





Студенту Метелеву Вадиму Александровичу

(фамилия, имя, отчество)

Группа ОЗ-11

Специальность 13.04.02 Электроэнергетика и электротехника

(код)

(наименование)

Тема выпускной квалификационной работы Анализ изменения уровней напряжения на шинах подключения ФКУ при отклонении их настройки

Утверждена приказом по институту № 682 от 29.09.2021

Руководитель ВКР Платонова Е. В., доцент кафедры «электроэнергетика»

(инициалы, фамилия, должность и место работы)

Исходные данные для дипломного ВКР: отчет о проведенном энергетическом обследовании потребителя.

Перечень разделов дипломного проекта:

#### ВВЕДЕНИЕ

1. Характеристика объекта исследования;
2. Анализ инструментальных замеров на ПС «Майрыхская»;
3. Матемматическая модель для расчета частотной характеристики

входного сопротивления;

4. Анализ ЧХ входного сопротивления узла нагрузки с одним фильтровым звеном;

5. Анализ ЧХ входного сопротивления узла нагрузки с двумя фильтровымм звеньями;

6. Анализ изменения напряжения на шинах подключения нагрузки;

7. Анализ усиления входного сопротивления по отношению к начальному значению;

7.1. Анализ изменения гармонических составляющих напряжения с другим сопротивлением фильтров;

8. Анализ влияния гармонических составляющих напряжения на шинах подключения нагрузки на его величину;

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Список использованных источников

Руководитель ВКР

\_\_\_\_\_ / Е. В. Платонова

(подпись, инициалы и фамилия)

Задание принял к исполнению

\_\_\_\_\_ / В. А. Метелев

(подпись, инициалы и фамилия студента)

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2021 г.

## РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа по теме «Анализ изменения уровней напряжения на шинах подключения ФКУ при отклонении их настройки» содержит 55 страницы текстового документа, 54 использованных источника, 33 рисунков, 31 таблиц, приложений нет.

НАПРЯЖЕНИЕ НА ШИНАХ, УПРАВЛЕНИЕ, КАЧЕСТВО ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ, АНАЛИЗ, РЕГУЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ, КОМПЕНСИРОВАНИЕ, ГАРМОНИКИ.

Объект исследования – ПС «Майрыхская».

Методы исследования – анализ режимов работы объекта, математическое моделирование входного сопротивления системы электроснабжения объекта.

Цель выпускной квалификационной работы – предложить метод и диапазон регулирования параметров фильтрокомпенсирующего устройства в СЭС нелинейной, резкопеременной нагрузкой.

Исходя из поставленной цели, необходимо решить следующие задачи,

1. Разработка математической модели для расчета частотной характеристики входного сопротивления узла нагрузки;
2. С использованием математической модели проведение числовых экспериментов по определению диапазона регулирования реактивной мощности фильтровых звеньев;
3. Выбор критериев управления параметрами ФКУ;
4. Выбор алгоритма и устройств регулирования мощности фильтровых звеньев ФКУ;

Предмет исследования – поиск факторов и технических условий, влияющих на изменение уровня напряжения, на шинах подключения ФКУ.

Результатом настоящей магистерской диссертации являются обоснованные решения, которые помогут подбирать оптимальную настройку ФКУ, для компенсации реактивной мощности и гармоник в сети, а также возможные варианты влияния характеристик на напряжение, на шинах подключения ФКУ и способы его регулирования.

## **ABSTRACT**

The final qualifying work on the topic “Analysis of changes in voltage levels on the connection buses of PKUs when their settings deviate” contains 54 pages of a text document, 54 used sources, 33 figures, 31 tables, no appendices.

**BUS VOLTAGE, CONTROL, ELECTRIC POWER QUALITY, ANALYSIS, VOLTAGE REGULATION, COMPENSATION, HARMONICS.**

The object of the study is the Mayrykhskaya substation.

Research methods - analysis of the operating modes of the facility, mathematical modeling of the input resistance of the facility's power supply system.

The purpose of the final qualifying work is to propose a method and range for regulating the parameters of a filter compensating device in a solar power plant with a nonlinear, sharply variable load.

Based on the goal, it is necessary to solve the following tasks:

1. Development of a mathematical model for calculating the frequency response of the input resistance of the load node;
2. Using a mathematical model, conducting numerical experiments to determine the range of regulation of the reactive power of filter units;
3. Selection of criteria for managing PKU parameters;
4. Selection of the algorithm and devices for regulating the power of the filter units of the PKU;

The subject of the study is the search for factors and technical conditions that influence changes in the voltage level on the connection buses of the PKU.

The result of this master's thesis is informed decisions that will help select the optimal setting of the PKU to compensate for reactive power and harmonics in the network, as well as possible options for the influence of characteristics on the voltage on the PKU connection buses and methods of its regulation.

