



МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
**УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ
ЭНЕРГИИ**



Сибирский Федеральный Университет

Компенсация искажений напряжения в системах электроснабжения с тяговой нагрузкой

Шандрыгин Денис Александрович,
аспирант кафедры СААУП ИКИТ СФУ.

Довгун Валерий Петрович, доктор
технических наук, профессор,
руководитель НУЛ информационных
систем в энергетике кафедры СААУП
ИКИТ СФУ

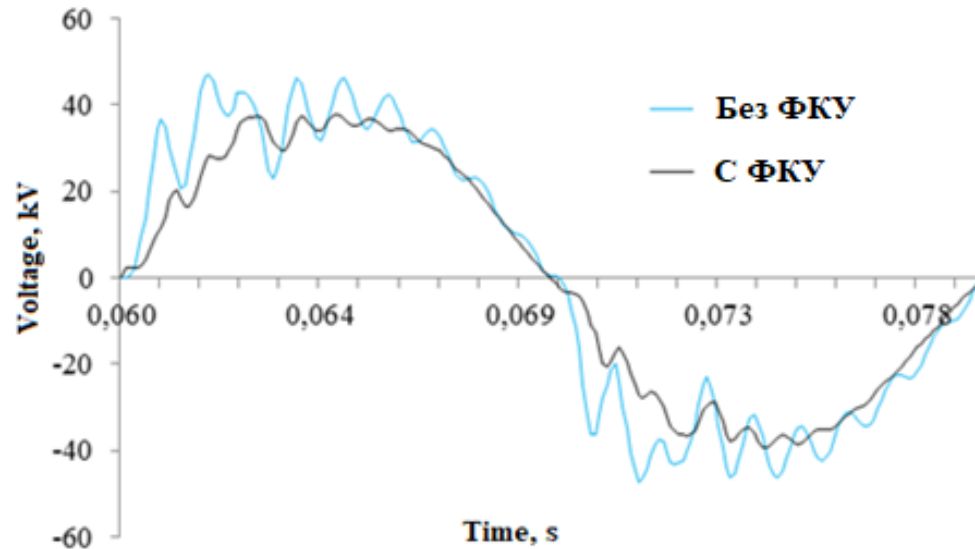
Москва, 2020

Структура презентации

1. Актуальность проблемы
2. Модель системы электроснабжения
3. Анализ резонансных частот системы тяговая сеть – внешняя сеть
4. Фильтрокомпенсирующие устройства для систем тягового электроснабжения
5. Выводы

Особенности систем тягового электроснабжения

1. Электроподвижной состав (ЭПС) переменного тока представляет собой мощную однофазную нелинейную нагрузку, изменяющуюся во времени. Тиристорные преобразователи электровозов вызывают значительные искажения потребляемого тока, сопровождающиеся образованием высших гармонических составляющих напряжения на токоприемнике электровоза;
2. Вторая особенность электроэнергетических систем с тяговыми нагрузками состоит в том, что по отношению к гармоникам высокого порядка как внешняя, так и контактная сеть являются системами с распределенными параметрами. Волновые процессы в таких системах сопровождаются резонансными явлениями, которые вызывают значительные искажения напряжения. Взаимное влияние СВЭ и тяговой сети приводит к тому, что фактические значения показателей качества электрической энергии в тяговой сети и в системе внешнего электроснабжения выходят за пределы существующих стандартов.

