

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ/ELECTRICAL COMPLEXES AND SYSTEMS

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.155.105>

РАСЧЕТ И ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПАССИВНОГО ФИЛЬТРА ГАРМОНИК ДЛЯ НЕТЯГОВЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРИФИЦИРОВАННЫХ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ С ПОМОЩЬЮ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ В ПРОГРАММНОЙ СРЕДЕ MATLAB/SIMULINK

Научная статья

Стишенко К.П.^{1,*}, Кипервассер М.В.²

^{1,2} Сибирский Государственный Индустриальный Университет, Новокузнецк, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (stishenko3332[at]gmail.com)

Аннотация

В статье рассматривается проблема электромагнитного влияния мощных полупроводниковых выпрямителей электрифицированных дорог постоянного тока на качество электрической энергии, потребляемой нетяговыми потребителями. Приводятся результаты натурных замеров качества электрической энергии, питающей посты электрической централизации. Рассматриваются известные способы снижения искажающего воздействия тяговых преобразователей. Выполняется расчет параметров пассивного фильтра 11-ой и 13-ой гармоник, с дальнейшим имитационным моделированием в программной среде Matlab/Simulink для оценки эффективности компенсации указанных гармоник при различных тяговых нагрузках и мощности используемого пассивного фильтра гармоник.

Ключевые слова: высшие гармоники, нетяговые потребители, имитационная модель, качество электрической энергии, пассивный фильтр гармоник, гармонический спектр.

CALCULATION AND EVALUATION OF PASSIVE HARMONIC FILTER EFFICIENCY FOR NON-TRACTION CONSUMERS OF ELECTRIFIED RAILWAYS USING SIMULATION MODEL IN MATLAB/SIMULINK SOFTWARE ENVIRONMENT

Research article

Stishenko K.P.^{1,*}, Kipervasser M.V.²

^{1,2} Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russian Federation

* Corresponding author (stishenko3332[at]gmail.com)

Abstract

The article examines the problem of electromagnetic influence of powerful semiconductor rectifiers of electrified direct current roads on the quality of electrical energy consumed by non-traction consumers. The results of field measurements of the quality of electric energy supplying electric centralisation posts are given. The known ways of reducing the distorting effect of traction converters are examined. The calculation of the parameters of the passive filter of the 11th and 13th harmonics with further simulation modelling in the Matlab/Simulink software environment to evaluate the efficiency of compensation of the above harmonics at different traction loads and power of the used passive harmonic filter is carried out.

Keywords: higher harmonics, non-traction consumers, simulation model, power quality, passive harmonic filter, harmonic spectrum.

Введение

Системы железнодорожной электрической централизации (ЭЦ) обеспечивают надежное функционирование управления перевозочным и маневровым процессом. Оборудование указанных систем располагается в отдельных помещениях, именуемых постами ЭЦ. Посты ЭЦ получают электрическое питание, как правило, от тяговых подстанций, по отдельно стоящим воздушным линиям 6(10) кВ. От шин 6(10) кВ тяговых подстанций постоянного тока, помимо указанных потребителей, также питаются мощные полупроводниковые выпрямители, являющиеся источником гармонических искажений в питающую сеть (см. рис. 1.). Что, в свою очередь, приводит к существенному несинусоидальному искажению кривой напряжения, в том числе, на вводах 0,4 кВ постов ЭЦ. Данное обстоятельство в ряде случаев приводит к ложному срабатыванию реле контроля чередования фаз, входящего в состав системы защиты оборудования поста ЭЦ, что ведет к аварийному переходу питания на резервный фидер, либо аккумуляторную батарею. Указанный факт способен привести к прямому нарушению ПУЭ [1] в части требований к надежности электроснабжения приемников первой категории, к которым относятся посты ЭЦ.

Таким образом, решение проблемы электромагнитной совместимости нетяговых потребителей с системой тягового электроснабжения в границах электрифицированных железных дорог постоянного тока приобретает особенную актуальность ввиду модернизации аналоговых систем ЭЦ на микропроцессорные и прямого влияния надежности их работы на безопасность перевозочного процесса.

Принципиальная однолинейная схема электроснабжения постов ЭЦ на электрифицированных железных дорогах постоянного тока приведена на рисунке 1.

