленных потребителей, таких как металлургические или нефтехимические предприятия, основным источником искажений являются крупные нелинейные нагрузки. Значительную часть нагрузок промышленных предприятий составляют многофазные (многопульсные) выпрямители, имеющие большую индуктивность со стороны выпрямленного напряжения.

Схемы многофазных выпрямителей строятся на основе последовательного или параллельного соединения трехфазных мостовых схем. На стороне переменного напряжения такой выпрямитель ведет себя как источник гармоник тока. Преимущества многофазных схем – повышенный коэффициент мощности и относительно малый уровень низкочастотных гармоник токов на стороне переменного напряжения [3, 4]. В идеальных условиях такие выпрямители являются источниками гармоник с порядковыми номерами

$$n = kp \pm 1,$$

где p – пульсность выпрямителя; $k = 1, 2, 3, \ldots$.

Гармоники с порядковыми номерами, определяемыми выражением (1), называют характеристическими [5-7] или каноническими [1]. В реальных условиях спектры входных токов многогофазных выпрямителей содержат и нехарактеристические (неканонические) гармоники, порядковые номера которых не соответствуют формуле (1), а также интергармоники с частотами, некратными основной частоте. Нехарактеристические гармоники могут возникать вследствие разброса параметров отдельных выпрямителей, составляющих многопульсную схему, или несимметрии напряжений сети [1,5-7].

Распространенным средством компенсации реактивной мощности в сетях промышленных потребителей являются конденсаторные установки (КУ). Однако включение батарей конденсаторов приводит к образованию параллельных резонансных контуров с сетью, сопротивление которой имеет индуктивный характер. Поэтому использование КУ для повышения коэффициента мощности в системах электроснабжения с нелинейными нагрузками может привести к резонансному усилению отдельных гармоник. Искажение формы напряжений и токов отрицательно влияет на работоспособность КУ. Потери энергии в конденсаторах пропорциональны частоте. Поэтому высокочастотные гармоники в сетевом напряжении вызывают перегрузку и повреждение конденсаторов.

Значительное искажение напряжений в сетях электроснабжения промышленных потребителей отмечают многие авторы [1,2,5,6-9]. Анализ качества электроэнергии в системе электроснабжения алюминиевого завода, проведенный в статье [6], показал, что суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения значительно превышает пределы, установленные стандартами МЭК 61000-2-4 и МЭК 61000-3-6. Аналогичная ситуация характерна и для систем электроснабжения отечественных предприятий цветной металлургии. Результаты исследований качества электроэнергии, приведённые в [2], показали, что в электрических сетях 10–500 кВ показатели КЭ, характеризующие искажения напряжения, не соответствуют нормам, определяемым ГОСТ 32144-2013.

Искажения синусоидальной формы токов и напряжений уменьшают коэффициент мощности сети. При несинусоидальных режимах современные стандарты рекомендуют определять коэффициент мощности по формуле

$$\lambda = \cos\phi_1 \frac{1}{\sqrt{1 + k_I^2}}.$$

где ϕ_1 – угол сдвига фаз между гармониками напряжения и тока основной частоты; k_I – суммарный коэффициент гармоник тока.

Таким образом, проблемы коррекции коэффициента мощности и компенсации гармонических искажений в системах электроснабжения промышленных предприятий имеют тесную связь. Применение традиционных устройств поперечной емкостной компенсации в сетях с мощными нелинейными потребителями может оказаться неэффективным. В этом случае необходима установка специальных фильтрокомпенсирующих устройств (ФКУ), обеспечивающих не только компенсацию реактивной мощности на частоте основной гармоники, но и подавление высших гармоник, а также коррекцию частотных характеристик сети для демпфирования резонансных режимов.

Как правило, в качестве пассивных ФКУ используют узкополосные фильтры в форме последовательных резонансных контуров, настроенных на частоты наиболее мощных канонических гармоник. Высокодобротные узкополосные фильтры образуют параллельные резонансные контуры с индуктивностью сети. Это может вызвать усиление неканонических или интергармоник, если их частоты близки или совпадают с частотами параллельных резонансов. Поэтому для систем электроснабжения с многофазными нелинейными нагрузками необходимы ФКУ, обеспечивающие коррекцию частотных характеристик СЭС в диапазоне, включающем частоты как характеристических, так и нехарактеристических гармоник.

Компенсирующие устройства на основе широкополосных фильтров (ШПФ), обеспечивающие ослабление отдельных гармоник, а также коррекцию частотных характеристик системы электроснабжения, рассмотрены в работах [6-14]. Примеры расчета, приведенные в [6,9,10,14], показывают эффективность применения широкополосных

пассивных фильтров для коррекции коэффициента мощности и ослабления уровня гармоник напряжений и токов в сетях с многофазными преобразователями. Недостатком простейших пассивных ШПФ второго-третьего порядков, рассмотренных в [6, 14], является невысокая селективность, а также значительные потери мощности.