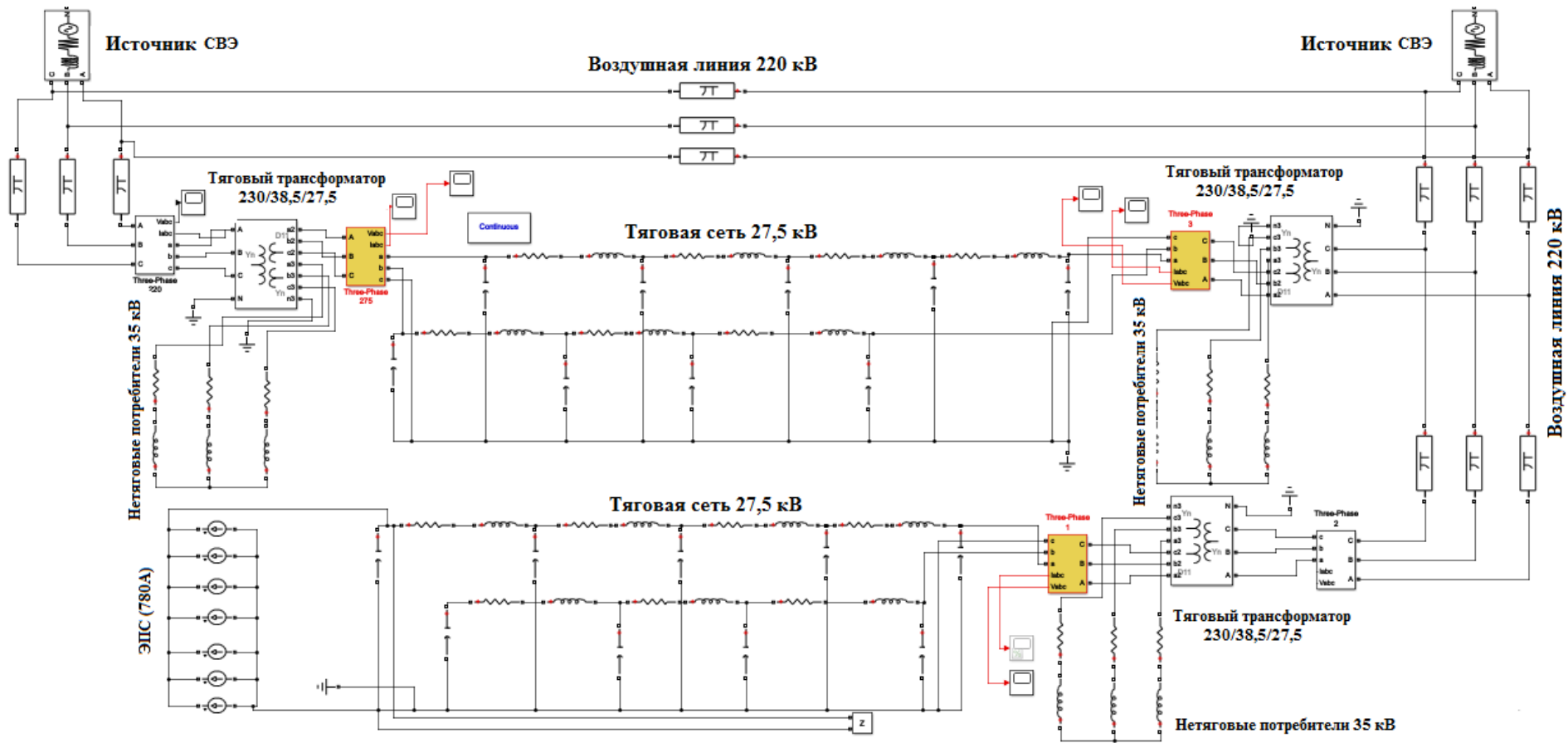


Основные факторы, оказывающие отрицательное влияние на системы тягового электроснабжения

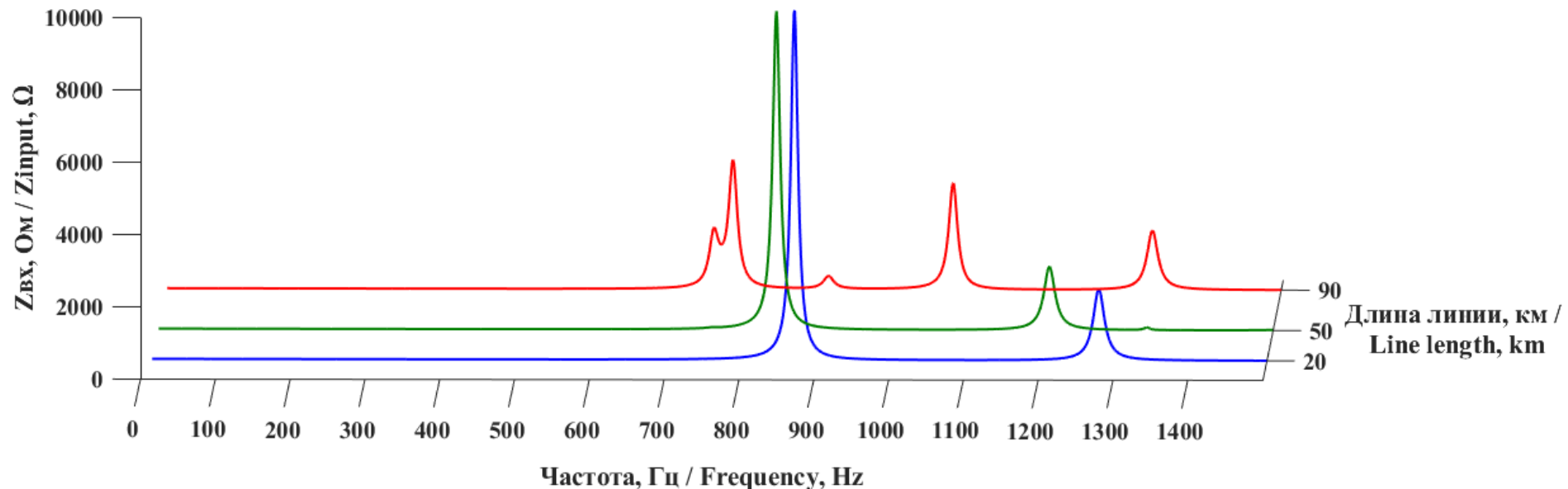
- ❖Пониженное напряжение в конце протяженных участков тяговой сети;
- ❖Несинусоидальный характер токов и напряжений;
- ❖Перенапряжения, вызванные резонансными явлениями в контактной сети;
- ❖Уменьшение средней величины напряжения .