## Содержание

ВВЕДЕНИЕ.....	6
1 Характеристика объекта исследования .....	9
2 Анализ инструментальных замеров на ПС «Майрыхская».....	10
3 Математическая модель для расчета частотной характеристики входного сопротивления .....	13
4 Анализ ЧХ входного сопротивления узла нагрузки с одним фильтровым звеном .....	15
5 Анализ ЧХ входного сопротивления узла нагрузки с двумя фильтровыми звеньями .....	22
6 Анализ изменения напряжения на шинах подключения нагрузки.....	26
7 Анализ усиления входного сопротивления по отношению к начальному значению .....	36
7.1 Анализ изменения гармонических составляющих напряжения с другим сопротивлением фильтров .....	40
8 Анализ влияния гармонических составляющих напряжения на шинах подключения нагрузки на его величину .....	44
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	48
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ .....	49

## ВВЕДЕНИЕ

Нелинейная нагрузка является неотъемлемым элементом современных промышленных систем электроснабжения, а также основным источником высших гармоник, которые приводят к несоответствию уровня качества электрической энергии нормам отечественного и международных стандартов. Данная особенность характерна практически для всех отраслей промышленности, включая угольную, где присутствуют системы регулируемого электропривода технологических установок и комплексов. [25]

Высшие гармоники тока и напряжения несут в себе ряд негативных последствий для элементов систем электроснабжения, включая дополнительные потери в воздушных и кабельных линиях, силовых трансформаторах, сокращение срока службы электрооборудования, некорректную работу релейной защиты, дополнительную вибрацию в электромеханических системах. [17]

Фильтрокомпенсирующие устройства предназначены для компенсации реактивной мощности в сетях с нелинейной нагрузкой. Они выполняют две функции:

1. Повышение  $\cos\varphi$ ;
2. Снижение уровня высших гармоник в сети;

Однако, применение фильтрокомпенсирующих устройств в сетях с резкопеременной нагрузкой должно сопровождаться регулированием их мощности согласно графику нагрузки. Реактивная мощность, выдаваемая фильтровыми звеньями, определяется соотношением параметров фильтров (индуктивным и емкостным сопротивлением фильтра). Но изменение параметров ведет и к изменению частотной характеристики входного сопротивления на шинах подключения нагрузки. При этом возможно попадание частотной характеристики на канонические гармоники, присутствующие в спектре тока источника гармоник. Это вызовет резонансные усиления соответствующих гармоник напряжения.

Усиления напряжения при определенных условиях могут быть недопустимыми и не только вызовут выход из строя не только самих фильтров, но и повышение потерь от протекания токов высших гармоник, сокращение сроков службы изоляции и другие неблагоприятные происшествия.

Исходя из выше сказанного, следует, что целесообразно при установке фильтрокомпенсирующих устройств предварительно провести анализ условий их предполагаемой работы.

В диссертационной работе разработана **методика** и составлена математическая модель для анализа условий работы фильтрокомпенсирующего устройства. Методика и модель опробованы на примере реального промышленного объекта, нагрузка которого является резкопеременной, нелинейной и требует в определенные периоды времени подключения устройств компенсации реактивной мощности с целью повышения коэффициента мощности ( $\cos\varphi$ ) в сети.

**Целью** магистерской диссертации является разработка методики и определение диапазона регулирования параметров фильтрокомпенсирующего устройства в СЭС нелинейной, резкопеременной нагрузкой.

Исходя из поставленной цели, необходимо решить следующие **задачи**,

1. Разработка математической модели для расчета частотной характеристики входного сопротивления узла нагрузки.
2. Проведение с использованием математической модели числовых экспериментов по определению диапазона регулирования реактивной мощности фильтровых звеньев.
3. Выбор критериев управления параметрами ФКУ.
4. Выбор алгоритма и устройств регулирования мощности фильтровых звеньев ФКУ.

**Объектом исследования** является ПС «Майрыхская» с резкопеременной и нелинейной нагрузкой.

**Научная новизна.** Предложена математическая модель, которая позволяет более точно и эффективно оценивать влияние отклонений параметров фильтровых звеньев на уровни напряжения на шинах подключения нагрузки. Построены частотные характеристики, на основе которых были определены диапазоны регулирования реактивной мощности фильтровых звеньев. Сформулировано правило выбора числа и мощности фильтровых звеньев.

**Практическая значимость.** Представленная в работе модель позволяет улучшить надежность и стабильность работы систем управления. Улучшенная методология анализа позволит оперативно выявлять потенциальные проблемы и предпринимать меры по их предотвращению, что в конечном итоге повысит безопасность и эффективность соответствующих систем. Предложенная методика управления параметрами ФКУ может быть использована на любых предприятиях с нелинейной, резкопеременной нагрузкой.

**Апробация работы.** Опубликована статья «Применение фильтрокомпенсирующих устройств для повышения качества напряжения угольных разрезов» в журнале «Международный научно-исследовательский журнал» — 2023 — №8 (Журнал ВАК). Основные результаты были представлены в 2022 году на XVIII Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Перспективны Свободный – 2022», в секции «Интеллектуальные энергетические системы в промышленности». Награжден сертификатом очного участия. Научная статья была опубликована в материалах XVIII Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Перспективны Свободный – 2022». Основные результаты также были представлены в 2023 году на XIX Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Перспективны Свободный 2023», в секции «Интеллектуальные энергетические системы в промышленности». Награжден сертификатом заочного участия. Научная статья на тему «Расчет и принцип



выбора фильтрокомпенсирующего устройства» была опубликована в Материалах XIX Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Перспектив – 2023».

## 1 Характеристика объекта исследования

В качестве объекта исследования было выбрано ООО «УК «Разрез Майрыхский». Это российская угледобывающая компания, производящая добычу угля в Бейском каменноугольном месторождении Республики Хакасия.