Процедура синтеза широкополосных демпфирующих фильтров произвольного порядка предложена в [15,16]. С ее помощью определены параметры ФКУ для компенсации реактивной мощности и ослабления искажений напряжения в системах электроснабжения, основной нагрузкой которых являются трехфазные преобразователи. Примеры, приведенные в [15,16], показывают, что синтезированные широкополосные ФКУ могут быть использованы и для коррекции коэффициента мощности в сетях с многопульсными нелинейными нагрузками. Однако для этого необходимо рассмотреть вопросы, связанные с выбором конфигураций и мощности отдельных звеньев.

В настоящей статье рассмотрены устройства параллельной емкостной компенсации для систем электроснабжения с нелинейными многофазными нагрузками в форме параллельного соединения широкополосных звеньев 3-5 порядка. Такие устройства обеспечивают коррекцию коэффициента мощности, ослабление искажений токов и напряжений, коррекцию частотных характеристик системы «пассивный фильтр – внешняя сеть». Предложена простая процедура расчета широкополосных фильтров, основанная на денормировании фильтра-прототипа по частоте и реактивной мощности. В процессе расчета мощность компенсирующего устройства распределяется между звеньями таким образом, чтобы минимизировать уровень характеристических и нехарактеристических гармоник, передаваемых во внешнюю сеть. Проведен сравнительный анализ различных устройств поперечной емкостной компенсации на основе пассивных широкополосных фильтров.

Рассмотрим основные конфигурации широкополосных фильтров, используемых для коррекции коэффициента мощности в системах с многофазными нагрузками.

Простейший широкополосный фильтр второго порядка показан на рис. 1. Компенсирующие устройства, образованные параллельным соединением широкополосных звеньев второго порядка, использованы в [6, 14] для коррекции коэффициента мощности в системах электроснабжения металлургических предприятий и мощных приводов с регулируемой скоростью вращения.

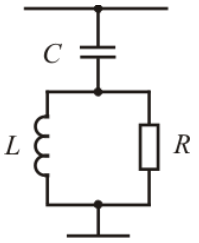

Рис. 1. Широкополосный фильтр второго порядка

Реактивная мощность фильтра второго порядка:

$$Q = 2\pi f_1 C U^2 \tag{1}$$

Частоту настройки принимают равной:

$$f_n = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}. \tag{2}$$

Добротность фильтра:

$$Q_f = \frac{R}{\sqrt{L/C}}. \tag{3}$$

В последних выражениях f_1 – частота основной гармоники, f_n – частота гармоники, на которую настроен фильтр. Формулы (1-3) могут быть использованы для расчета ШПФ на рис. 1.

Для широкополосных фильтров второго порядка характерны большие потери мощности в демпфирующем резисторе. Для снижения потерь на частоте основной гармоники в фильтре С-типа (рис. 2) параллельно демпфирующему резистору включен резонансный контур LC_2, настроенный на частоту основной гармоники. Теоретически такой фильтр имеет нулевые потери в демпфирующем резисторе на частоте основной гармоники, если контур LC_2 настроен в резонанс на эту частоту. Однако при этом емкость конденсатора C_2 должна значительно превышать емкость конденсатора C_1, определяющего реактивную мощность фильтра. Поэтому суммарная емкость фильтра С-типа равна n^2C_1, где n – порядковый номер гармоники, на которую настроен фильтр.

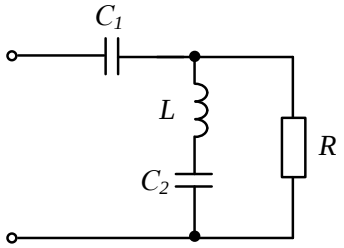

Рис. 2. Фильтр *С*-типа

Другой механизм уменьшения потерь на частоте основной гармоники использован в широкополосном фильтре третьего порядка (рис. 3). В этой схеме конденсатор C_2 включен последовательно с демпфирующим резистором *R*. Анализ, проведенный в [10], показал, что компенсационные характеристики фильтра С-типа и ШПФ третьего порядка примерно одинаковы. Однако аналитические методы расчета фильтров третьего порядка, рассмотренные в [6,10,12,14], очень громоздки и позволяют проектировать лишь частные случаи ШПФ.