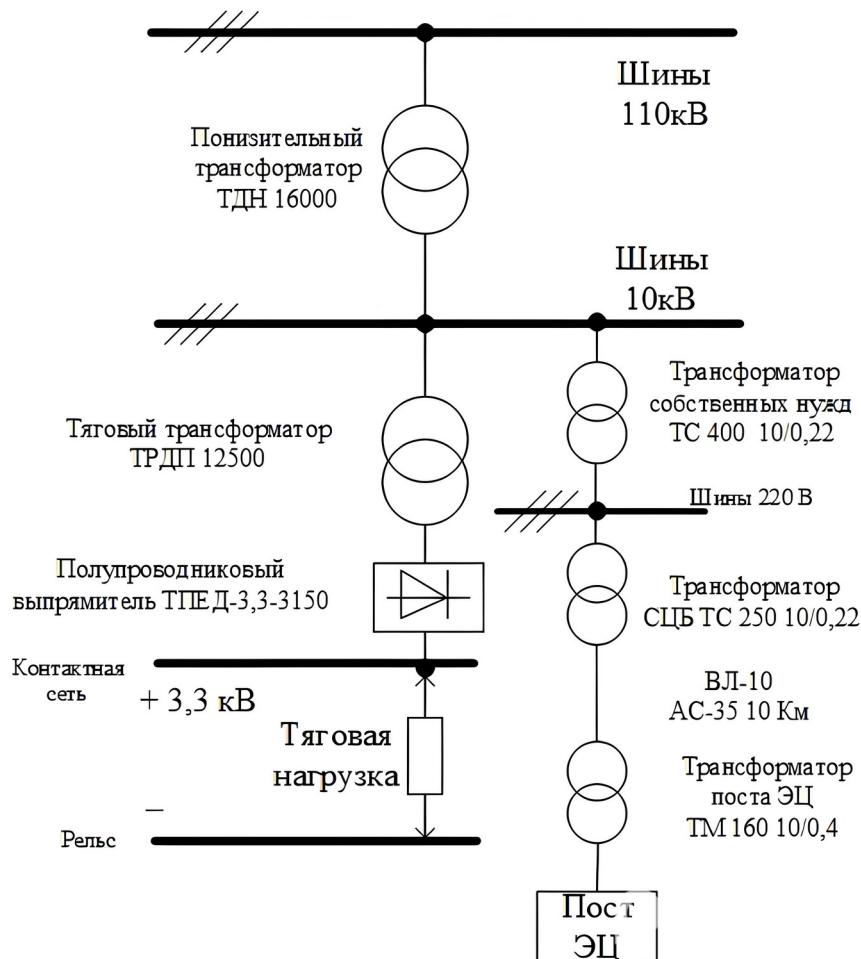


Рисунок 1 - Принципиальная однолинейная схема электроснабжения поста ЭЦ по линии ВЛ СЦБ на электрифицированных железных дорогах постоянного тока
 DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.155.105.1>

Натурные замеры

В ходе экспериментальных исследований, выполненных на ряде постов электрической централизации, характеризующихся наличием рассматриваемой проблемы, было выявлено, что наибольшее искажение кривой питающего напряжения, с увеличением доли высших гармоник частотами 550 и 650 Гц, наблюдается в моменты увеличения тяговой нагрузки на выпрямителе подстанции, от шин 6(10) кВ которой осуществлялось электроснабжение поста ЭЦ. Полученные результаты совпадают с выводами исследований, указанных в [2, С. 102], [3, С. 112–114].

Осциллограммы токов и напряжений, а также гармонический спектр напряжения, измеренные в точке подключения 0,4кВ поста ЭЦ, приведены на рисунках 2 и 3 соответственно.

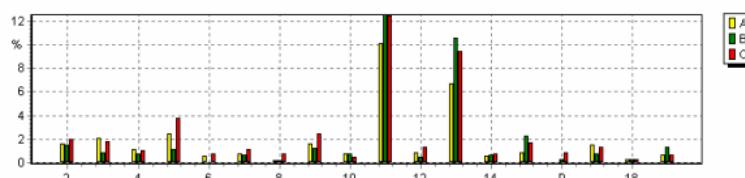


Рисунок 2 - Гармонический спектр питающего напряжения 0,4 кВ поста ЭЦ
 DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.155.105.2>

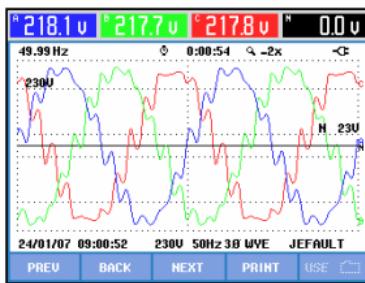


Рисунок 3 - Осциллограмма питающего напряжения 0,4 кВ поста ЭЦ

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.155.105.3>

Известно, что увеличение выпрямленного тока I_d (тока нагрузки) ведет к увеличению сетевого тока выпрямителя, приводящее к росту амплитуд гармоник тока, инжектируемых преобразователем в питающую сеть [4, С. 303]:

$$I_{1m(n)} = \frac{I_{1m(1)}}{n} \quad (1)$$

где:

$I_{1m(n)}$ – ток n -ой гармоники выпрямителя;

$I_{1m(1)}$ – ток основной гармоники выпрямителя, равной 50 Гц.