Нагрузка данного предприятия является резкопеременной, нелинейной и требует в определенные периоды времени подключения устройств компенсации реактивной мощности с целью улучшения коэффициента мощности ( $\cos\phi$ ) в сети. Сведения о наиболее мощных нагрузках представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Сведения об электрических нагрузках основного производства

Оборудование	Тип/марка	Количество часов работы оборудования, в год	Установленная мощность, МВт
1	2	4	5
Установка сухого обогащения	FGX48A	4320	1,301
Зумпф.№1 насос	1д-630-90	8760	0,206
Зумпф.№1 насос	1д-630-90	8760	0,206
Зумпф.№2 насос	1д-630-90	8760	0,206
Зумпф.№2 насос	1д-630-90	8760	0,206
Очистные сооружения насос 1	1д-630-90	8760	0,206
Очистные сооружения насос 2	1д-630-90	8760	0,206
Установка сухого обогащения	FGX12	6350	0,41
Установка Дробильно Сортировочная	Дробмаш	7782	0,11
АБК	-	-	0,27

С целью компенсации реактивной мощности на ГПП предприятия ПС «Майрыхская» установлены комплекты фильтрокомпенсирующие устройства с напряжением 10 кВ со ступенчатым автоматическим регулированием реактивной мощности. Сведения об ФКУ приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Сведения об устройствах компенсации реактивной мощности

№ п/п	Место установки	Тип	Кол-во	Общая мощность, кВар
1	2	3	4	5
1	КРУНН-1 10 кВ	УКРМФ-10,5-350-100 УХЛ4	1	350
2	КРУНН-2 10 кВ	УКРМФ-10,5-600-100 УХЛ4	1	600
ИТОГО			2	950

ФКУ не работает постоянно, а включается в определенные моменты времени.

## 2 Анализ инструментальных замеров на ПС «Майрыхская»

На ПС «Майрыхская» были выполнены инструментальные замеры показателей качества электроэнергии.

Используемая аппаратура:

1. Прибор для измерений показателей качества электрической энергии и электроэнергетических величин «РЕСУРС UF 2M0».

На рисунках 1-3 представлены результаты проведенных замеров.

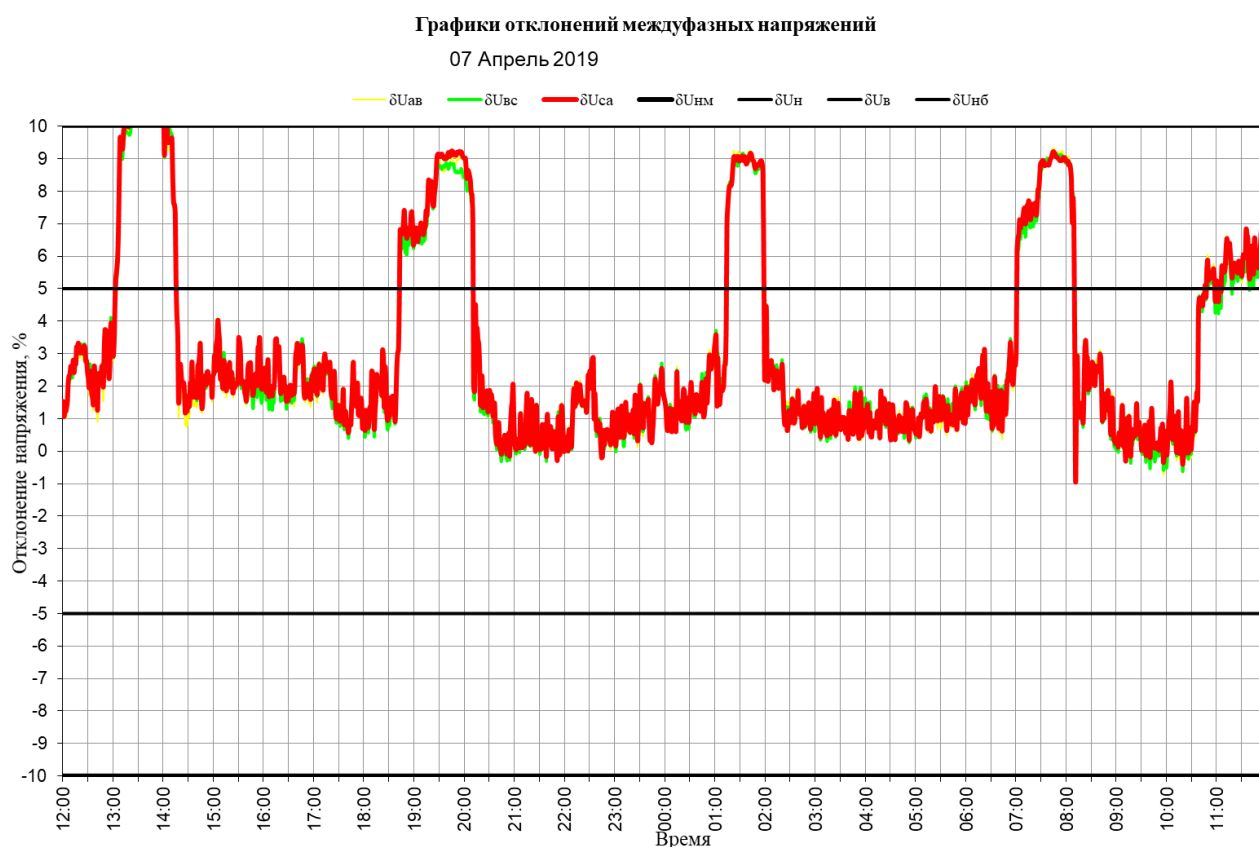


Рисунок 1 – Отклонение междуфазных напряжений

По рисунку 1 можно увидеть, что отклонения напряжения происходят преимущественно в часы перерывов в работе (пересменок персонала и обеденных перерывов). Чаще всего эти перепады напряжения вызываются одновременным включением или отключением мощного электрооборудования. Мелкие скачки напряжения, которые мы видим на всем графике, объясняются включением не слишком мощных, но энергоемких электроприборов.