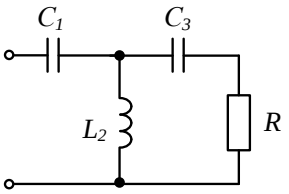

Рис. 3. Широкополосный фильтр третьего порядка

Методы расчета широкополосных демпфирующих фильтров произвольного порядка, основанные на использовании теории синтеза пассивных цепей, рассмотрены в [13, 15, 16]. В качестве базовой структуры предложено использовать односторонне нагруженный лестничный *LC*- четырехполюсник (рис. 4). В статье [13] предложен метод расчета ШПФ произвольного порядка, основанный на денормировании характеристик пассивных фильтров, реализующих типовую передаточную функцию Баттерворта. Такой метод расчета позволяет получить ФКУ, имеющие монотонную частотную характеристику в полосе ослабления. Однако для получения эффективного решения необходимо учитывать относительный уровень гармоник тока нелинейной нагрузки, а также частотные характеристики сети. Процедура синтеза широкополосных демпфирующих фильтров, обеспечивающих минимальное действующее значение высших гармоник, передаваемых многофазным преобразователем во внешнюю сеть, рассмотрена в [16]. Она основана на оптимизации частотных характеристик фильтра в пространстве параметров реактивных элементов.

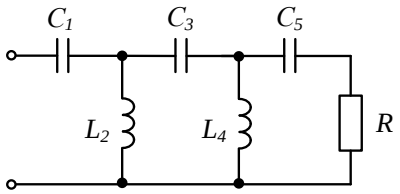

Рис. 4. Односторонне нагруженный *LC*-четырехполюсник

Параметры фильтра определяются в процессе минимизации целевой функции, определяемой выражением

$$\Phi(\bar{x}) = \sum_{(k)} \frac{\left|Z_{\text{ф}}\left(j\omega_k, \bar{x}\right)\right|^2}{\left|Z_{\text{ф}}\left(j\omega_k, \bar{x}\right) + Z_{\text{с}}\left(j\omega_k\right)\right|^2} J_k^2,\ k = 5, 7, \ldots,\ \bar{x} \in \left\{L_i, C_i\right\} \tag{4}$$

В формуле (4) использованы следующие обозначения: $Z_{\text{ф}}(j\omega_k, \bar{x})$ – входное сопротивление фильтра на частоте ω_k; $Z_c(\omega_k)$ – сопротивление сети на частоте ω_k; J_k – действующее значение *k*-й гармоники тока. Подробно процедура оптимизации характеристик фильтра описана в [16].

Нормированные значения элементов фильтров 3–5 порядка, рассчитанных с помощью процедуры оптимизации, рассмотренной в [16], приведены в табл. 1. Фильтры настроены на подавление гармоники с частотой 1 рад/с. Емкость конденсатора C_1, определяющего реактивную мощность фильтра, принята равной 1 Ф.

Таблица 1

Значения элементов нормированных широкополосных фильтров 3-5 порядка

Порядок фильтра	C_1, Ф	L_2, Гн	C_3, Ф	L_4, Гн	C_5, Ф	R, Ом
3	1	0,814	0,259	-	-	1,85
4	1	0,777	0,243	2,127	-	1,85
5	1	0,76	0,216	1,22	0,47	1,85

Рассмотренные широкополосные фильтры предназначены для коррекции коэффициента мощности в системах электроснабжения с трехфазными преобразователями. В случае многофазных нагрузок целесообразно использовать более сложные конфигурации ФКУ, образованные параллельным соединением нескольких широкополосных звеньев.

Аналитический метод расчета широкополосных фильтрокомпенсирующих устройств

Используем нормированные значения элементов фильтров-прототипов для расчета широкополосных фильтров, обладающих требуемыми компенсационными характеристиками. ФКУ образовано параллельным соединением звеньев 3–5 порядка. Отдельные звенья осуществляют ослабление группы соседних гармоник. Исходными данными для расчета являются число звеньев ФКУ, его реактивная мощность *Q*, значения элементов прототипа, порядковый номер n_i наиболее мощной гармоники в полосе ослабления *i*-го звена.

Расчет звеньев фильтра проводится в следующей последовательности. Вначале определяется емкость конденсатора C_{i1}, обеспечивающего требуемую величину реактивной мощности ФКУ на частоте основной гармоники f_1:

$$C_{i1} = \frac{\alpha_1 Q}{2\pi f_1 U^2}. \tag{5}$$

Здесь α_i – множитель, определяющий реактивную мощность *i*-го звена.

На втором шаге осуществляется денормирование реактивных элементов фильтра по частоте:

$$L_{ij}^{(1)} = L_j^{(0)} \big/ 2\pi n_i f_1 \; ; \; C_j^{(1)} = C_j^{(0)} \big/ 2\pi n_i f_1 \quad . \tag{6}$$

В последних выражениях $L_j^{(0)}$, $C_j^{(0)}$ - значения элементов нормированного фильтра.