Спектр гармонических составляющих будет включать в себя гармоники, кратность которых выражается зависимостью от количества пульсаций выпрямленного напряжения за один период сетевого напряжения:

$$n = mk \pm 1 \quad (2)$$

где:

m – число пульсаций выпрямленного напряжения;

$k = 1, 2, 3, \dots$.

Таким образом, в кривой напряжения, питающего пост электрической централизации будут содержаться высшие гармонические составляющие, а в случае применения 12-ти пульсового выпрямителя, как в рассматриваемом случае, с порядковыми номерами 11, 13, 23, 25 и т.д. и возрастающими амплитудами по мере увеличения тока, потребляемого электроподвижным составом.

С учетом тенденции к повышению роста массы и количества поездов, что, в свою очередь, ведет к росту тяговой нагрузки, решение рассматриваемой проблемы электромагнитной совместимости приобретает дополнительную актуальность.

Известные пути решения проблемы

Увеличение пульсности выпрямителя ведет к улучшению его энергетических показателей, в том числе и к снижению уровня гармонических искажений в кривой питающего напряжения [5, С. 12–13]. Но полный перевод 6-ти и 12-ти пульсовых выпрямителей на 24-х пульсовые сопряжен с огромными экономическими затратами, включающими в себя замену, либо модернизацию выпрямительных агрегатов, а также замену тяговых преобразовательных трансформаторов, что сопряжено с огромными экономическими затратами, составляющими сотни миллионов рублей [6, С. 118].

Одним из современных и эффективных способов компенсации высших гармонических составляющих является установка активного фильтра гармоник (АФГ) со стороны питающей сети, непосредственно на вводных шинах потребителя. Данное устройство, вводя в сеть токи гармоник, равные по амплитуде, но противоположные по фазе гармоникам индуцированных нелинейной нагрузкой (в рассматриваемом случае – тяговым выпрямителем) компенсируют их, чем достигается высокий уровень качества электрической энергии, потребляемой непосредственно «защищаемым» потребителем. Однако высокая стоимость АФГ и способ подключения, при котором компенсация нелинейных искажений будет осуществляться только у одного потребителя электрической энергии, делает этот способ компенсации также существенно затратным [7, С. 320].

Для рассматриваемого случая, наиболее предпочтительным по уровню стоимости внедрения, а также ввиду превалирующего содержания в кривой напряжения всего двух гармонических составляющих 11-го и 13-го порядков, является вариант расчета и разработки пассивного фильтра, имеющего в своем составе емкость и индуктивность, создающих резонансные контуры для компенсации указанных гармоник.

Расчет параметров фильтра выполняется аналитическим метод с построением имитационной модели в целях анализа и оценки степени эффективности фильтра при рассматриваемой конфигурации системы электроснабжения поста электрической централизации.

Расчет параметров пассивного фильтра

Существуют несколько способов расчета параметров пассивного фильтра. В данном случае предлагается использовать метод последовательных приближений, подробно описанный в работе [8], для получения заданных частотных характеристик звеньев и требуемой реактивной мощности. Суть указанного метода заключается в рассмотрении фильтра как четырехполюсника, на внешних зажимах которого действуют источники гармоник. Для его описания используется уравнение в гибридных параметрах. На следующем шаге выполняется синтез данного

четырехполюсника и производится денормирование параметров фильтра по отношению к частоте основной гармоники [9].

Согласно данным, приведенным в [8, С. 21–22], расчет параметров реактивных элементов фильтра выполняется в два этапа. На первом этапе принимаются произвольные значения индуктивностей $L_{i(\text{нач})}$ (либо емкостей $C_{i(\text{нач})}$) звеньев. С учетом известного выражения резонансной частоты последовательного L-C контура:

$$f_p = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC}} \quad (3)$$

Индуктивность каждого звена, при выбранном значении емкости конденсаторов, будет определяться по следующей формуле:

$$L_{i(\text{нач})} = \frac{1}{C_{i(\text{нач})} (2\pi f_p)^2} \quad (4)$$

где:

$C_{i(\text{нач})}$ – принятное для расчет произвольное значение емкости звена, мкФ;

f_p – частота фильтруемой звеном гармоники, Гц.