Графики активной и реактивной трехфазной мощности

07 Апрель 2019

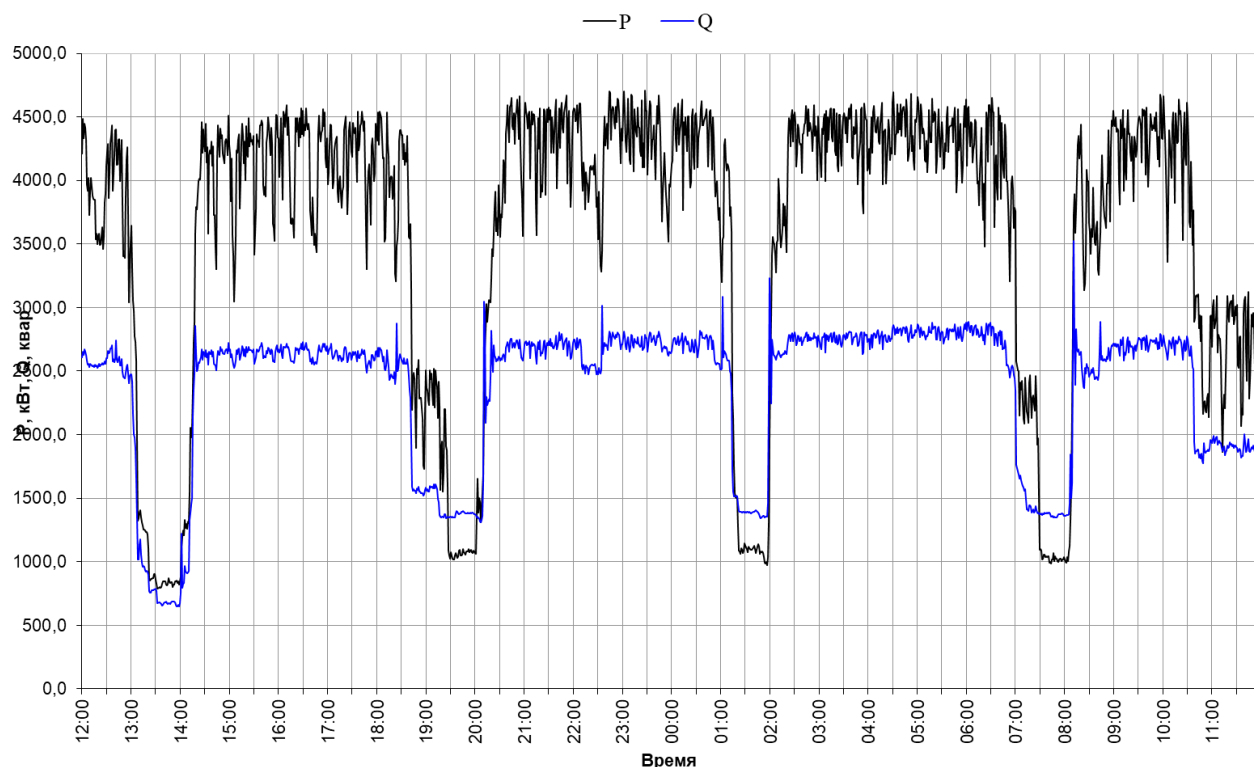


Рисунок 2 – Активная и реактивная трехфазные мощности

По рисунку 2 видно, что значительные колебания активной и реактивной мощностей происходят в те же промежутки времени, что и просадки напряжения. Это показывает прямую взаимосвязь напряжения от потребляемой мощности. Коэффициент мощности в указанные промежутки времени, также существенно меняется (от 0,4 до 0,84). То есть коэффициент мощности в целом является достаточно низким.