Затем проводится денормирование элементов по мощности на частоте основной гармоники:

$$L_{ij} = k_i L_{ij}^{(1)} ; \; C_{ij} = C_{ij}^{(1)} / k_i ; \; R_i = k_i R^{(0)} \quad . \tag{7}$$

где $k = C_{i1}^{(1)} \big/ C_{i1}$ – коэффициент нормирования звена фильтра по уровню реактивной мощности.

На основе формул (5-7) получим окончательные выражения для расчета элементов звеньев ФКУ:

$$C_{ij} = \frac{\alpha_i C_j^{(0)} Q}{2\pi f_1 C_1^{(0)} U^2} ; \tag{8}$$

$$L_{ij} = \frac{L_j^{(0)} C_1^{(0)} U^2}{2\pi f_1 \alpha_i n_i^2 Q} ; \tag{9}$$

$$R_i = \frac{R_j^{(0)} C_1^{(0)} U^2}{\alpha_i n_i Q} \quad . \tag{10}$$

Сопротивление демпфирующего резистора определяет сопротивление *i*-го звена в полосе ослабления и, соответственно, уровень подавления характеристических и нехарактеристических гармоник в спектре тока. Поэтому можно регулировать компенсационные характеристики ФКУ за счет распределения мощности между звеньями, изменяя коэффициент α_i. Согласно формуле (10) для ослабления наиболее мощных характеристических гармоник целесообразно увеличить мощность соответствующего звена ФКУ.

Результаты и обсуждение

Рассмотрим применение предлагаемых компенсирующих устройств для коррекции коэффициента мощности в системе электроснабжения алюминиевого завода. Основной нелинейной нагрузкой СЭС являются электролизные установки. Питание установок осуществляется от 12-пульсных выпрямительных агрегатов (ВА), преобразующих переменный ток промышленной частоты в постоянный (рис. 5). Каждый ВА содержит регулировочный трансформатор T_1, выпрямительные трансформаторы T_2, T_3, дроссели насыщения, блок полупроводниковых преобразователей.

Спектр входного тока выпрямительного агрегата представлен в табл. 2. Питание подстанции осуществляется по ЛЭП напряжением 220 кВ длиной 40 км. Мощность одной фазы ФКУ составляет 30 Мвар.

Таблица 2

Спектр тока 12-пульсного выпрямительного агрегата (в процентах от основной гармоники).

№ гармоники	5	7	11	13	17	19	23	25
Действ. значение	2,6	1,6	4,5	2,9	0,2	0,1	0,9	0,8

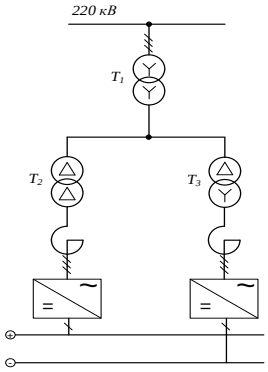

Рис. 5. Схема выпрямительного агрегата

Рассмотрим следующие варианты фильтрокомпенсирующих устройств.

– Компенсирующие устройства отсутствуют.

– На подстанции установлена конденсаторная установка.

– Фильтр С-типа, настроенный на частоту 5-й гармоники.

– Широкополосный фильтр третьего порядка, настроенный на частоту 5-й гармоники.

– ФКУ на основе широкополосных фильтров второго порядка, настроенных на частоты 5, 7 и 11-й гармоник. Для расчета фильтров использована методика, рассмотренная в [6].

– ФКУ на основе широкополосных фильтров третьего порядка, настроенных на частоты 5, 7 и 11-й гармоник. Параметры звеньев фильтров определены с помощью процедуры расчета, рассмотренной в предыдущем разделе. Мощности звеньев одинаковы.

– Широкополосные фильтры третьего порядка, настроенные на частоты 5, 7 и 11-й гармоник. Отношение мощностей звеньев: 0,25; 0,25; 0,5.

Все варианты ФКУ имеют одинаковую реактивную мощность на частоте основной гармоники.

На рис. 6, 7 показаны частотные характеристики сопротивления сети в точке общего присоединения ВА и однозвенных компенсирующих устройств (варианты 1 - 4). На рис. 8 показаны спектры напряжений на шинах подстанции.

