

УДК 621.331

Фильтрокомпенсирующие установки в тяговых сетях переменного тока

Л. А. ГЕРМАН¹, А. С. СЕРЕБРЯКОВ¹, А. А. МАКСИМОВА²¹Московский государственный университет путей сообщения (МИИТ), Нижегородский филиал, Нижний Новгород, 603011, Россия²Петербургский государственный университет путей сообщения (ПГУПС), Санкт-Петербург, 190031, Россия

Аннотация. Рассматриваются схемотехнические решения для фильтрокомпенсирующих установок (ФКУ) в тяговых сетях переменного тока. Представлены обобщающие расчеты по новым схемам ФКУ для системы тягового электроснабжения (СТЭ) переменного тока, при этом определено схемотехническое решение модульной ФКУ в общем случае с резонансными и широкополосными фильтрами. Произведена оценка области применения схем ФКУ для фильтрации гармоник и показана эффективность фильтрации гармонических составляющих при применении новых схем ФКУ. Определен порядок расчета параметров ФКУ с учетом кривой тягового тока.

Ключевые слова: компенсация реактивной мощности; фильтрокомпенсирующая установка; комплектно-блочное построение устройств компенсации; гармонический состав тока тяговой нагрузки; несинусоидальность напряжения

Введение. Для тяговых сетей переменного тока электрических железных дорог характерно сверхнормативное потребление реактивной мощности и повышенное содержание гармонических составляющих высокого порядка (гармоники с частотой выше основной частоты тока и напряжения) в кривых тока и напряжения [1, 2].

Для повышения качества электроэнергии в системах тягового электроснабжения (СТЭ) применяют фильтрокомпенсирующие установки (ФКУ) [1, 2, 3, 4]. Как показано в работах [5, 6], эффективность снижения гармоник напряжения и компенсации реактивной мощности при применении существующих двухрезонансных ФКУ недостаточна. Поэтому на протяжении многих лет силами ученых и специалистов ВНИИЖТа, МИИТа (Нижегородский филиал), ОмГУПС, НИИЭФА-ЭНЕРГО и Западно-Сибирской железной дороги рассматривались варианты новых ФКУ.

Особенность тяговой сети переменного тока — возможность возникновения резонансных явлений между индуктивностью контактной сети и емкостной проводимостью. Поэтому современные ФКУ оснащаются широкополосным фильтром, демпфирующим волновые процессы в тяговой сети [7, 8].

Терминология. Прежде всего остановимся на терминологии. Формулировка «фильтрокомпенсирующие установки» принята в правилах [4] и многие

десятилетия использовалась в технической и нормативной документации, например в [2, 3, 5]. В Правилах устройства электроустановок (ПУЭ, [9]), глава 5.6, применен термин «конденсаторные установки», в частности: «...Настоящая глава Правил распространяется на **конденсаторные установки** до 500 кВ (вне зависимости от их исполнения), присоединяемые параллельно индуктивным элементам электрических систем переменного тока частотой 50 Гц и предназначенные для **компенсации реактивной мощности** электроустановок и регулирования напряжения. Глава не распространяется на конденсаторные установки для продольной компенсации, **фильтровые** и специальные....» (выделено жирным шрифтом авторами). Таким образом, здесь указаны:

1) конденсаторные установки (а не устройства), предназначенные для компенсации реактивной мощности;

2) конденсаторные установки фильтровые, т. е. фильтрокомпенсирующие установки.

В ГОСТ 32895 – 2014 «Электрификация и электроснабжение железных дорог. Термины и определения» (введен в действие 01.01.2015 г.) дано определение: «...Фильтрокомпенсирующее устройство: Устройство компенсации реактивной мощности, обладающее дополнительной функцией фильтрации высших гармонических составляющих тока ЭПС....».

На наш взгляд, термин «устройство» в ФКУ в ГОСТ 32895 – 2014 противоречит терминологии в ПУЭ, и поэтому в статье далее принят термин «установка». Предполагаем, что при корректировке ГОСТ нами будет внесено предложение по изменению терминологии.

Так как для систем тягового электроснабжения в установке поперечной емкостной компенсации совмещены функции компенсации реактивной мощности и фильтрации гармонических составляющих, применение формулировки «установка» справедливо и для конденсаторной батареи, и для поперечной емкостной компенсации, и для фильтрокомпенсирующей установки.

Порядок определения параметров ФКУ. В настоящее время для определения параметров и мощности

■ E-mail: lagerman@mail.ru (Л. А. Герман)
maximova.aa1987@ya.ru (А. А. Максимова)

ФКУ выполняют измерения значений гармоник напряжения в точке подключения ФКУ. Однако в связи со сложностью электромагнитных процессов в тяговых сетях необходимо изменение порядка определения параметров ФКУ, которое предлагается производить в следующей последовательности:

- 1) предварительно рассчитать параметры ФКУ по замерам гармонических составляющих напряжения;
- 2) выполнить измерения гармонических составляющих тока и напряжения в узле подключения ФКУ [10];
- 3) построить модели тяговой нагрузки по измерениям гармонических составляющих;
- 4) сформировать цифровую модель системы тягового электроснабжения с ФКУ и с учетом тяговой нагрузки;
- 5) смоделировать переходные и установившиеся процессы при подключении и отключении ФКУ;
- 6) рассчитать показатели качества электроэнергии по результатам моделирования, т. е. определить значения коэффициентов гармонических составляющих n -го порядка и суммарного;
- 7) проверить выполнение требований [10] и при необходимости откорректировать параметры ФКУ.

Перспективным является применение вышеуказанного порядка в расчетах и при проектировании ФКУ. В этом случае используют модель тяговой нагрузки, подобную применяемой в действующей схеме электроснабжения. Использование цифровой модели системы тягового электроснабжения с учетом тяговой нагрузки позволяет:

- 1) комплексно рассмотреть электромагнитные процессы в СТЭ с системой внешнего электроснабжения (СВЭ) и тяговой нагрузкой;
- 2) оценить взаимное влияние элементов указанных систем;
- 3) уточнить выбор оптимальных параметров ФКУ.