### Коэффициенты $n$ -ых гармонических составляющих напряжения $U_{ав}$

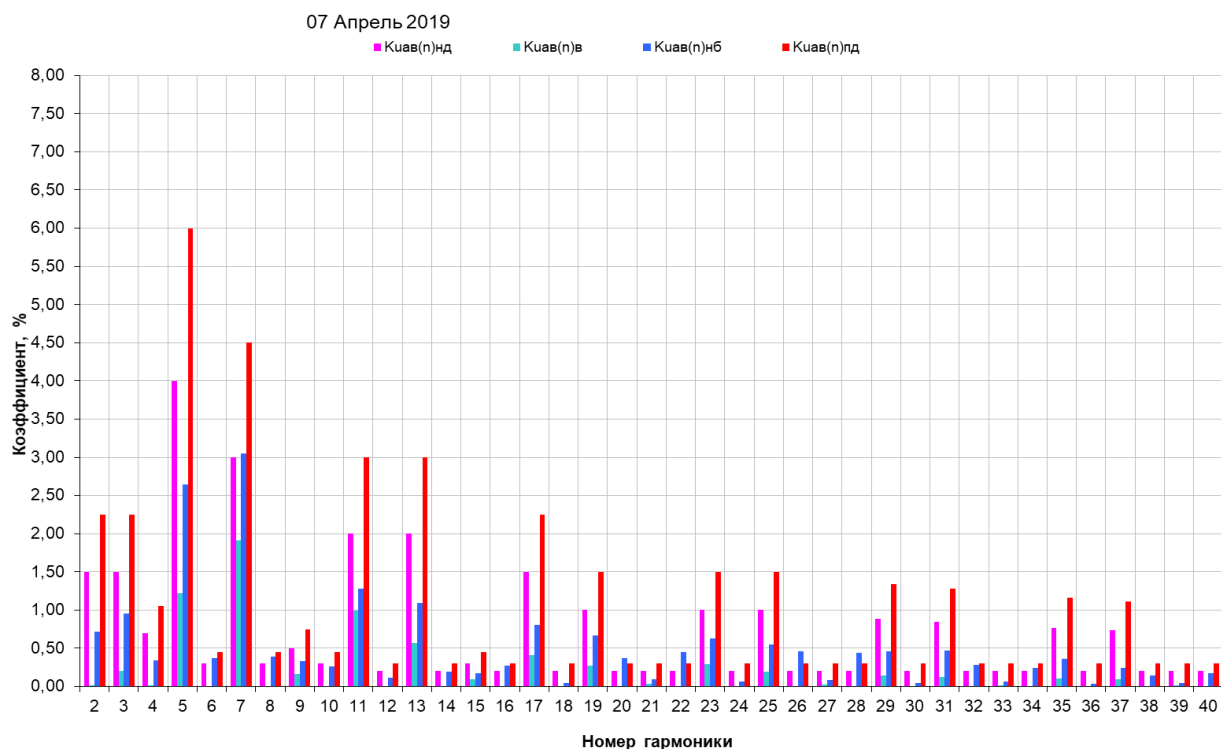


Рисунок 3 – Гармонический состав напряжения

Таким образом, на подстанции целесообразно подключение устройств компенсации реактивной мощности, мощность которых при резкопеременной нагрузке должна регулироваться. Учитывая, что нагрузка является резкопеременной, с целью компенсации реактивной мощности следует подключать ФКУ. Помимо того, что оно компенсирует реактивную мощность, тем самым выравнивая уровень напряжения, оно также фильтрует гармонические составляющие токов и напряжений сети. ФКУ будет корректно работать при условии точной настройки его фильтровых звеньев на гармоники, присутствующие в его спектре токов и напряжений нагрузки. Неправильная настройка ФКУ может вызвать резонансное усиление других гармоник. Это можно отследить путем анализа частотной характеристики входного сопротивления сети на шинах подключения нагрузки. [26]

### 3 Математическая модель для расчета частотной характеристики входного сопротивления

Математическая модель составлена, применительно к узлу сети, включающему в себя источник питания, линии связи и ПС «Майрыхская». Упрощенная однолинейная схема и схема замещения представлены на рисунке 4 (а, б).