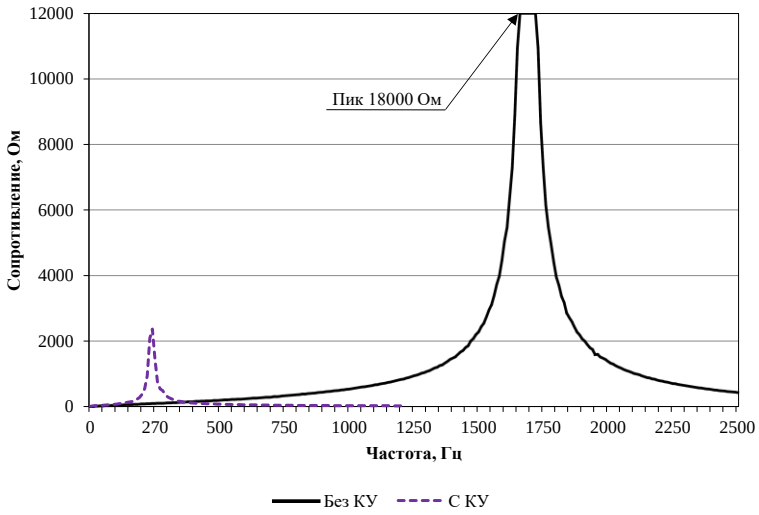

Рис. 6. Частотные характеристики сети (варианты 1, 2)

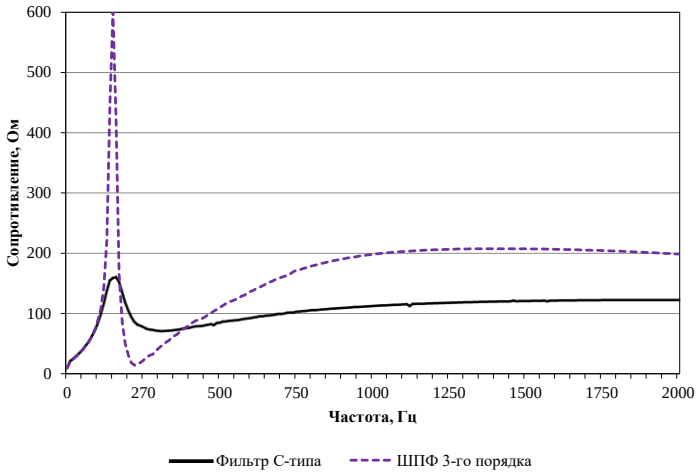

Рис. 7. Частотные характеристики сети при установке однозвенных ФКУ (варианты 3, 4)

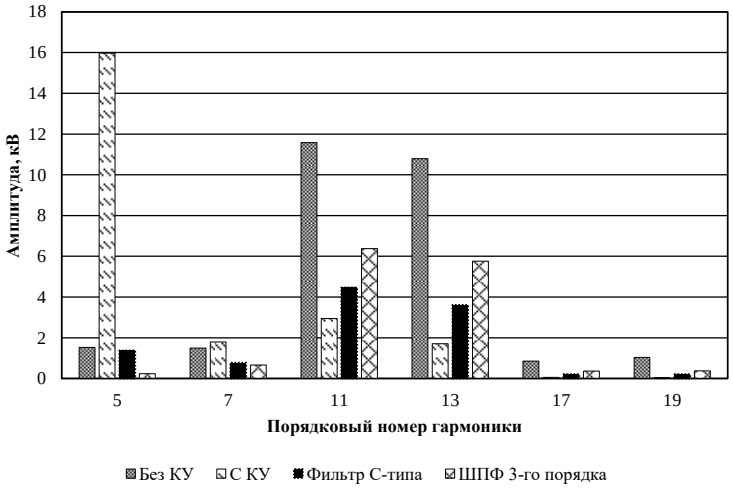

Рис. 8. Спектры напряжения на шинах подстанции (варианты компенсирующих устройств 1-4)

В табл. 3 представлены коэффициенты гармонических составляющих напряжения (в процентах по отношению к основной гармонике) для рассмотренных вариантов КУ.

Таблица 3

Коэффициенты гармонических составляющих напряжения при установке рассмотренных вариантов компенсирующих устройств (в процентах от основной гармоники)

Вар.	$K_{U(5)}$	$K_{U(7)}$	$K_{U(11)}$	$K_{U(13)}$	$K_{U(17)}$	$K_{U(19)}$	K_U
1	1,2	1,2	9,28	8,64	0,7	0,8	12,4
2	12,4	1,4	2,9	1,3	0	0	12,75
3	1,06	0,6	3,46	2,8	0,17	0,17	4,6
4	0,11	0,5	4,34	4,0	0,3	0,28	6,7
5	0,4	0,23	0,67	1,3	0,13	0,16	1,55
6	0,53	0,2	0,6	1,44	0,16	0,18	1,59
7	0,69	0,25	0,4	1,08	0,125	0,155	1,38
ГОСТ 32144-2013	1,5	1	1	0,7	0,5	0,4	2,0

Результаты моделирования показывают, что искажения напряжения вызваны резонансом в параллельных колебательных контурах, образованных распределенными индуктивностями и емкостями сети, и значительно превышают допустимые значения, определяемые ГОСТ 32144-2013. Частота резонансного максимума зависит от длины ЛЭП. Включение батареи конденсаторов смещает резонансный максимум в область низкочастотных нехарактеристических гармоник, но результирующие искажения напряжения при этом не уменьшаются.