Расчетный состав гармонических составляющих в системе тягового электроснабжения. Гармонический состав тока и напряжения на тяговых подстанциях и в тяговой сети зависит от следующих факторов [2]:

- типа ЭПС и режима его работы. Более 90% ЭПС (например, ВЛ80°), эксплуатируемого на отечественных железных дорогах, оснащены коллекторными двигателями и двухполупериодными выпрямителями. На электровозах с рекуперацией (например, ВЛ80°) применяют тиристорное управление. На новых ЭПС (ЭП20, ЭВС2 «Сапсан», ЭС1 «Ласточка» и др.) используются асинхронные двигатели. Несмотря на постепенное увеличение в эксплуатации ЭПС с асинхронными двигателями, объем их внедрения остается малым, поэтому в ближайшее время на железных дорогах будет преобладать электроподвижной состав с выпрямительными установками и коллекторными двигателями;

- наличия подключенных к тяговой подстанции участков тяговой сети магистральной железной дороги, а также крупных железнодорожных станций, режим работы ЭПС на которых различается;
- резонансных явлений в СВЭ (в основном из-за резонанса на 5-й, а также на 7-й и 11-й гармониках [11]);
- состава гармонических составляющих уравнивающего тока.

Многочисленные измерения гармоник тока и напряжения в сетях тягового электроснабжения дают возможность оценить необходимые мощности ФКУ. В Правилах [12] представлены расчетные значения гармонических составляющих тягового тока ЭПС, составляющие 17...24% для 3-й гармоники, 7,2...8,9% — для 5-й и 3,3...8,2% — для 7-й. Принимая во внимание указанные значения и предполагая применение наиболее распространенного на отечественных железных дорогах ЭПС с коллекторными тяговыми двигателями, а также с учетом экспериментальных исследований и опыта эксплуатации [2] для дальнейших расчетов, считаем, что на шинах 27,5 кВ процентное соотношение значений гармонических составляющих тока $I_{(n)}$ 3-го, 5-го и 7-го порядка к величине тока основной гармоники $I_{(1)}$ равно: 23%, 11% и 6% соответственно. В статье учитываются гармонические составляющие тока только 3-го, 5-го и 7-го порядка, которые оказывают наибольшее влияние на показатели несинусоидальности напряжения. При необходимости возможно увеличение числа и порядка рассматриваемых гармоник.

Несинусоидальность напряжения оценивается с помощью значений коэффициентов гармонических составляющих напряжения n -го порядка $K_{U(n)}$ и суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения K_U [10]. На шинах 110 (220) кВ (на границе балансовой принадлежности тяговых подстанций) несинусоидальность напряжения определяется в основном несинусоидальностью тягового тока и входным сопротивлением СВЭ. В соответствии с [13] на большинстве тяговых подстанций входное сопротивление составляет от 0,2 до 1,4 Ом и только на отдельных подстанциях увеличивается до 2,0...2,6 Ом (величины индуктивных сопротивлений здесь и далее приведены к напряжению 27,5 кВ). Тогда с учетом вышеуказанных гармоник тока значения коэффициентов гармонических составляющих напряжения на стороне 110 (220) кВ большинства тяговых подстанций в зависимости от входного сопротивления равны: $K_{U(3)} = 0,18...4,12\%$; $K_{U(5)} = 0,18...3,3\%$; $K_{U(7)} = 0,09...2,06\%$, а на шинах 27,5 кВ — $K_{U(3)} = 2...10\%$, $K_{U(5)} = 2...8\%$ и $K_{U(7)} = 1...5\%$. Эти данные относятся к максимальным значениям с вероятностью 95% и используются в статье для сравнения схемных решений ФКУ и оценки степени фильтрации гармоник напряжения.

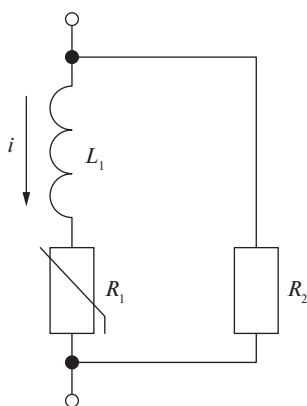


Рис. 1. Схема для формирования цифровой модели ЭПС
Fig. 1. Scheme for numerical model of EMU

Далее рассмотрим порядок формирования модели тяговой нагрузки и цифровой модели системы тягового электроснабжения с ФКУ.

Цифровые модели тяговой нагрузки и системы электроснабжения. Для анализа электромагнитных процессов и форм кривых напряжений и токов в элементах СТЭ используем цифровую модель ЭПС [3], показанную на рис. 1. ЭПС в такой модели представляет собой источник тока с характерным для реальной тяговой нагрузки содержанием гармонических составляющих. Электровоз представлен последовательно соединенными реактором L_1 и нелинейным резистором R_1 . В отличие от [3] характеристика падения напряжения на нелинейном резисторе от тока i аппроксимируется степенным полиномом:

$$u(i) = R_1(i)i = \alpha\beta^4(1 + \gamma i^4)i^5, \quad (1)$$

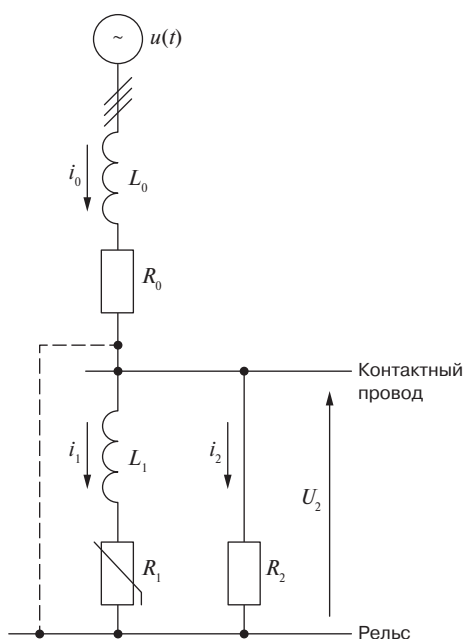


Рис. 2. Схема для формирования цифровой модели СВЭ с ЭПС
Fig. 2. Scheme for numerical model SEPS with EMU

где $\alpha = 12 \cdot 10^{-7}$, $\beta = 12 \cdot 10^{-2}$, $\gamma = 10^{-5}$ — коэффициенты аппроксимации для ЭПС с коллекторными тяговыми двигателями.