Фактические значения показателей качества электрической энергии выходят за пределы существующих стандартов в тяговой сети, а в некоторых случаях и в системе внешнего электроснабжения.

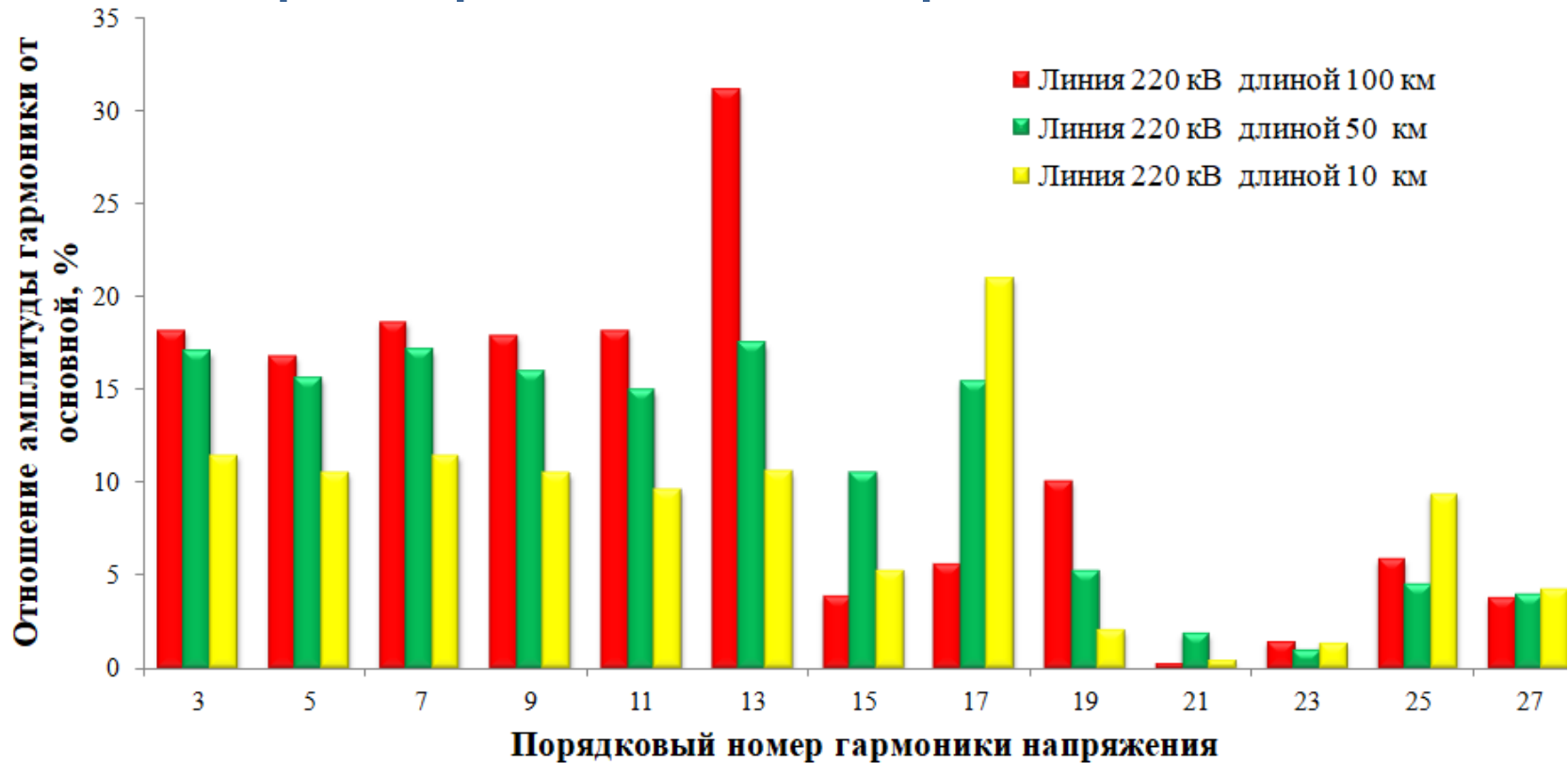
Имитационная модель системы электроснабжения с тяговой нагрузкой