Аналогично, из выражения (4) определяется емкость конденсаторов звена, в случае известного значения индуктивности $L_{i(\text{нач})}$:

$$C_{i(\text{нач})} = \frac{1}{L_{i(\text{нач})} (2\pi f_p)^2} \quad (5)$$

Второй этап расчета предполагает уточнение параметров реактивных элементов фильтра с целью достижения требуемых оптимальных значений потребляемой фильтром мощности.

Для этого из выражения (6) рассчитывается реактивная мощность, генерируемая фильтром, обладающим значениями параметров $C_{i(\text{нач})}$, $L_{i(\text{нач})}$, рассчитанными на первом этапе:

$$Q_\phi = \sum_{i=1}^m \frac{U_{\text{ном сети}}^2}{\frac{1}{2\pi f_0 C_i} - 2\pi f_0 L_i} \quad (6)$$

Следующим шагом является определение необходимого отношения K_Q реактивной мощности фильтра Q_ϕ к полученному на первом этапе значению $Q_{\phi(\text{нач})}$:

$$K_Q = \frac{Q_\phi}{Q_{\phi(\text{нач})}} \quad (7)$$

С учетом соотношения (7) рассчитываются окончательные значения индуктивности и емкости для каждого звена фильтра [8, С. 21–23]:

$$\begin{cases} L_i = \frac{L_{i(\text{нач})}}{K_Q} \\ C_i = K_Q C_{i(\text{нач})} \end{cases} \quad (8)$$

Исходя из приведенных выше выражений, в ходе расчета были получены следующие значения индуктивностей и емкостей для каждого звена фильтра, при различной проектируемой мощности фильтра:

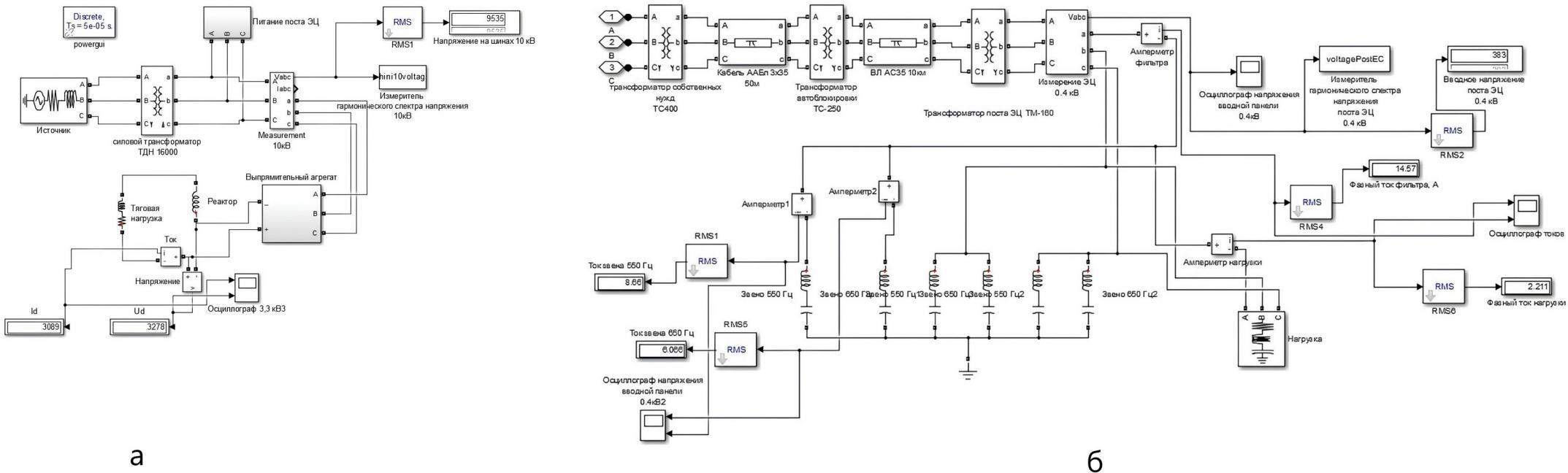
Таблица 1 - Рассчитанные параметры и мощность фильтра

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.155.105.4>

	1-ое звено	2-ое звено	1-ое звено	2-ое звено
L , мГн	0,67	0,6	3,47	3,11
C , мкФ	125	100	55	44
f_p , Гц	550	650	550	650
Q_ϕ , кВАр	20	20	8,7	8,7

Компьютерное моделирование

Модель тяговой подстанции и системы электроснабжения поста электрической централизации выполнены на основе типовых блоков из библиотеки Simscape/PowerSystems программной среды Matlab. Параметры блоков рассчитаны на основе методик приведенных в источниках [10], [11] и соответствуют параметрам реального оборудования, входящего в вышеуказанные системы. Подробно синтез используемой модели рассмотрен в предшествующей работе [12]. В качестве допущения, принимаем, что синусоидальное напряжение 110 кВ, питающее тяговую подстанцию, является симметричным. Помимо тягового выпрямителя, другие нелинейные нагрузки, влияющие на качество электрической энергии в реальных условиях, не учитываются. Блок-схема модели приведена на рисунке 4.