Однозвенные компенсирующие устройства (варианты 3 и 4) осуществляют ослабление нехарактеристических 5 и 7-й гармоник. Однако они не обладают достаточной избирательностью для одновременного подавления характеристических гармоник. В результате суммарный коэффициент гармоник напряжения превышает значения, определяемые ГОСТ. Можно настроить однозвенные ФКУ на частоты характеристических гармоник (11 и 13-й). Однако анализ показывает, что в этом случае наблюдается резонансное усиление нехарактеристических гармоник (5 и 7-й). Таким образом, для одновременного ослабления характеристических и нехарактеристических гармоник необходимо использовать ФКУ, включающие несколько широкополосных звеньев. В этом случае каждое звено ослабляет группу соседних гармоник и одновременно демпфирует резонансные максимумы частотной характеристики сети.

Частотные характеристики входного сопротивления сети при установке многозвенных компенсирующих устройств (варианты 5-7) показаны на рис. 9. На рис. 10 показаны спектры напряжения на шинах подстанции.

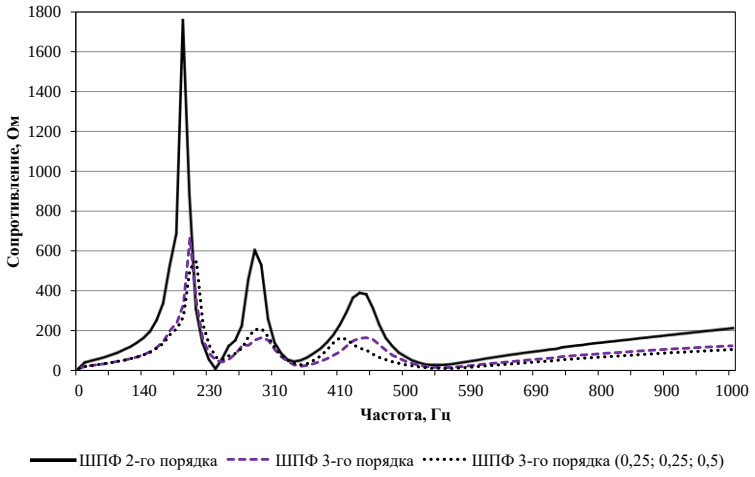

Рис. 9. Частотные характеристики сопротивления сети при установке многозвенных КУ (варианты 5 - 7)

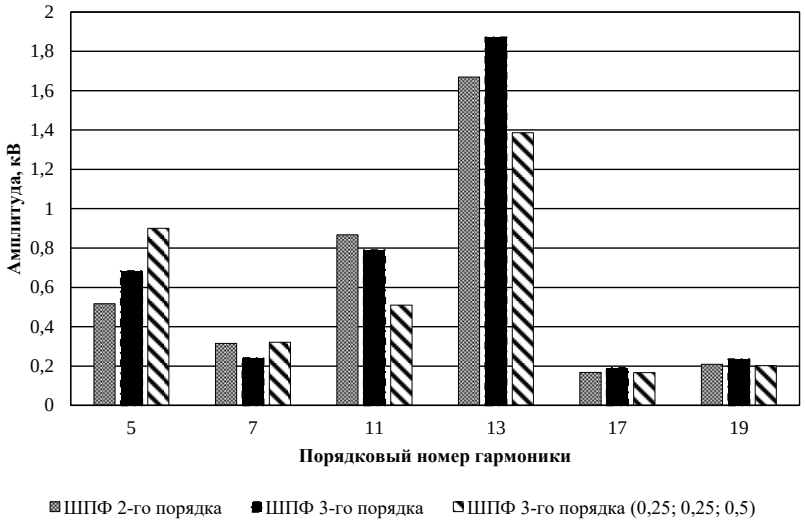

Рис. 10. Спектры напряжения при установке многозвенных ФКУ (варианты 5-7)

Коэффициенты гармонических составляющих напряжения при установке многозвенных ФКУ представлены в табл. 2. Сравнение результатов показывает, что наибольший эффект дает установка ФКУ на основе широкополосных фильтров третьего порядка (варианты 6, 7). Увеличение мощности звена, предназначенного для ослабления характеристических 11 и 13-й гармоник (вариант 7), позволило значительно улучшить компенсационные характеристики устройства.