Частотные характеристики сопротивления тяговой сети относительно токоприемника локомотива при изменении длины линии внешнего электроснабжения



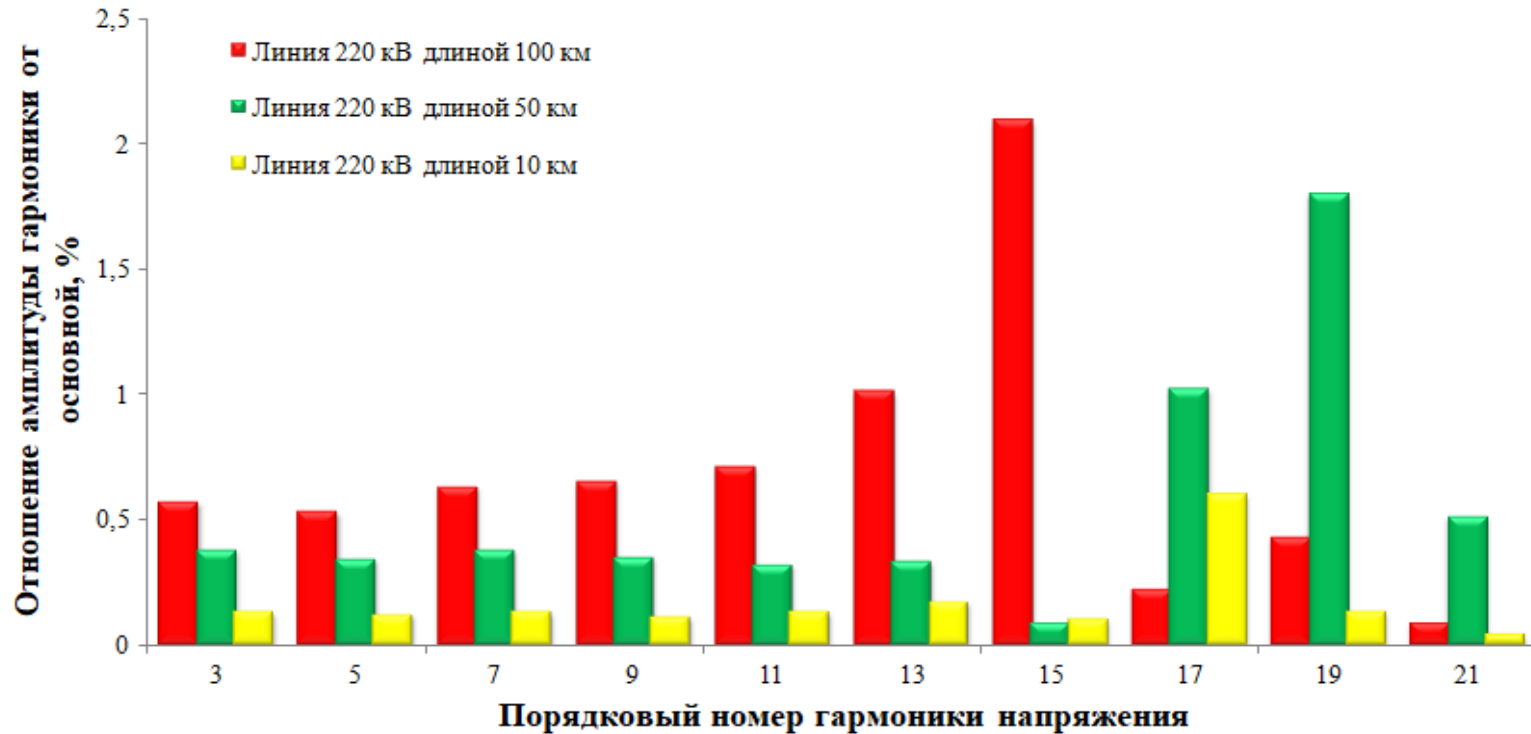
Спектры напряжения на токоприемнике локомотива



Коэффициенты гармонических составляющих в тяговой сети 27,5 кВ, %

Линия 220 кВ	$K_{U(3)}$	$K_{U(5)}$	$K_{U(7)}$	$K_{U(9)}$	$K_{U(11)}$	$K_{U(13)}$	$K_{U(15)}$	K_U
Длина 100 км	18,16	16,74	18,61	17,87	18,12	31,08	3,87	52,64
Длина 50 км	17,01	15,59	17,08	15,93	14,93	17,44	10,53	45,00
Длина 10 км	11,44	10,49	11,4	10,48	9,59	10,54	5,23	35,55