Резистор R_2 необходим для упрощения решения дифференциальных уравнений численным методом в системе MathCad. Напряжение на резисторе R_2 имитирует напряжение в контактной сети. С применением в модели характеристики нелинейного резистора $R_1(i)$ в формуле (1) появилась возможность изменения гармонического состава тяговой нагрузки путем коррекции значений коэффициентов α , β и γ . Расчет коэффициентов аппроксимации α , β и γ выполнен для одного модуля электровоза с действующим значением тока 150 А. При увеличении нагрузки в тяговой сети следует увеличить число модулей электровозов, т. е. в модели действующее значение тока увеличивается до значений 300 А, 450 А и т. д.

С применением цифровой модели решаются две задачи: во-первых, воспроизводится в заданном нагрузочном узле исходная кривая напряжения на токоприемнике (в том числе и на шинах тяговой подстанции) и тем самым полностью воспроизводятся характеристики гармонических составляющих. Во-вторых, тяговая нагрузка представляется источником тока, практически не зависящим от напряжения на токоприемнике. Расчеты показывают, что при изменении напряжения в пределах от 24 до 29 кВ ток тяговой нагрузки изменяется не более чем на 5%.

Как указывалось выше, в настоящее время гармонический состав тока в основном определяется применяемым на железных дорогах ЭПС с коллекторными тяговыми двигателями. Однако с вводом новых типов ЭПС, а также для специфических схем электроснабжения (например, когда к тяговой подстанции примыкает крупная железнодорожная станция) следует скорректировать гармонический состав, т. е. выполнить измерения гармонического состава напряжения в месте установки ФКУ и рассчитать по формуле (1) новые коэффициенты α , β , γ .

Для рассмотрения влияния тяговой нагрузки на показатели несинусоидальности напряжения используем цифровую модель трехфазной системы внешнего электроснабжения (СВЭ) [14], которая совместно с трехфазным тяговым трансформатором (мощностью 40 МВ·А) представлена на рис. 2 индуктивностью L_0 и резистором R_0 . Значения активного и индуктивного сопротивлений СВЭ приведены к уровню напряжения 27,5 кВ. Тяговый трансформатор подключается к контактной сети и рельсу (пунктирная линия на рис. 2) двумя фазами. Модель однофазного ЭПС подключена между контактным проводом и рельсом.

В зависимости от поставленной задачи в цифровой модели может включаться сопротивление контактной сети межподстанционной зоны совместно с емкостной проводимостью «контактный провод — рельс».

Схемотехнический состав ФКУ. Оценим параметры ФКУ. При включении ФКУ в тяговую сеть повышение напряжения составит [2]:

$$\Delta U = I_{\text{фку}} X_{\text{вх}}, \quad (2)$$

где $I_{\text{фку}}$ — ток ФКУ; $X_{\text{вх}}$ — суммарное входное сопротивление до точки подключения ФКУ, в общем случае учитывающее сопротивление СВЭ, трансформаторов тяговых подстанций и тяговую сеть.

Принимая для ФКУ поста секционирования при двустороннем питании тяговой сети $X_{\text{вх}} = 6...8$ Ом, получим, что напряжение при отсутствии нагрузки в тяговой сети повышается на 1500 В при токе $I_{\text{фку}} = 150...185$ А. Это означает, что при мощности ФКУ от 4 Мвар (номинальный ток 150 А) до 5 Мвар (номинальный ток 185 А) и при номинальном напряжении на шинах тяговой подстанции 27,5 кВ напряжение в тяговой сети составит предельно допустимое значение — 29 кВ. Таким образом, мощность нерегулируемых ФКУ должна составлять не более 5 Мвар.

При необходимости включать ФКУ большей мощности следует формировать многосекционные ФКУ с возможностью регулирования мощности установки путем подключения (отключения) секций ФКУ. Так как наибольшие значения гармонических составляющих имеют третья и пятая гармоники, то для обеспечения нормативных значений суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения, как правило, достаточна фильтрация 3-й и 5-й гармонических составляющих напряжения. Поэтому предпочтительно применение ФКУ, состоящей из двух секций: при этом секция 1 должна быть выполнена с резонансной настройкой на частоту 3-й гармоники (150 Гц), а секция 2 — на частоту 5-й гармоники (250 Гц) (рис. 3).

Принимаем для расчетов суммарную мощность двухсекционной ФКУ по первой гармонической составляющей — 5 Мвар: мощность секции 1 равна 3 Мвар, а секции 2 — 2 Мвар. Резонансные частоты настройки секций согласно [4] принимаем 142 и 240 Гц. Исходя из заданных параметров ФКУ, рассчитаем величины индуктивности реакторов и емкости конденсаторных батарей (табл. 1). Дополнительно рассчитаны параметры двухсекционной ФКУ мощностью 4 Мвар с настройкой обеих секций на 142 Гц.