а

б

Рисунок 4 - Блок-схема модели тяговой подстанции (а) и подсистемы, имитирующей линию электроснабжения поста ЭЦ (б)
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.155.105.5>

Для оценки степени снижения суммарного коэффициента гармонических составляющих K_i , в иностранной литературе именуемого как THD (Total Harmonic Distortion), моделирование включало в себя режимы, характеризующиеся следующими условиями:

1. Ток нагрузки выпрямителя равен 10% от номинального 3150 А, пассивный фильтр не подключен.
2. Ток нагрузки выпрямителя равен 90% от номинального 3150 А, пассивный фильтр не подключен.
3. Ток нагрузки выпрямителя равен 90% от номинального 3150 А, пассивный фильтр подключен к вводной панели 0,4 кВ поста ЭЦ, реактивная мощность фильтра принята равной 20 кВАр.
4. Ток нагрузки выпрямителя равен 90% от номинального 3150 А, пассивный фильтр подключен к вводной панели 0,4 кВ поста ЭЦ, реактивная мощность фильтра принята равной 8,7 кВАр.

На рисунках 5-8 приведены диаграммы, демонстрирующие спектральный состав напряжения 0,4 кВ, питающего пост ЭЦ при моделировании в различных режимах, и осциллограммы визуально свидетельствующие о степени искажения кривой напряжения. В таблице 2 приведены сравнительные результаты проведенного моделирования.

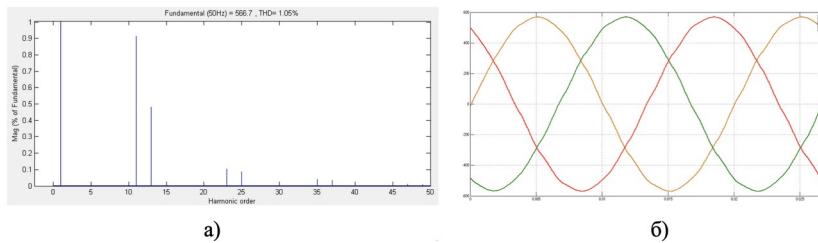


Рисунок 5 - Результат проведенного моделирования в первом режиме:

а) спектральный состав; б) кривые напряжения 0,4 кВ

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.155.105.6>

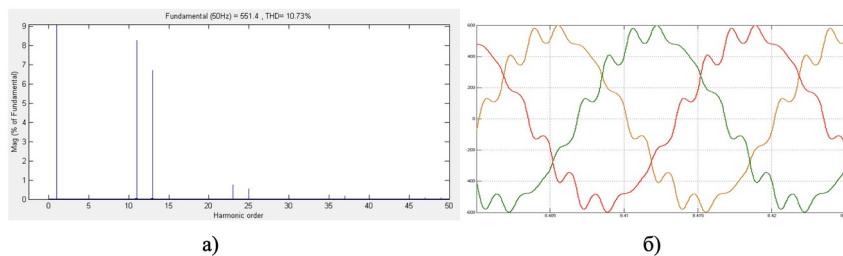


Рисунок 6 - Результат проведенного моделирования во втором режиме:

а) спектральный состав; б) кривые напряжения 0,4 кВ

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.155.105.7>

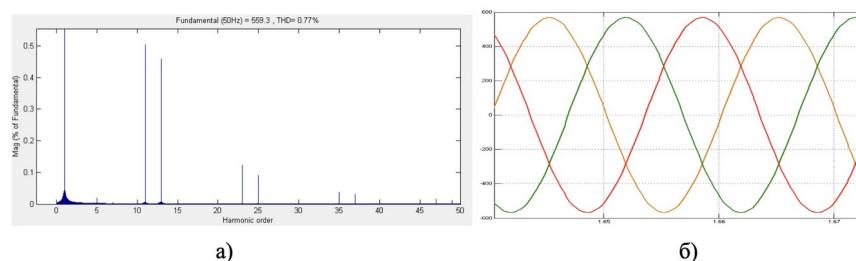


Рисунок 7 - Результат проведенного моделирования в третьем режиме:

а) спектральный состав; б) кривые напряжения 0,4 кВ

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.155.105.8>

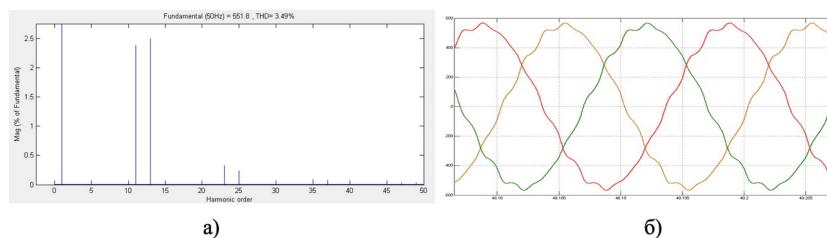


Рисунок 8 - Результат проведенного моделирования в четвертом режиме:

a) спектральный состав; б) кривые напряжения 0,4 кВ

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.155.105.9>

Таблица 2 - Сравнительные результаты моделирования

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.155.105.10>

Реактивная мощность фильтра Q_ϕ , кВАр	Выпрямленный ток нагрузки выпрямителя I_d , А	Значения коэффициентов гармонических составляющих	
		$K_{U(11)}$, %	$K_{U(13)}$, %
-	315	0,92	0,54
-	2835	8,3	6,8
20	2835	0,51	0,46
8,7	2835	2,4	2,5

В результате исследования на основе имитационной модели, были получены следующие данные:

- Спектральный состав напряжения 0,4 кВ в точке подключения поста ЭЦ, включает в себя гармоники 11, 13, 23, 25 и т.д. порядков, являющимися каноническими для 12-ти пульсовой схемы выпрямления и обусловлены электромагнитным влиянием полупроводникового преобразователя тяговой подстанции.
- Увеличение тока нагрузки выпрямителя с 10% до 90% от номинального тока ведет к повышению как суммарного коэффициента гармонических искажений (THD) с 1,05% до 10,73%, так и отдельных коэффициентов гармонических составляющих 11 и 13 порядков до 8,3% и 6,8% соответственно, что превышает требования ГОСТ [13] (таб. 1).

3. Применение двухзвенного сглаживающего фильтра для компенсации 11-ой и 13-ой гармоник напряжения, при реактивной мощности фильтра равной 20 кВАр позволяет снизить значение THD до 0,77%.

Эффективность фильтра при его реактивной мощности 8,7 кВАр оказывается несколько ниже. В таком случае значение THD становится равным 3,49%

Заключение

На основе проведенного исследования с помощью средств имитационного моделирования возможно сделать следующие выводы:

1. Увеличение тока нагрузки выпрямителя ведет к существенному искажению кривой питающего напряжения, что, в свою очередь, сказывается на качестве электрической энергии потребляемой нетяговыми потребителями подстанций, в частности, постами ЭЦ. С учетом несимметрии и несинусоидальности напряжения в сети, а также эксплуатацией 6-ти пульсовых выпрямителей, генерирующих в сеть гармоники с частотами 250 и 350 Гц, в реальных условиях показатели качества электрической энергии могут быть ниже, чем при проведенном исследовании. Также необходимо отметить, что ВЛ 6(10) кВ, питающие нетяговые потребители, представляют собой линии с распределенными параметрами, что при сочетании определенных условий, может быть причиной возникновения резонансных режимов и усиления отдельных гармоник [14]. В связи с чем при опытном проектировании и внедрении рассматриваемого типа сглаживающего фильтра следует учитывать указанные выше факторы.

2. Эффективность сглаживающего фильтра прямо зависит от его реактивной мощности. С ростом мощности фильтра, а соответственно и его стоимостью, суммарный коэффициент гармонических искажений напряжения в точке присоединения снижается. Окончательный выбор мощности фильтра необходимо делать из экономической целесообразности и требуемого уровня качества электрической энергии в точке установки фильтра.

3. На основе приведенной в статье имитационной модели возможно прогнозировать эффективность внедрения и предварительный расчет пассивных фильтров гармоник при различных параметрах влияющего оборудования на качество электрической энергии потребляемой нетяговыми потребителями в границах электрифицированных железных дорог постоянного тока.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Сообщество рецензентов Международного научно-исследовательского журнала
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.155.105.11>

Conflict of Interest

None declared.