Спектры напряжения на стороне линии внешнего электроснабжения



Коэффициенты гармонических составляющих в сети 220 кВ, %

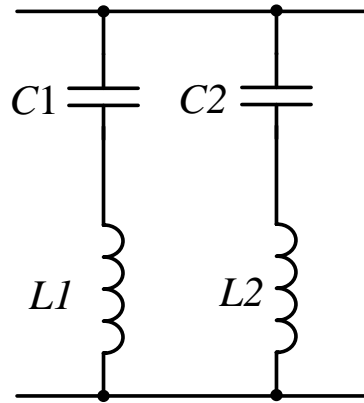
Линия 220 кВ	$K_{U(3)}$	$K_{U(5)}$	$K_{U(7)}$	$K_{U(9)}$	$K_{U(11)}$	$K_{U(13)}$	$K_{U(15)}$	K_U
Длина 100 км	0,57	0,53	0,63	0,65	0,71	1,01	2,09	4,49
Длина 50 км	0,38	0,34	0,38	0,35	0,32	0,33	0,09	3,16
Длина 10 км	0,13	0,12	0,13	0,11	0,13	0,17	0,1	0,72

Пассивные ФКУ для систем тягового электроснабжения

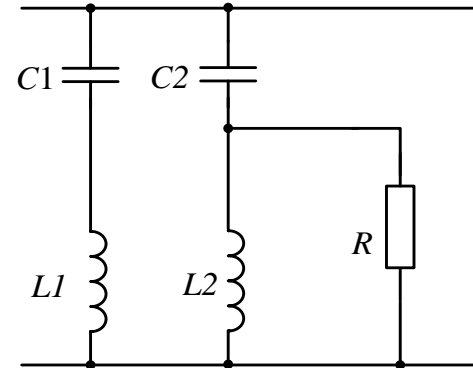
Пассивные фильтры для тяговых сетей должны выполнять следующие функции:

- - компенсацию реактивной мощности;
- - увеличение среднего значения напряжения на токоприемниках ЭПС за счет подавления мощных низкочастотных гармоник;
- - демпфирование резонансных явлений, вызванных волновыми процессами в тяговой сети и в системе внешнего электроснабжения

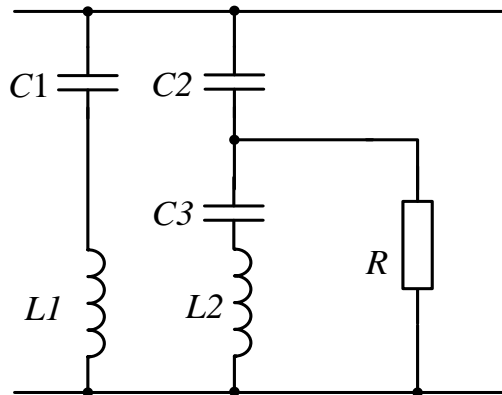
Пассивные ФКУ для систем тягового электроснабжения



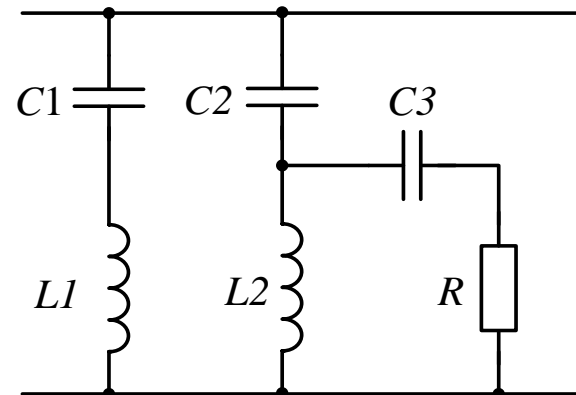
Двухрезонансный ФКУ (а)



ФКУ с широкополосным фильтром 2-го порядка (б)



ФКУ с фильтром С-типа (с)



ФКУ с широкополосным фильтром 3-го порядка (д)

Оптимизация ФКУ

Задачу оптимизации частотной характеристики ШПФ сформулируем следующим образом: найти значения элементов фильтра, обеспечивающих минимум целевой функции

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

при выполнении следующих ограничений:

$$\left(\frac{\operatorname{Re}\left\{\frac{1}{Z(j\omega_1, \bar{x})}\right\}}{\operatorname{Im}\left\{\frac{1}{Z(j\omega_1, \bar{x})}\right\}} \right) \leq K_0 \quad (1, a)$$

$$|Z_\phi(j\omega, \bar{x})| \geq R_{\min},$$

В формулах (1) приняты следующие обозначения:

$Z_\phi(\bar{x}, \omega_k)$ – входное сопротивление ШПФ на частоте ω_k ;