Возможность возникновения резонансных явлений между индуктивностью контактной сети и ее емкостной проводимостью, особенно при одностороннем питании тяговой сети и малой мощности короткого замыкания на вводе подстанции (300–500 МВ·А), заставляет применять широкополосные фильтры с демпфирующими цепями (ДЦ) $C_d - R_d$ [7, 8]. ДЦ подключается в точку нулевого потенциала напряжения 50 Гц выбранной секции с целью недопущения протекания тока основной частоты через резистор. В цепь резистора включен конденсатор (как предложено в

Таблица 1

Параметры элементов ФКУ

Table 1

Parameters of FCI elements

Параметр	Значение		
Резонансная частота секции, Гц	142	240	
Мощность компенсации, Мвар	3	2	2
Емкость конденсаторной батареи, мкФ	11,07	7,378	8,057
Индуктивность реактора, мГн	114	170	55

[8]) для снижения активных потерь мощности. По исследованиям ВНИИЖТа, сопротивление R_d должно составлять 80...100 Ом, а ДЦ следует включать в одну секцию.

Рассмотренные схемные варианты, а также перечень задач, решаемых ФКУ, свидетельствуют о необходимости модульного построения ФКУ. В зависимости от конкретных задач для той или иной тяговой подстанции или поста секционирования формируется набор включаемых модулей ФКУ: секции ФКУ (модули 1 и 2), а также демпфирующие цепи (модуль 3).

Новая схема, представленная на рис. 3, неизвестна в отечественной и зарубежной практике электрических железных дорог переменного тока. Отличительные особенности новой схемы ФКУ состоят в следующем:

1. Уточнены значения сопротивлений пусковых резисторов R_3, R_5 . Результаты расчетов (с применением разработанной цифровой модели) переходных процессов при коммутации секций ФКУ показывают, что принимаемое ранее значение сопротивлений пусковых резисторов — 80 Ом должно быть уменьшено до 40 Ом в секции 1 и до 60 Ом — в секции 2. Применение резисторов с указанными сопротивлениями снижает

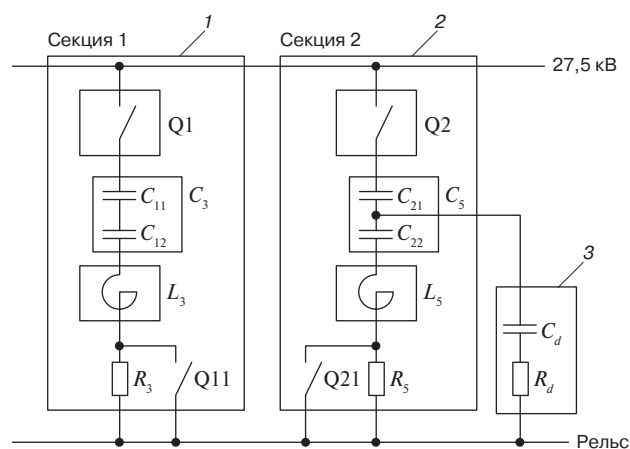


Рис. 3. Новая схема двухсекционной ФКУ с демпфирующей цепью:

1 — модуль секции 1; 2 — модуль секции 2; 3 — модуль демпфирующей цепи

Fig. 3. New scheme of two-sectional FCI with damping chain:

1 — section module 1; 2 — section module 2; 3 — module of damping chain

Таблица 2

Показатели несинусоидальности напряжения в тяговой сети
без подключения ФКУ и при подключении ФКУ различных
конфигураций

Table 2

Indicators of voltage non-sinusoidality to the traction network without
connecting FCI and when connecting FCI with different configurations

Вариант	Схема	Действующее значение тока тяговой нагрузки, А	Коэффициенты гармонических составляющих			
			$K_{U(3)}$	$K_{U(5)}$	$K_{U(7)}$	K_U
Допустимые значения $K_{U(n)}$, % в течение 95% времени для напряжения 25 (110) кВ [10]			3(1,5)	4(1,5)	3(1)	5(2)
1	Без подключения ФКУ	150	3,45	2,7	2,06	5,21
		300	6,75	4,93	3,47	9,55
		450	9,84	6,75	4,42	13,36
2	Односекционная ФКУ (150 Гц), рис. 4, а	150	0,51	1,44	1,26	2,36
		300	1,02	2,78	2,33	4,38
		450	1,54	4,06	3,24	6,17
3	Двухсекционная ФКУ (150 и 250 Гц), рис. 4, б	150	1,03	0,34	0,9	1,76
		300	2,08	0,68	1,72	3,36
		450	3,17	1	2,46	4,88
4	Односекционная ФКУ (150 Гц) с ДЦ, рис. 4, в	150	3,76	3,2	2,57	5,96
		300	7,33	5,81	4,22	10,79
		450	10,73	7,89	5,25	15
5	Двухсекционная ФКУ 2×150 Гц с ДЦ в секции 1, рис. 4, г	150	0,649	1,86	1,77	3,19
		300	1,298	3,56	3,19	5,78
		450	1,96	5,14	4,34	7,96
6	Двухсекционная ФКУ с ДЦ в секции 150 Гц, рис. 4, г	150	1,17	0,36	1,07	2,1
		300	2,36	0,69	2,03	3,97
		450	3,59	1,03	2,89	5,68
7	Двухсекционная ФКУ с ДЦ в секции 250 Гц, рис. 4, д	150	1,05	0,36	1,08	2,05
		300	2,12	0,72	2,04	3,85
		450	3,21	1,06	2,91	5,5
8	Двухсекционная ФКУ с ДЦ в двух секциях, рис. 4, е	150	3,12	1,54	1,78	4,24
		300	6,205	2,94	3,14	8,01
		450	9,21	4,16	4,12	11,42

броски тока и напряжения при коммутации секций ФКУ, что позволяет перейти на регулируемый режим секций с ограниченным числом их переключений.

Резисторы 40 и 60 Ом изготовлены в ООО «БЭЛ» и успешно прошли эксплуатационные испытания в установках поперечной емкостной компенсации на тяговой подстанции Сейма Горьковской железной дороги.