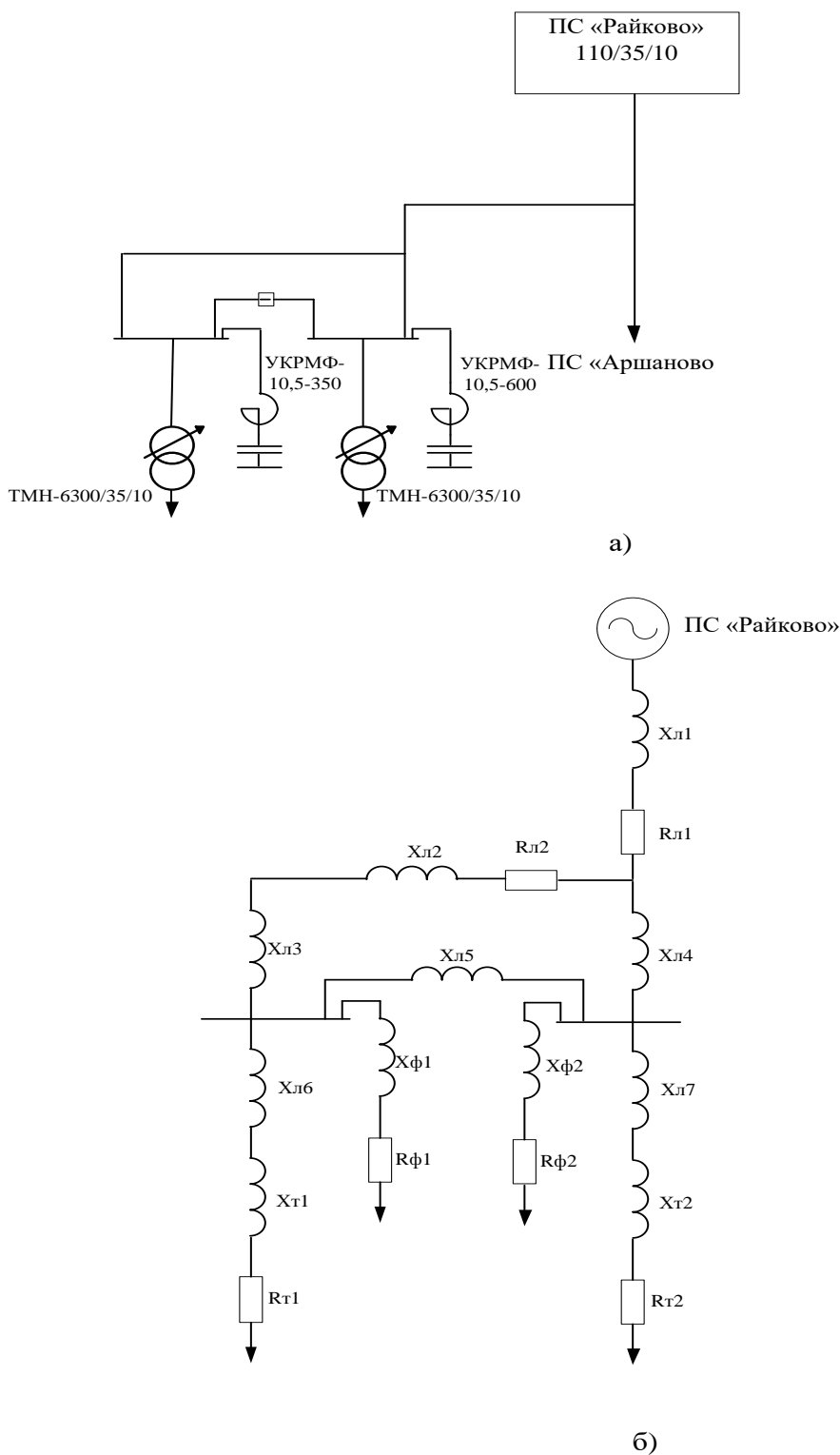


Рисунок 4 – Оперативная (а) и схема замещения (б)

В соответствии со схемами, представленными на рисунке 4, определены параметры схемы замещения указанные в таблице 3.

Таблица 3 – Параметры схемы замещения

$X_{\text{линии}}, \text{ Ом}$	$X_{\text{тр-ра}}, \text{ Ом}$	$X_{\text{сети}}, \text{ Ом}$	$X_{\text{реакт. 5ф}}, \text{ Ом}$	$X_{\text{реакт. 7ф}}, \text{ Ом}$
3,32	2,6	5,09	12,6	7,04

Получим формулу для расчета частотной характеристики входного сопротивления сети при подключении на шины 10 кВ незащищенные реактором КБ. Формула имеет вид:

В случае подключения на шины 10 кВ незащищенной реактором конденсаторной батареи (КБ) формула для расчета входного сопротивления имеет вид:

$$X_{\text{вх}}(\nu) = \frac{X_{\text{сети}} * X_{\text{КБ}} * \nu}{X_{\text{сети}} * \nu^2 - X_{\text{КБ}}} \quad (3.1)$$

Где:

$X_{\text{сети}}$  – сопротивление сети;

$X_{\text{КБ}}$  – сопротивление конденсаторной батареи;

$\nu$  – номер гармоники;

$$X_{\text{сети}} = \sum X_{\text{тр-ов}} + X_{\text{линии}} + X_{\text{системы}} * K_T \quad (3.2)$$

Где:

$\sum X_{\text{тр-ов}}$  – сопротивление трансформаторов;

$X_{\text{линии}}$  – сопротивление линии;

$X_{\text{системы}}$  – сопротивление системы;

$K_T$  – коэффициент трансформации;

В случае подключения на шины 10 кВ одного фильтрового звена ФКУ, настроенного на 5-ю или на 7-ю гармонику, формула для расчета входного сопротивления имеет вид:

$$X_{\text{вх}}(\nu) = \frac{X_{\text{сети}} * \nu * (X_{\text{реакт}} * \nu^2 - X_{\text{КБ}})}{\nu^2 * (X_{\text{сети}} + X_{\text{реакт}}) - X_{\text{КБ}}} \quad (3.3)$$

Где:

$X_{\text{сети}}$  – сопротивление сети;

$X_{\text{реакт}}$  – сопротивление реактора;

$X_{\text{КБ}}$  – сопротивление КБ;

$\nu$  – номер гармоники.

В случае подключения на шины 10 кВ двух фильтровых звеньев, настроенных на 5-ю и на 7-ю гармоники, формула для расчета сопротивления эквивалентного фильтрового звена имеет вид:

$$X_{\text{ф экв}}(\nu) = \frac{X_{\text{р5}} * X_{\text{р7}} * \nu^2 + \left(\frac{X_{\text{КБ5}} * X_{\text{КБ7}}}{\nu^2}\right) - X_{\text{КБ5}} * X_{\text{р7}} - X_{\text{КБ7}} * X_{\text{р5}}}{X_{\text{р5}} * \nu - \left(\frac{X_{\text{КБ5}}}{\nu}\right) + X_{\text{р7}} * \nu - \left(\frac{X_{\text{КБ7}}}{\nu}\right)} \quad (3.4)$$

Где:

$X_{\text{сети}}$  – сопротивление сети;

$X_{\text{р5}}$  и  $X_{\text{КБ5}}$  – сопротивления реактора и КБ фильтра 5-й гармоники;

$X_{\text{р7}}$  и  $X_{\text{КБ7}}$  – сопротивления реактора и КБ фильтра 7-й гармоники.