Review

International Research Journal Reviewers Community
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.155.105.11>

Список литературы / References

1. Правила устройства электроустановок. — 7-е изд. — Москва, 2013. — 608 с.
2. Ковалева Т.В. Прогнозирование показателей качества электроэнергии в системах электроснабжения железных дорог / Т.В. Ковалева, А.А. Комяков, О.О. Комякова [и др.] // Известия Транссиба. — 2024. — № 3(59). — С. 45–52.
3. Барковский Б.С. Двенадцатипульсовые полупроводниковые выпрямители тяговых подстанций / Б.С. Барковский, В.П. Маценко, М.Г. Шалимов [и др.]; под ред. М.Г. Шалимова. — Москва : Транспорт, 1990. — 126 с.
4. Бурков А.Т. Электронная техника и преобразователи: учебник для вузов железнодорожного транспорта / А.Т. Бурков. — Москва : Транспорт, 1999. — 464 с.
5. Салита Е.Ю. Обоснование внедрения двенадцатипульсовых выпрямителей последовательного типа в системе электроснабжения метрополитена / Е.Ю. Салита, Т.В. Ковалева, Т.В. Комякова // Известия Транссиба. — 2020. — № 1(41). — С. 34–42.
6. Салита Е.Ю. Улучшение показателей энергетической эффективности многопульсовых выпрямителей тяговых подстанций / Е.Ю. Салита, Т.В. Ковалева, Т.В. Комякова // Известия Транссиба. — 2017. — № 3(31). — С. 28–35.
7. Клюев Р.В. Повышение качества электроэнергии на промышленных предприятиях за счет применения активного фильтра гармоник / Р.В. Клюев, И.И. Босиков, О.А. Гаврина [и др.] // Известия ТулГУ. Науки о Земле. — 2022. — № 2. — С. 56–64.
8. Боярская Н.П. Синтез фильтрокомпенсирующих устройств для систем электроснабжения / Н.П. Боярская, В.П. Довгун, Д.Э. Егоров [и др.]; под ред. В.П. Довгуна. — Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2014. — 192 с.
9. Атаманов М.Н. Расчёт параметров и анализ работы пассивного фильтра гармоник / М.Н. Атаманов, Н.М. Дрей, А.Г. Зиганшин [и др.] // Вестник Чувашского университета. — 2020. — № 1. — С. 17–25.
10. Новаш И.В. Расчет параметров модели трехфазного трансформатора из библиотеки MatLab-Simulink с учетом насыщения магнитопровода / И.В. Новаш, Ю.В. Румянцев // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. — 2015. — № 1. — С. 12–24.
11. Герасимук А.В. Расчёт параметров схемы замещения трансформаторов с расщеплённой обмоткой с учётом устройства регулирования напряжения под нагрузкой в обмотке высшего напряжения / А.В. Герасимук, И.Ю. Семёкина, М.В. Кипервассер // Горное оборудование и электромеханика. — 2019. — № 2(142). — С. 52–59.
12. Стишенко К.П. Имитационное моделирование влияния тяговых нагрузок на качество питающего напряжения нетяговых потребителей в районах угледобычи / К.П. Стишенко, М.В. Кипервассер, А.В. Герасимук [и др.] // Наукометрические технологии разработки и использования минеральных ресурсов. — 2023. — № 9. — С. 280–286.
13. ГОСТ 32144-2013. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. — Введ. 2014-07-01. — Москва : Стандартинформ, 2014. — 23 с.
14. Ковалева Т.В. Резонансные явления в трехфазных линиях электропередачи, питающих нетяговые потребители железнодорожного транспорта / Т.В. Ковалева, А.А. Комяков, О.О. Комякова [и др.] // Транспорт Урала. — 2023. — № 3(78). — С. 109–114.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Pravila ustrojstva elektrostanovok [Rules for Electrical Installations]. — 7th ed. — Moscow, 2013. — 608 p. [in Russian]
2. Kovaleva T.V. Prognozirovanie pokazatelej kachestva elektroenergii v sistemah elektrosnabzheniya zheleznyh dorog [Forecasting power quality indicators in railway power supply systems] / T.V. Kovaleva, A.A. Komyakov, O.O. Komyakova [et al.] // Izvestiya Transsiba [Transsib News]. — 2024. — № 3(59). — P. 45–52. [in Russian]
3. Barkovskij B.S. Dvenadcatipul'sovye poluprovodnikovye vypryamiteli tyagovyh podstancij [Twelve-pulse semiconductor rectifiers for traction substations] / B.S. Barkovskij, V.P. Macenko, M.G. Shalimov [et al.]; ed. by M.G. Shalimov. — Moscow : Transport, 1990. — 126 p. [in Russian]
4. Burkov A.T. Elektronnaya tekhnika i preobrazovateli: uchebnik dlya vuzov zheleznodorozhного transporta [Electronic equipment and converters: textbook for railway transport universities] / A.T. Burkov. — Moscow : Transport, 1999. — 464 p. [in Russian]
5. Salita E.Yu. Obosnovanie vnedreniya dvenadcatipul'sovyh vypryamitelej posledovatelnogo tipa v sisteme elektrosnabzheniya metropolitena [Justification for implementing series-type twelve-pulse rectifiers in metro power supply systems] / E.Yu. Salita, T.V. Kovaleva, T.V. Komyakova // Izvestiya Transsiba [Transsib News]. — 2020. — № 1(41). — P. 34–42. [in Russian]
6. Salita E.Yu. Uluchshenie pokazatelej energeticheskoy effektivnosti mnogopol'sovyh vypryamitelej tyagovyh podstancij [Improving energy efficiency indicators of multi-pulse rectifiers at traction substations] / E.Yu. Salita, T.V. Kovaleva, T.V. Komyakova // Izvestiya Transsiba [Transsib News]. — 2017. — № 3(31). — P. 28–35. [in Russian]
7. Klyuev R.V. Povyshenie kachestva elektroenergii na promyshlennyyh predpriyatiyah za schet primeneniya aktivnogo filtra garmonik [Improving power quality at industrial enterprises through the use of active harmonic filters] / R.V. Klyuev, I.I.