2. В [5] при рассмотрении двухсекционной КУ указано на наличие резонансных явлений между секциями, настроенными на 150 и 250 Гц, и делается вывод [5, с. 51]: «...с точки зрения распределения токов высших гармоник с включением демпфирующих цепей

в обе секции или в одну секцию 250 Гц схемы вполне приемлемы...». Кроме того, там же сказано: «...в связи с большим сопротивлением реактора секции 150 Гц через сопротивление R_d протекает значительный ток гармоник и потери... достигают 60 кВт...». Принимая справедливый учет резонансных явлений в секциях и учитывая значительные потери мощности в резисторе, с целью снижения значительных потерь предлагается демпфирующую цепь **включать только в секцию 250 Гц** [15, 16], где действующее значение токов гармонических составляющих меньше, чем в секции 150 Гц, в 2 раза и более. Даже если нет необходимости включения секции с резонансной настройкой на 250 Гц, то для включения демпфирующей цепи монтируют секцию на 250 Гц (указанное предложение отсутствует в [5]).

3. Как видно из рис. 3, демпфирующая цепь подключена без коммутационного аппарата (в отличие от [5]). И дело здесь не в экономии затрат на коммутационный аппарат. Главное в этой схеме следующее: если отключать демпфирующую цепь без отключения секции, к которой она подключена, то следует сохранить частотную настройку, например, так, как это сделано в [5, рис. 6]. Поэтому принято, что с целью упрощения схемного решения при необходимости отключать демпфирующую цепь отключают всю секцию с демпфирующей цепью. Таким образом, сформулируем формулу новой схемы ФКУ (если за прототип принять [5]):

«Новая схема двухсекционного ФКУ отличается от ранее применяемых тем, что с целью снижения потерь мощности и упрощения схемного решения широкополосный фильтр подключен без коммутационного аппарата только в секцию 250 Гц».

4. В качестве коммутационных аппаратов Q11 и Q21 применены однофазные вакуумные выключатели на 10 кВ разработки АО «ГК «Таврида Электрик».

Расчеты показателей несинусоидальности напряжения в тяговых сетях переменного тока. С помощью системы MathCad выполнены расчет токов и напряжений по цифровой модели (см. рис. 2) и разложение их на гармонические составляющие, определены значения коэффициентов гармонических составляющих $K_{U(n)}$. При моделировании электромагнитных процессов учтены тяговые нагрузки в зоне питания тяговой подстанции. Полученные значения коэффициентов гармонических составляющих напряжения представлены в табл. 2. В строке «Допустимые значения...» указаны для сравнения нормированные значения показателей несинусоидальности [10]. С увеличением тяговой нагрузки увеличиваются значения коэффициентов гармонических составляющих, и уже при тяговой нагрузке более 300 А показатели несинусоидальности превышают допустимые значения (см. табл. 2).

С целью снижения несинусоидальности рассмотрим варианты схем ФКУ, подключенных к шинам



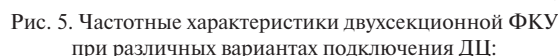
d — двухсекционная ФКУ с ДЦ в секции 2; e — двухсекционная ФКУ с ДЦ в двух секциях

Fig. 4. Equivalent circuits of circuit options of FCI:

a – one-sectional FCI; b – two-sectional FCI; c – one-sectional FCI with DC; d – two-sectional FCI with DC in section 1; e – two-sectional FCI with DC in section 2; f – two-sectional FCI with BC in both sections

Введение демпфирующих цепочек (ДЦ) смещает частотные характеристики «влево» (рис. 5, кривые 2 и 3 смещены «влево» относительно кривой 1), тем самым ухудшая фильтрующие свойства ФКУ [17]. Поэтому при включении ДЦ корректируют резонансные частоты фильтров с тем, чтобы они соответствовали нормируемым значениям показателей несинусоидальности [10]. В табл. 2 для схем с ДЦ представлены результаты расчетов, произведенных с учетом указанной корректировки резонансных частот. Как видно, подключение двухсекционной установки по схеме, представленной на рис. 4, б, снижает величину несинусоидальности напряжения до допустимых значений. При небольших тяговых нагрузках возможно применение односекционной ФКУ (рис. 4, а).

Указанные расчеты проиллюстрированы на рис. 6, где видно, что наилучшие результаты по снижению гармоник напряжения $K_{U(n)}, \%$, достигаются при следующих вариантах схем — 3, 6 и 7.



1 — без подключения ДЦ; 2 — с подключением ДЦ в секцию 1, настроенную на 3-ю гармонику; 3 — с подключением ДЦ в секцию 2, настроенную на 5-ю гармонику

Fig. 5. Frequency parameters of two-sectional FCI with different connections to DC:

1—without connecting to DC; 2—with connection to DC into section 1, set for 3rd harmonic; 3—with connection to DC into section 2, set for 5th harmonic