Расчет производится для 2 случаев:

1. При изменении параметров фильтра 5 гармоники с одним фильтровым звеном;
2. При изменении параметров фильтра 5 с двумя фильтровыми звеньями;

Результаты расчетов представлены на рисунках 5-16.

#### **4 Анализ ЧХ входного сопротивления узла нагрузки с одним фильтровым звеном**

Рассматривается фильтр 5 гармоники, но с разной мощностью фильтровой батареи, анализируем для фильтра 5 гармоники с мощностью фильтровой батареи 350 кВАр, 600 кВАр и 950 кВАр.

Проведем расчеты частотных характеристик входного сопротивления для случая подключения фильтра 5 гармоники, мощностью фильтровой батареи 350 кВАр. Характеристики представлены на рисунках 5-8.

На рисунке 5 представлена характеристика входного сопротивления, при начальных значениях  $X_{\text{реактора}} = 12,6$  Ом и  $X_{\text{кб}} = 315$  Ом (фильтр точно настроен на 5-ю гармонику). Мощность фильтровой батареи составляет 350 кВАр. По рисунку 5 видно, что ЧХ имеет полюс на частоте гармоники 4,2 и нуль на 5 гармонике. Заметно усиление  $Z_{\text{вх}}$  на 3 и 4 гармониках. При наличии этих гармоник в спектре тока нагрузки будет иметь место нежелательное усиление напряжения на этих частотах, что приведет к росту напряжения на шинах подключения нагрузки в целом. В таблице 4 представлены значения входного сопротивления на канонических гармониках.  $Z_{\text{вх.макс}} = 672,4$  Ом и имеет место на частоте гармоники 4,2.



Рисунок 5 – Частотная характеристика при  $X_{\text{реактора}} = 12,6 \text{ Ом}$  и  $X_{\text{кб}} = 315 \text{ Ом}$

Таблица 4 – Входное сопротивление на различных номерах гармоник

Для 5 фильтра 350кВар		
$Z_{\text{вх макс, Ом}}$	Номер гармоники	$Z_{\text{вх, Ом}}$
1	2	3
672,40	3	19,76
	4	72,24
	5	0
	6	13,15

На рисунке 6 представлена характеристика входного сопротивления, при значении  $X_{\text{реактора}} = 28,35$ . При такой расстройке, пик ЧХ приходится на частоту 3,1 (5 гармоника уже не фильтруется). Можно сделать вывод, что диапазон варьирования параметров фильтра не должен быть столь значительным. В таблице 5 представлены сопротивления входного сопротивления на канонических гармониках.  $Z_{\text{вх.макс}} = 105,61 \text{ Ом}$  и имеет место на частоте 3,1.

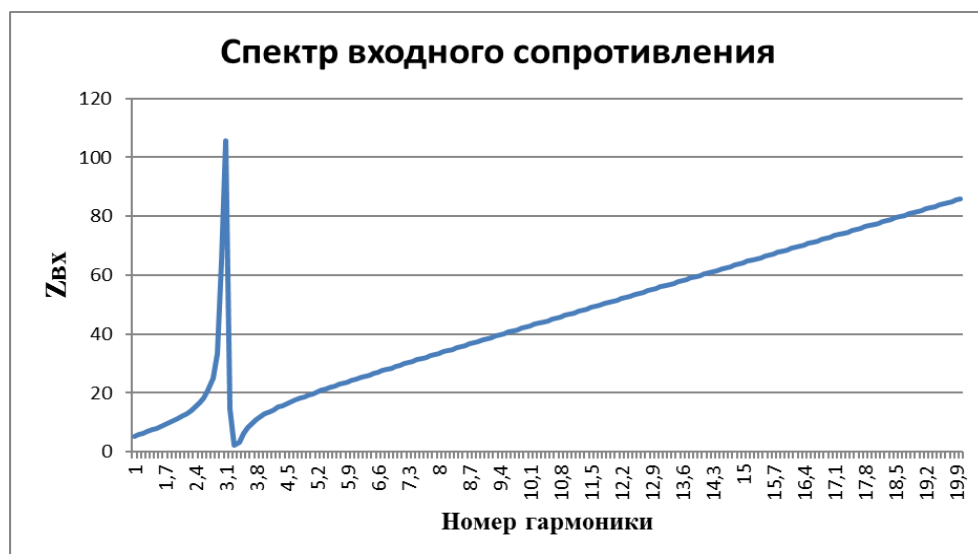


Рисунок 6 – Частотная характеристика при  $X_{\text{реактора}} = 28,35 \text{ Ом}$  и  $X_{\text{кб}} = 315 \text{ Ом}$



Таблица 5 – Входное сопротивление на различных номерах гармоник

Для 5 фильтра 350кВар		
$Z_{вх макс},$ Ом	Номер гармоники	$Z_{вх},$ Ом
1	2	3
105,61	3	65,09
	4	12,82
	5	19,23
	6	24,24

Варьирование параметров фильтра приведет к смещению полюса ЧХ влево или вправо. Была проведена оценка, при каких расстройках параметров фильтра полюс ЧХ попадет на 3 гармонику. Расчеты показали, что полюс ЧХ будет на 3 гармонике при  $X_{реактора}=28,35$  Ом ( $X_{реактора}$  увеличили в 2 раза).