Одним из важных критериев, определяющих эффективность ФКУ, является активная мощность, потребляемая устройством на частоте основной гармоники. В табл. 4 представлены значения активной мощности, потребляемой рассмотренными многозвенными ФКУ.

Таблица 4

Мощность ФКУ на частоте основной гармоники, кВт

Вариант	Потери в реакторах	Потери в демпфирующих резисторах	Общие потери
5	17,6	7,0	24,6
6	16,0	0,6	16,6
7	11,6	0,5	12,1

Данные, приведенные в табл. 3, показывают, что уменьшение активной мощности, потребляемой ФКУ на частоте основной гармоники, достигается в первую очередь за счет снижения потерь в демпфирующих резисторах ШПФ.

Таким образом, проведенный анализ позволяет сделать вывод, что для коррекции коэффициента мощности и снижения уровня гармоник в системах электроснабжения с многофазными нагрузками целесообразно использовать ФКУ на основе параллельного соединения широкополосных демпфирующих звеньев 3–5 порядка. Такие ФКУ обеспечивают эффективное подавление как характеристических, так и нехарактеристических гармонических составляющих.

Заключение

Анализ, проведенный в статье, показал, что установка конденсаторных батарей для компенсации реактивной мощности в системах электроснабжения с многофазными нелинейными нагрузками вызывает значительные искажения напряжения, обусловленные резонансным усилением отдельных гармоник. В качестве устройств поперечной емкостной компенсации в таких сетях целесообразно использовать широкополосные силовые фильтры, позволяющие ослабить резонансное усиление гармоник за счет демпфирования частотных характеристик системы электроснабжения.

В статье рассмотрены ФКУ в форме параллельного соединения широкополосных фильтров 3–5 порядка, осуществляющие ослабление характеристических и нехарактеристических гармоник, создаваемых многофазными нелинейными нагрузками. Предложен аналитический метод расчета звеньев ФКУ, основанный на денормировании параметров фильтра-прототипа по частоте и реактивной мощности. Метод позволяет варьировать уровень ослабления отдельных гармоник, передаваемых во внешнюю сеть, за счет распределения мощности компенсирующего устройства между звеньями.

Моделирование показало, что ФКУ на основе широкополосных звеньев третьего порядка позволяют компенсировать реактивную мощность, а также снизить уровень гармоник, создаваемых многофазными нелинейными нагрузками, до значений, определяемых ГОСТ 32144-2013. Предлагаемые ФКУ имеют меньшие потери мощности на частоте основной гармоники по сравнению с известными решениями.

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. Rodríguez J., Pontt J., Silva C., et al. Large Current Rectifiers: State of the Art and Future Trends. – IEEE trans. on Industrial Electronics. 2005. V. 52. No 3. pp. 738-745.

4. Singh B., Gairola S., Singh B. N., et al. Multipulse AC–DC Converters for Improving Power Quality: A Review – IEEE trans. on Power Electronics. 2008, V. 23. No. 1. pp. 260-281.

5. Zhiheng M., Zheng X., Yujun L. Harmonic Analysis and Simulation of Multi-pulse Rectifiers Applied in Electrolysis Industry. 2014 IEEE Industry application society annual meeting, 2014, pp. 1-5, doi: 10.1109/IAS.2014.6978498.

6. Badrzadeh D., Smith K., Wilson R. Designing passive harmonic filters for an aluminum smelting plant. – IEEE trans. on Industry Applications. 2011. V. 47. No 2. pp. 973-983.

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. Wang Y., Xu W. A Shared Resonance Damping Scheme for Multiple Switchable Capacitors. IEEE trans. on Power Delivery. 2018. V. 33. No.42. pp. 1973-1980.

9. Wang Y., Xu S., Xu W., Wu J., Xiao X. Comparative Studies on Design Methods for Detuned C-Type Filter. IEEE trans. on Power Delivery. 2020. V. 35. No. 4. pp. 1725-1734.

10. 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. No. 5. pp. 2287-2295.

11. Li X., Wang Y., Xu W. A new filtering scheme for HVDC terminals based on damped high-pass filter. – IEEE trans. on Power Delivery. 2019. V. 34. No 5. pp. 2050-2057.

12. Ding T., Xu W., Liang H. Design method for third-order High-pass filter. IEEE trans. on Power Delivery. 2016. V. 31.No 1. pp. 402-403.