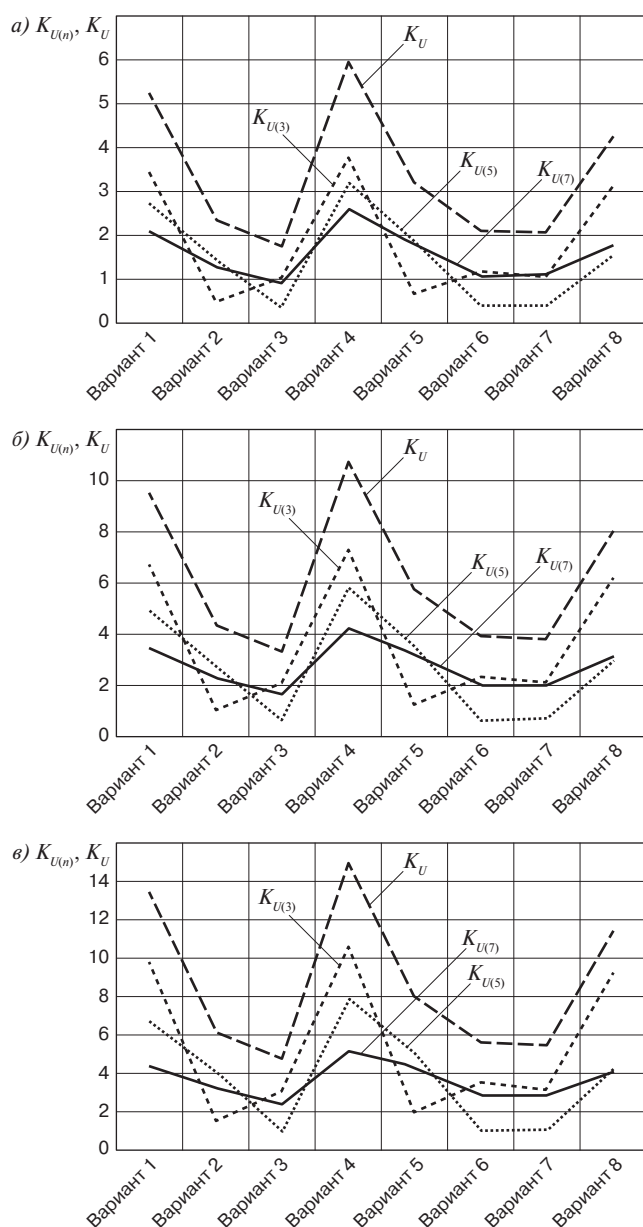


Рис. 6. Значения коэффициентов гармонических составляющих напряжения $K_{U(n)}$, % и K_U , % при применении различных схем ФКУ (варианты схем согласно рис. 4) с тяговой нагрузкой: а — 150 А; б — 300 А; в — 450 А

Fig. 6. The values of the coefficients of harmonic components of voltage $K_{U(n)}$, % and K_U , % when using different schemes of FCI (options for schemes according to Fig. 4) with traction load: а — 150 А; б — 300 А; в — 450 А

Полученная информация дает возможность откорректировать первоначально принятые параметры ФКУ для достижения нормированных значений гармоник напряжения.

Рекомендуемые схемы ФКУ. Прежде всего следует обратить внимание на высокую эффективность односекционной ФКУ: суммарный коэффициент гармонических составляющих снижается примерно в 2 раза (см. вариант 2 в табл. 2). Включение двухсекционной

ФКУ (вариант 3) с настройкой на 3-ю и 5-ю гармоники снижает суммарный коэффициент гармонических составляющих еще на 20–40%. Таким образом, для снижения несинусоидальности приемлемыми вариантами являются как одно-, так и двухсекционные ФКУ, что и следует проверять на цифровой модели. Важно добавить, как указано в [5], предлагаемые схемы ФКУ эффективнее по фильтрации гармоник, чем применяемые в настоящее время двухрезонансные ФКУ.

При подключении демпфирующих цепей происходит усиление 5-й и 7-й гармонических составляющих, и поэтому в общем случае увеличивается значение суммарного коэффициента гармонических составляющих по сравнению с вариантом отсутствия демпфирующих цепей. Тем не менее при необходимости включения демпфирующих цепей, как это указано в [7], наиболее приемлемыми вариантами являются двухсекционные ФКУ с подключением резисторов в секцию с настройкой на пятую гармонику (см. варианты 6 и 7). Так как токи 5-й гармоники значительно меньше токов 3-й гармоники, то ток резистора, подключенного к фильтру 5-й гармоники, будет меньше тока резистора, подключенного к фильтру 3-й гармоники и, следовательно, потери мощности в ФКУ с ДЦ в секции 250 Гц будут наименьшие, чем объясняется преимущество подключения резистора к фильтру 5-й гармоники.

На основании проведенных исследований определяем принципы выбора параметров схем ФКУ.

1. ФКУ устанавливается для выполнения приказа Минпромэнерго № 49 от 22.02.2007 г. «Порядок расчета значений соотношения потребления активной и реактивной мощности для отдельных энергопринимающих устройств (групп энергопринимающих устройств) потребителей электрической энергии, применяемых для определения обязательств сторон в договорах об оказании услуг по передаче электрической энергии (договоры энергоснабжения)».

2. ФКУ может обеспечить выполнение требований [10] по соблюдению суммарного коэффициента гармонических составляющих. Если по измерениям обнаружена необходимость дополнительного снижения коэффициента n -й гармонической составляющей $K_{U(n)}$, то необходимо устанавливать дополнительные фильтры.

3. Для выполнения требований пп. 1, 2 ФКУ следует включать на тяговой подстанции. Если же необходимо выполнить требование повышения напряжения в тяговой сети и, соответственно, повышения пропускной способности, то ФКУ устанавливают на посту секционирования.

4. На участках, где существует опасность возникновения колебательных процессов в тяговой сети (что возможно при консольном питании тяговой сети и малой мощности (300–500 МВ·А) короткого замыкания

на вводах 110 кВ тяговой подстанции), в секцию ФКУ с настройкой на 250 Гц включают демпфирующие цепи ($C_d - R_d$).

5. Практика работы ФКУ свидетельствует, что в подавляющем большинстве случаев достаточно включать односекционные или двухсекционные ФКУ на тяговой подстанции или на посту секционирования без ДЦ.

Включение демпфирующих цепей связано с увеличением мощности ФКУ и потерь электроэнергии. Необходимость включения ДЦ должна быть тщательно проанализирована и аргументирована в технико-экономическом обосновании.

Выводы. 1. Предложена новая схема ФКУ для тяговых сетей переменного тока железных дорог, позволяющая комплексно решать проблемы повышения качества электроэнергии путем компенсации реактивной мощности и фильтрации высших гармонических составляющих тока и напряжения. Модульное построение ФКУ позволяет наиболее экономично корректировать режимы в конкретных точках системы тягового электроснабжения.

2. Разработана новая модель тяговой нагрузки электроподвижного состава переменного тока, учитывающая возможность корректировки значений гармонических составляющих тяговой нагрузки, что приближает расчетную кривую тока к зависимости, полученной экспериментальным путем.