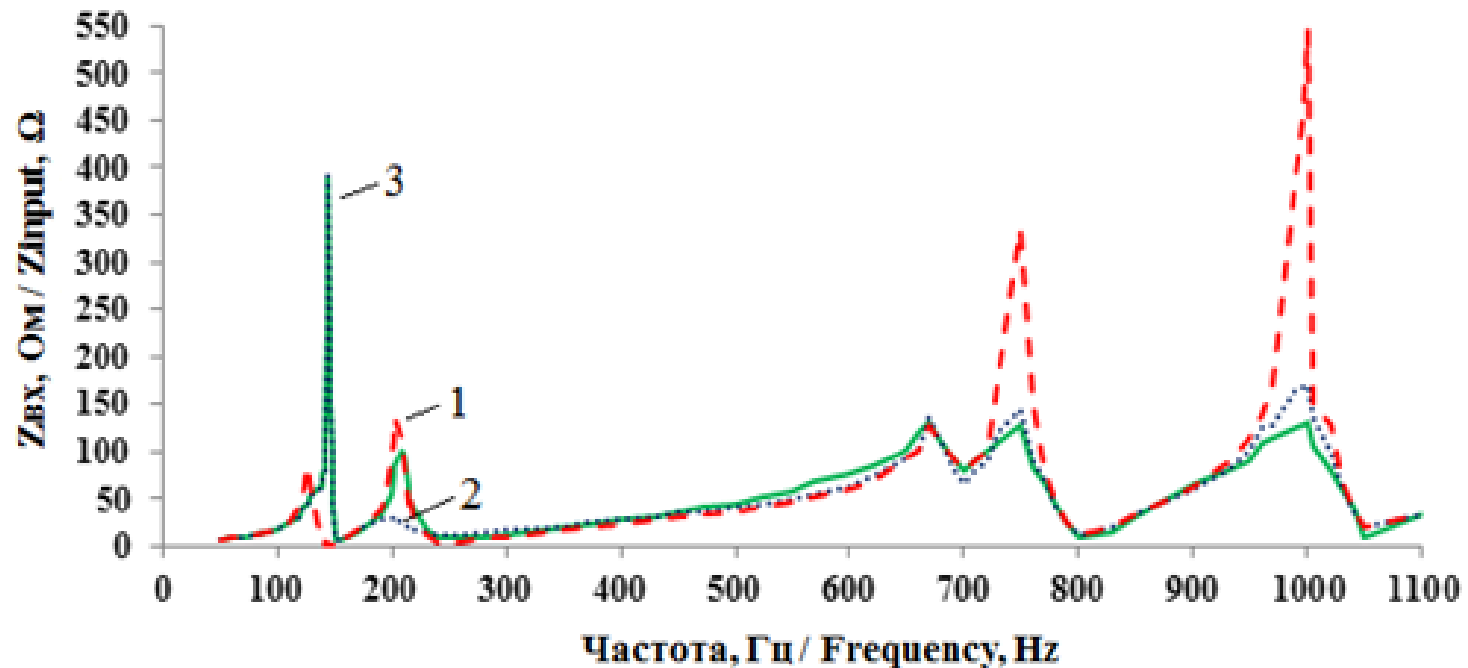
$Z_c(\omega_k)$ – сопротивление контактной сети на частоте ω_k ;

w_k – весовые коэффициенты, учитывающие важность k-го слагаемого.