13. Довгун В.П., Боярская Н.П., Егоров Д.Э., Синяговский А.Ф. Синтез широкополосных фильтров гармоник // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2014. № 5-6. С. 85-91.

14. 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.

15. Довгун В.П., Егоров Д.Э., Новиков В.В., Звягинцев Е.С. Параметрический синтез широкополосных силовых фильтров. Электричество. 2018. № 12. С. 14-21.

16. Dovgun V.P., Egorov D.E., Prozorov N. R., Novikov V.V. Broadband Power Filters for Power Supply Systems with Multiphase Converters. Russian Electrical Engineering. 2020. V. 91. No. 5. pp. 330-334.

Авторы публикации

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

Довгун Валерий Петрович – д-р техн. наук, профессор кафедры Систем автоматики, автоматизированного управления и проектирования, Сибирский федеральный университет. E-mail: vdovgun55@mail.ru.

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

Ян Анастасия Владимировна – магистрант, Сибирский федеральный университет. E-mail: anastasiya2591@bk.ru.

Слюсарев Александр Сергеевич – магистрант, Сибирский федеральный университет. E-mail: al_sl@list.ru.

References

1. Zhezhelenko IV. *Vysshie garmoniki v sistemakh promyshlennogo elektrosnabzheniya prompredpriyatii*. Moscow: Energoatomizdat Publ., 2000, 331 p.

2. Kovernikova LI, Tulckiy VN, Shamonov RG. Katchestvo elektreoenergii v EES Rosii, tekustchie problem I neobkhodimye resheniya. *Elektroenergiya. Peredatcha I raspredelenie*. 2016;2 (35):28-38.

3. Rodríguez J, Pontt J, Silva C, et al. *Large Current Rectifiers: State of the Art and Future Trends*. – IEEE trans. on Industrial Electronics. 2005;52(3):738-745.

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. Zhiheng M., Zheng X., Yujun L. *Harmonic Analysis and Simulation of Multi-pulse Rectifiers Applied in Electrolysis Industry*. 2014 IEEE Industry application society annual meeting, 2014, pp. 1-5, doi: 10.1109/IAS.2014.6978498.

6. Badrzadeh D., Smith K., Wilson R. *Designing passive harmonic filters for an aluminum smelting plant*. IEEE trans. on Industry Applications. 2011;47(2):973-983.

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. Wang Y, Xu W. *A Shared Resonance Damping Scheme for Multiple Switchable Capacitors*. IEEE trans. on Power Delivery. 2018;33(4):1973-1980.

9. Wang Y, Xu S, Xu W, Wu J., Xiao X. Compar*ative Studies on Design Methods for Detuned C-Type Filter*. IEEE trans. on Power Delivery. 2020;35(4):1725-1734.

10. Xu W, Ding T, Li X, Liang H. *Resonance-Free Shunt Capacitors – Configurations, Design Methods and Comparative Analysis.* IEEE trans. on Power Delivery. 2016;31(5):2287-2295.

11. Li X, Wang Y, Xu W. *A new filtering scheme for HVDC terminals based on damped high-pass filter*. IEEE trans. on Power Delivery. 2019;34(5):2050-2057.

12. Ding T, Xu W, Liang H. *Design method for third-order High-pass filter*. IEEE trans. on Power Delivery. 2016;31(1):402-403.

13. Dovgun VP, Boyarskaya NP, Egorov D.E., et al. Sintez shirokopolosnykh filtrov garmonik. *Izvestiya vuzov. Problemy energetiki*. 2014;5-6:85-91.

14. 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.

15. Dovgun VP, Egorov DE, Novikov VV, et al. Parametritcheskii sintez shirokopklosnyh filtrov - Elektritchestvo. 2018;12:14-21.

16. Dovgun VP, Egorov DE, Prozorov NR, et al. Broadband Power Filters for Power Supply Systems with Multiphase Converters. *Russian Electrical Engineering*. 2020;91(5):330-334.

Authors of the publication

Denis E. Egorov – Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia. E-mail: denis.egorov.90@br.ru.

Valery P. Dovgun – Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia. E-mail: vdovgun55@mail.ru.

Nataliya P. Boyarskaya – Krasnoyarsk State Agricultural University, Krasnoyarsk, Russia. E-mail: bnp2006dvg@mail.ru.

Anastasiya V. Yan – Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia. E-mail: anastasiya2591@bk.ru.

Aleksandr S. Slusarev – Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia. E-mail: al_sl@list.ru.

Получено ***06 ноября 2020 г.***

Отредактировано ***09 ноября 2020 г.***

Принято ***09 ноября 2020 г.***