3. Предложенная цифровая модель системы тягового электроснабжения с ФКУ и моделью ЭПС позволяет проанализировать варианты схем ФКУ по степени уменьшения несинусоидальности напряжения в тяговой сети и при необходимости скорректировать параметры ФКУ.

4. Показано, что для снижения гармонических составляющих тока и напряжения эффективны схемы ФКУ: односекционные с настройкой на 3-ю гармонику и двухсекционные — с настройкой на 3-ю и 5-ю гармоники.

5. Разработана новая в части подключения демпфирующей цепи схема, ее применение позволит значительно снизить потери мощности в резисторе фильтра.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Качество электроэнергии: современные требования и их обеспечение в электрических сетях железных дорог / С. Н. Епифанцев [и др.]; под ред. Г. П. Кутового. М.: Эко-Пресс, 2014. 264 с.
2. Бородулин Б. М., Герман Л. А., Николаев Г. А. Конденсаторные установки электрифицированных железных дорог. М.: Транспорт, 1983. 183 с.

3. Герман Л. А., Серебряков А. С. Регулируемые установки емкостной компенсации в системах тягового электроснабжения железных дорог: монография. М.: МИИТ, 2012. 211 с.

4. Правила устройства системы тягового электроснабжения железных дорог Российской Федерации. ЦЭ-462 М.: МПС РФ, 1997. 79 с.

5. Установки поперечной емкостной компенсации с фильтрацией высших гармонических составляющих в тяговых сетях переменного тока / Л. А. Герман [и др.] // Вестник ВНИИЖТ. 2014. № 1. С. 47–54.

6. Двухрезонансные фильтрокомпенсирующие устройства электрифицированных железных дорог / В. Т. Черемисин [и др.] // Наука и транспорт. 2008. С. 48–51.

7. Ермоленко Д. В., Павлов И. В. Исследование волновых процессов в устройствах тягового электроснабжения // Сб. науч. тр. МИИТ. 1990. № 819. С. 93–100.

8. Исследование эффективности многофункциональных компенсирующих устройств в эксплуатационных условиях / Д. В. Ермоленко [и др.] // Вестник ВНИИЖТ. 1991. № 7. С. 44–47.

9. Правила устройства электроустановок (ПУЭ). Седьмое издание. М.: Эксмо, 2010. 496 с.

10. ГОСТ 32144–2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения: введ. 01.07.14. М.: Стандартинформ. 16 с.

11. Тимофеев А. В. Режимы в электрических системах с тяговыми нагрузками. М.: Энергия, 1972. 296 с.

12. Правила защиты устройств проводной связи и проводного вещания от влияния тяговой сети электрифицированных железных дорог переменного тока. М.: Транспорт, 1989. 135 с.

13. Герман Л. А., Гончаренко В. П. Современная схема продольной емкостной компенсации в системе тягового электроснабжения // Вестник РГУПС. 2013. № 2. С. 12–17.

14. Герман Л. А., Серебряков А. С., Максимова А. А. Цифровая модель фильтрокомпенсирующей установки с тяговой нагрузкой // Электроника и электрооборудование транспорта. 2014. № 3. С. 9–14.

15. Фильтрокомпенсирующая установка системы тягового электроснабжения переменного тока: патент на полезную модель № 138738 / А. А. Максимова, Л. А. Герман. Оpubл. 20.03.2014 г.

16. Фильтрокомпенсирующая установка тягового электроснабжения переменного тока: патент на полезную модель № 138722 / Л. А. Герман, В. А. Кващук, А. А. Максимова. Оpubл. 20.03.2014 г.

17. Частотные характеристики фильтрокомпенсирующих установок в тяговой сети переменного тока / Л. А. Герман [и др.] // Электроника и электрооборудование транспорта. 2014. № 6. С. 10–14.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

ГЕРМАН Леонид Абрамович,

д-р техн. наук, профессор Нижегородского филиала МИИТ

СЕРЕБРЯКОВ Александр Сергеевич,

д-р техн. наук, профессор Нижегородского филиала МИИТ

МАКСИМОВА Александра Альбертовна,

аспирант, Петербургский государственный университет путей сообщения (ПГУПС)

Статья поступила в редакцию 1.10.2015 г., принята к публикации 10.12.2015 г.

Filter compensating installations in AC traction networks

L. A. GERMAN¹, A. S. SEREBRYAKOV¹, A. A. MAKSIMOVA²

¹Moscow State University of Railway Engineering (MIIT), Nizhegorodskiy branch, Nizhny Novgorod, 603011, Russian Federation

²Saint-Petersburg State Transport University (PGUPS), Saint-Petersburg, 190031, Russian Federation

Abstract. The article discusses the design solutions to filter compensating installations (FCI), used in traction AC networks. The authors presented summarized calculations for new FCI schemes for the AC traction power system, with determination of circuit solutions for modular FCI in general case of resonant and wideband filters. The scope of FCI schemes for harmonic filtering was evaluated and filtration efficiency of the harmonic components of new FCI schemes was shown. The procedure of calculation of parameters of FCI was determined taking into account the curve of the traction current. A new model of traction load was proposed, reflecting the real harmonic composition of current at the connection point of FCI.

The new model of traction load of AC electric rolling stock was applied, characterizing that it become possible to adjust the values of the harmonic components of the traction load, and this brings the curve of the current into the proximity of experimentally measured.

A digital model of electric traction system with FCI and model of the EMU was created, allowing to consider various options schemes of FCI (with the decrement of non-sinusoidality of the voltage in traction network) and, if necessary, to adjust the parameters of FCI.

The numerical model for simultaneous calculation of the parameters of the system was developed, including system of external power supply (SEPS) with traction substations, FCI, traction network and traction load — electric multiple unit (EMU).

Methods to reduce losses in the damping resistor were proposed and justified. The authors presented a comparison of different circuit variants of FCI from viewpoint of reducing the values of the coefficients of harmonic components of the voltage. The optimum variant of FCI is shown.