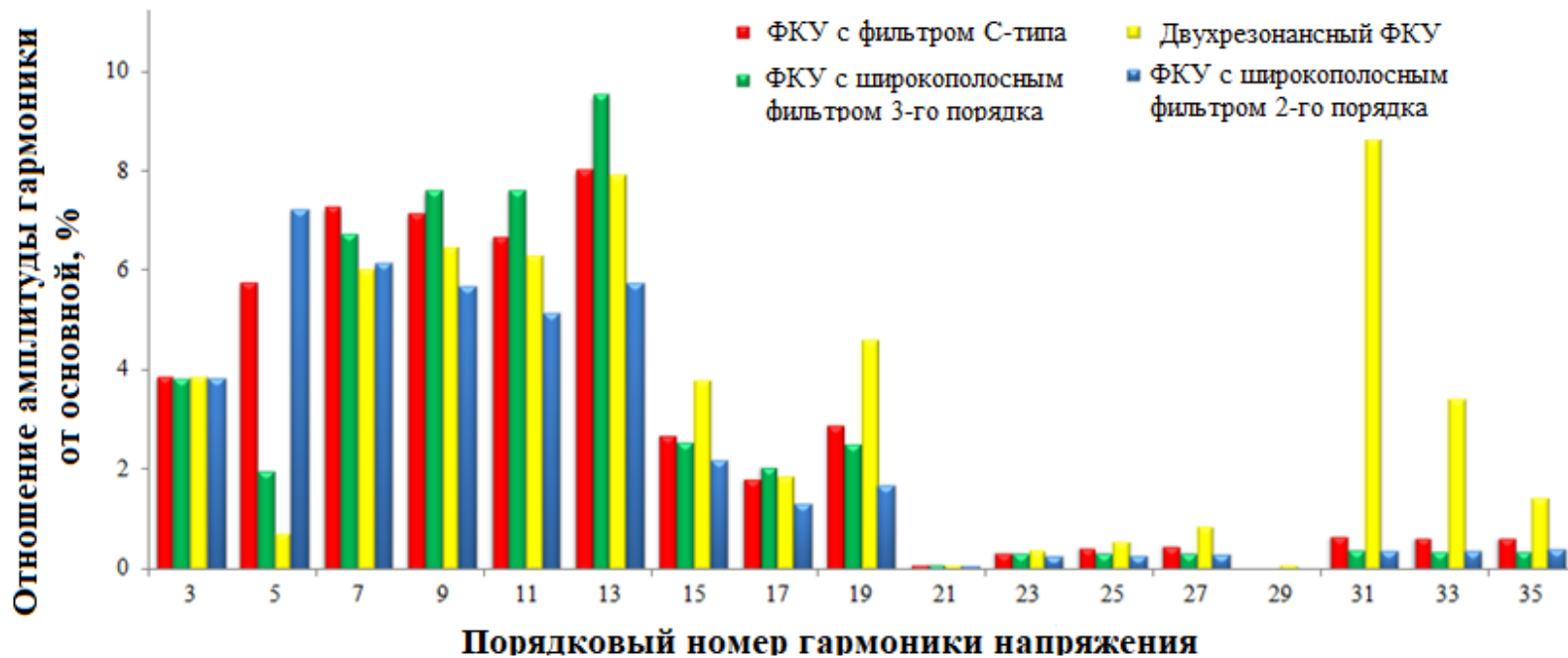
Параметр K_0 определяет допустимое значение отношения активной и реактивной мощностей фильтра на частоте основной гармоники.

Неравенство (1, б) определяет допустимое значение отношения активной и реактивной мощностей ФКУ на частоте основной гармоники.

Частотные характеристики входного сопротивления тяговой сети после установки компенсирующих устройств



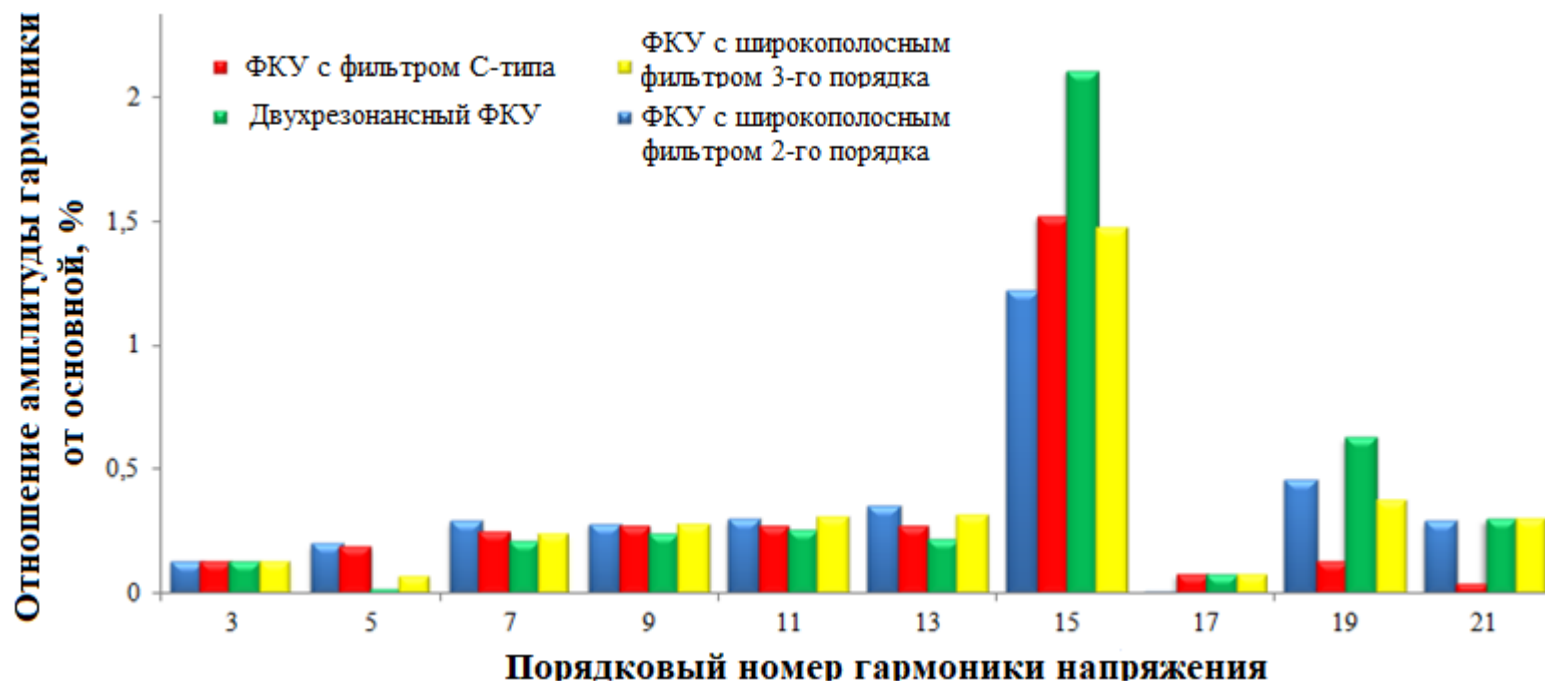
1- Схема двухсекционного ФКУ, 2 – ФКУ с фильтром С-типа, 3- ФКУ с ШП 3-го порядка