Bosikov, O.A. Gavrina [et al.] // Izvestiya TulGU. Nauki o Zemle [Tula State University News. Earth Sciences]. — 2022. — № 2. — P. 56–64. [in Russian]

8. Sintez fil'trokompensiruyushchih ustrojstv dlya sistem elektrosnabzheniya [Synthesis of filter-compensating devices for power supply systems] / N.P. Boyarskaya, V.P. Dovgun, D.E. Egorov [et al.]; ed. by V.P. Dovgun. — Krasnoyarsk : Siberian Federal University, 2014. — 192 p. [in Russian]

9. Atamanov M.N. Raschet parametrov i analiz raboty passivnogo filtra garmonik [Calculation of parameters and analysis of passive harmonic filter operation] / M.N. Atamanov, N.M. Drej, A.G. Ziganshin [et al.] // Vestnik Chuvashskogo universiteta [Chuvash University Bulletin]. — 2020. — № 1. — P. 17–25. [in Russian]

10. Novash I.V. Raschet parametrov modeli trehfaznogo transformatora iz biblioteki MatLab-Simulink s uchetom nasyshcheniya magnitoprovoda [Calculation of parameters for a three-phase transformer model from MatLab-Simulink library considering core saturation] / I.V. Novash, Yu.V. Rumyancev // Energetika. Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij i energeticheskikh ob"edinenij SNG [Power Engineering. News of Higher Educational Institutions and Power Associations of CIS]. — 2015. — № 1. — P. 12–24. [in Russian]

11. Gerasimuk A.V. Raschet parametrov shemy zameshcheniya transformatorov s rasshcheplennoj obmotkoj s uchetom ustrojstva regulirovaniya napryazheniya pod nagruzkoj v obmotke vysshego napryazheniya [Calculation of equivalent circuit parameters for transformers with split winding considering on-load tap changer in HV winding] / A.V. Gerasimuk, I.Yu. Semykina, M.V. Kipervasser // Gornoe oborudovanie i elektromekhanika [Mining Equipment and Electromechanics]. — 2019. — № 2(142). — P. 52–59. [in Russian]

12. Stishchenko K.P. Imitacionnoe modelirovaniye vliyaniya tyagovyh nagruzok na kachestvo pitayushchego napryazheniya netyagovyh potrebitelej v rajonah ugledobychi [Simulation modeling of traction loads impact on power supply quality for non-traction consumers in coal mining areas] / K.P. Stishchenko, M.V. Kipervasser, A.V. Gerasimuk [et al.] // Naukoyomkie tekhnologii razrabotki i ispol'zovaniya mineral'nyh resursov [High Technologies in Mineral Resources Development and Use]. — 2023. — № 9. — P. 280–286. [in Russian]

13. GOST 32144-2013. Normy kachestva elektricheskoy energii v sistemah elektrosnabzheniya obshchego naznacheniya [Power quality standards in general purpose power supply systems]. — Effective 2014-07-01. — Moscow : Standartinform, 2014. — 23 p. [in Russian]

14. Kovaleva T.V. Rezonansnye yavleniya v trehfaznyh liniyah elektroperedachi, pitayushchih netyagovyh potrebitelej zheleznodorozhnogo transporta [Resonance phenomena in three-phase power lines supplying railway non-traction consumers] / T.V. Kovaleva, A.A. Komyakov, O.O. Komyakova [et al.] // Transport Urala [Ural Transport]. — 2023. — № 3(78). — P. 109–114. [in Russian]