Keywords: compensation of reactive power; filter compensating installation; complex-block composition of compensation devices; harmonic composition of traction loading current; voltage non-sinusoidality

REFERENCES

1. Epifantsev S.N., Zhezhenko I.V., Ovseychuk V.A., Kutovoy G.P. *Kachestvo elektroenergii: sovremennye trebovaniya i ikh obespechenie v elektricheskikh setyakh zheleznykh dorog* [Power Quality: modern requirements and its provision in electrical networks of railways]. Moscow, Eko-Press Publ., 2014, 264 p.
2. Borodulin B.M., German L.A., Nikolaev G.A. *Kondensatornye ustanovki elektrifitsirovannykh zheleznykh dorog* [Condenser installations of electrified railways]. Moscow, Transport Publ., 1983, 183 p.
3. German L.A., Serebryakov A.S. *Reguliruyemye ustanovki emkostnoy kompensatsii v sistemakh tyagovogo elektrosnabzheniya zheleznykh dorog* [Adjustable installations of capacitive compensation in the systems of traction power supply of railways]. Moscow, MIIT Publ., 2012, 211 p.
4. *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, 79 p. (in Russ.).
5. German L.A., Serebryakov A.S., Ermolenko D.V., Goncharenko V.P., Kvashchuk V.A., Maksimova A.A. *Ustanovki poperechnoy emkostnoy kompensatsii s fil'tratsiyey vysshikh garmonicheskikh sostavlyayushchikh v tyagovykh setyakh peremennogo toka* [Installations of transverse capacitive compensation with filtering higher harmonic components in AC traction networks]. Vestnik VNIIZhT [Vestnik of the Railway Research Institute], 2014, no. 1, pp. 47 – 54.
6. Cheremisin V.T., Kvashchuk V.A., Brenkov S.N. *Dvukhrezonansnye fil'trokompensiruyushchie ustroystva elektrifitsirovannykh zheleznykh dorog* [Two resonant filter-compensating devices of electrified railways]. Nauka i transport, 2008, pp. 48 – 51.

7. Ermolenko D.V., Pavlov I.V. *Issledovanie volnovykh protsessov v ustroystvakh tyagovogo elektrosnabzheniya* Sb. nauch. tr. MIIT [Research of wave processes in devices of traction power supply. Coll. of sci. works of MIIT]. Moscow, MIIT Publ., 1990, pp. 93 – 100.

8. Ermolenko D.V., Molin H.H., Pavlov I.V., Tsybankov V.A., Shevtsov B.V. *Issledovanie effektivnosti mnogofunktsional'nykh kompensiruyushchikh ustroystv v ekspluatatsionnykh usloviyakh* [Investigation of the effectiveness of multifunctional compensating devices in the operating conditions]. Vestnik VNIIZhT [Vestnik of the Railway Research Institute], 1991, no. 7, pp. 44 – 47.

9. *Pravila ustroystva elektroustanovok (PUE)*. [Electrical Installation Regulations (EIC), Moscow, Eksmo Publ., 2010, 496 p.

10. *GOST Standard 32144 – 2013. Electrical energy. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Power quality limits in the public power supply systems*. Appl. July 01, 2014. Moscow, Standartinform Publ., 2014. 16 p. (In Russ.).

11. Timofeev A.V. *Rezhimy v elektricheskikh sistemakh s tyagovymi nagruzkami* [Modes in power systems with traction loads]. Moscow, Energiya, Publ., 1972, 296 p.

12. *Pravila zashchity ustroystv provodnoy svyazi i provodnogo veshchaniya ot vliyaniya tyagovoy seti elektrifitsirovannykh zheleznykh dorog peremennogo toka* [Protection rules for devices of wire communication and wire broadcasting from influence of traction network of alternate current of electrified railroads]. Moscow, Transport Publ., 1989, 135 p.

13. German L.A., Goncharenko V.P. *Sovremennaya Skhema prodol'noy emkostnoy kompensatsii v sisteme tyagovogo elektrosnabzheniya* [Contemporary circuit of longitudinal capacitive compensation in traction power supply system]. Vestnik RGUPS, 2013, no. 2, pp. 12 – 17.

14. German L.A., Serebryakov A.S., Maksimova A.A. *Tsifrovaya model' fil'trokompensiruyushchey ustanovki s tyagovoy nagruzkoy* [Digital model of filter-compensating installation with the traction load]. Elektronika i elektrooborudovanie transporta, 2014, no. 3, pp. 9 – 14.

15. Maksimova A.A., German L.A. RF patent №138738. *Fil'trokompensiruyushchaya ustanovka sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya peremennogo toka*. Moscow Publ. March 20, 2014. (In Russ.).

16. German L.A., Kvashchuk V.A., Maksimova A.A. RF patent № 138722. *Fil'trokompensiruyushchaya ustanovka tyagovogo elektrosnabzheniya peremennogo toka*. Moscow Publ., March 20, 2014. (In Russ.).

17. German L.A. *Chastotnye kharakteristiki fil'trokompensiruyushchikh ustanovok v tyagovoy seti peremennogo toka* [Frequency characteristics of filter-compensating installations in AC traction systems]. Elektronika i elektrooborudovanie transporta, 2014, no. 6, pp. 10 – 14.

ABOUT THE AUTHORS

GERMAN Leonid Abramovich,

Dr. Sci. (Eng.), Professor of Nizhny Novgorod branch of MIIT

SEREBRYAKOV Aleksander Sergeevich,

Dr. Sci. (Eng.), Professor of Nizhny Novgorod branch of MIIT

MAKSIMOVA Aleksandra Al'bertovna,

Postgraduate student, St. Petersburg State Transport University (PGUPS)

Received 1.10.2015

Accepted 10.12.2015

■ E-mail: lagerman@mail.ru (L. A. German)
maksimova.aa1987@ya.ru (A. A. Maksimova)