Коэффициенты гармонических составляющих в тяговой сети, %

Вариант схемы	$K_{U(3)}$	$K_{U(5)}$	$K_{U(7)}$	$K_{U(9)}$	$K_{U(11)}$	$K_{U(13)}$	$K_{U(15)}$	K_U
Фильтр С-типа	3,88	5,76	7,28	7,16	6,69	8,02	2,71	16,82
Двухрезонансный ФКУ	3,88	0,76	6,05	6,49	6,30	7,93	3,82	18,11
ФКУ с ШП 3-го порядка	3,86	2,01	6,75	7,61	7,63	9,54	2,59	17,03
ФКУ с ШП 2-го порядка	3,83	7,21	6,14	5,68	5,13	5,73	2,18	17,41

ТЯГОВОЙ СЕТИ



Коэффициенты гармонических составляющих в сети 220 кВ, %

Вариант схемы	$K_{U(3)}$	$K_{U(5)}$	$K_{U(7)}$	$K_{U(9)}$	$K_{U(11)}$	$K_{U(13)}$	$K_{U(15)}$	K_U
Фильтр С-типа	0,13	0,19	0,25	0,27	0,27	0,27	1,52	1,64
Двухрезонансный ФКУ	0,13	0,02	0,21	0,24	0,26	0,22	2,11	2,18
ФКУ с ШП 3-го порядка	0,13	0,07	0,24	0,28	0,31	0,32	1,47	1,59
ФКУ с ШП 2-го порядка	0,13	0,2	0,29	0,28	0,32	0,35	1,22	1,63

Активная мощность, потребляемая ФКУ на частоте основной гармонике

	ФКУ с фильтром С-типа		ФКУ с ШП 2-го порядка		ФКУ с ШП 3-го порядка		ФКУ с ШП 5-го порядка		
Замеры	L	R	L	R	L	R	L1	L2	R
Потери	2937,5	102,3	2026,9	4103	2283,2	66,4	1705,3	0,3	0,338
Σ потери	3039,9 Вт		6129,9 Вт		2349,6 Вт		1705,98 Вт		

Фильтр	ΣL , мН	ΣC , мкФ
ФКУ с фильтром С-типа	58	183,5
ФКУ с ШП 3-го порядка	38,73	10,7
ФКУ с ШП 5-го порядка	76,48	26,79

Выводы

• СТЭ и СВЭ представляют собой две связанные системы с распределенными параметрами. Они оказывают взаимное влияние друг на друга. Частоты параллельных резонансов совпадают.

• При уменьшении мощности к.з. линии СВЭ резонансные максимумы как в системе тягового электроснабжения, так и в СВЭ смещаются в низкочастотную область;

• При уменьшении мощности к.з. линии СВЭ увеличиваются искажения напряжения, фактические значения показателей качества электрической энергии выходят за пределы существующих стандартов как в тяговой сети, так и в системе внешнего электроснабжения;

• Рассмотрен метод проектирования широкополосных демпфирующих фильтров, основанный на оптимизации частотных характеристик фильтра в пространстве параметров реактивных элементов. При расчете фильтра с помощью предложенного метода учитываются спектральный состав тока ЭПС, а также частотные характеристики тяговой сети. Метод позволяет проектировать ШПФ любого порядка;

• Сравнительный анализ ФКУ показал, 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;

• По результатам работы можно сделать вывод, что более эффективным с точки зрения экономической составляющей, и энергоэффективности является вариант ФКУ с демпфирующим широкополосным фильтром 3-го порядка.

Спасибо за внимание!