На рисунке 6 мы видим, что при  $X_{реактора}=28,35$  Ом, увеличенном в 2 раза, пик сместился с частоты 4,2 на частоту 3,1. Из этого можно сделать вывод, что при расстройке фильтра в большую сторону в 2 раза, его наибольшее усиление сдвигается на 3 гармонику. В то же время 5 гармоника перестает компенсироваться и достигает значения 19,23 Ом.

На рисунке 7 представлена характеристика входного сопротивления, при значении  $X_{реактора} =7,56$  (уменьшили на 40%). При такой расстройке, пик ЧХ приходится на частоту 5. Можно сделать вывод, что диапазон варьирования параметров фильтра не должен быть столь значительным. В таблице 6 представлены сопротивления входного сопротивления на канонических гармониках.  $Z_{вх.макс}=2565,36$  Ом и имеет место на частоте 5.



Рисунок 7 – Частотная характеристика при  $X_{реактора} =7,56$  Ом и  $X_{к6} = 315$  Ом

Таблица 6 – Входное сопротивление на различных номерах гармоник

Для 5 фильтра 350кВар		
$Z_{вх макс,}$ Ом	Номер гармоники	$Z_{вх,}$ Ом
1	2	3
2565,36	3	18,7476
	4	35,0857
	5	2565,36
	6	9,31862

Варьирование параметров фильтра приведет к смещению полюса ЧХ вправо. Была проведена оценка при каких расстройках параметров фильтра полюс ЧХ попадет на 5 гармонику. Расчеты показали, что полюс ЧХ будет на 5 гармонике при  $X_{реактора}=7,56$  Ом ( $X_{реактора}$  уменьшили на 40%).

На рисунке 7 мы видим, что при  $X_{реактора}=7,56$  Ом, уменьшенном на 40%, пик сместился с частоты 3,1 на частоту 5. Из этого можно сделать вывод, что при данной расстройке фильтра, его наибольшее усиление сдвигается на 5 гармонику.

На рисунке 8 представлена характеристика входного сопротивления, при значении  $X_{реактора} = 3,78$  Ом (уменьшили на 70%). При такой расстройке, пик ЧХ приходится на частоту 6. В таблице 7 представлены сопротивления входного сопротивления на канонических гармониках.  $Z_{вх.макс}=1264,86$  Ом и имеет место на частоте 6.

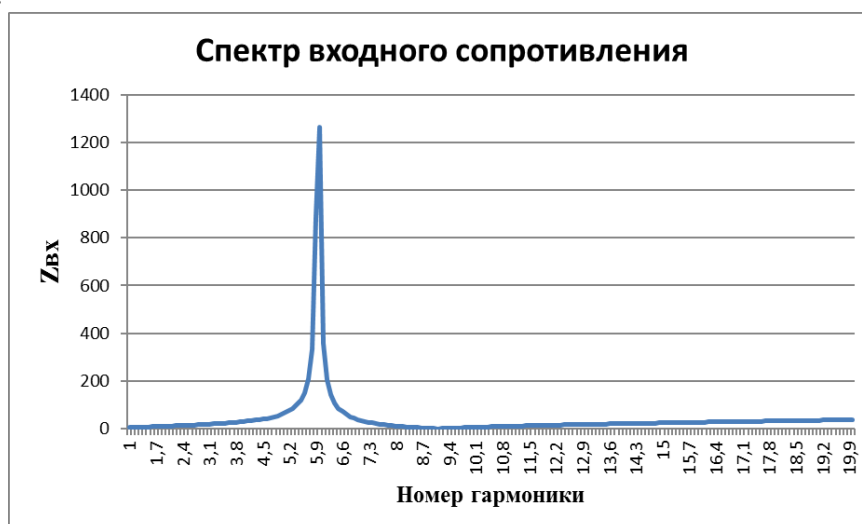


Рисунок 8 – Частотная характеристика при  $X_{реактора} = 3,78$  Ом и  $X_{кб} = 315$  Ом

Таблица 7 – Входное сопротивление на различных номерах гармоник

Для 5 фильтра 350кВар		
$Z_{вх макс,}$ Ом	Номер гармоники	$Z_{вх,}$ Ом
1	2	3
1264,86	3	18,2302
	4	29,8298
	5	59,0445
	6	1264,86

Варьирование параметров фильтра приведет к смещению полюса ЧХ вправо. Была проведена оценка при каких расстройках параметров фильтра полюс ЧХ попадет на 6 гармонику. Расчеты показали, что полюс ЧХ будет на 6 гармонике при  $X_{реактора}=3,78$  Ом ( $X_{реактора}$  уменьшили на 70%).

На рисунке 7 мы видим, что при  $X_{реактора}=3,78$  Ом, уменьшенном на 40%, пик сместился с частоты 3,1 на частоту 6. Из этого можно сделать вывод, что при данной расстройке фильтра, его наибольшее усиление сдвигается на 6 гармонику.

Проведем расчеты частотных характеристик входного сопротивления для случая подключения фильтра 5 гармоники, мощностью фильтровой батареи 600 кВАр. Характеристики представлены на рисунках 9-11.

На рисунке 9 представлена характеристика входного сопротивления, при начальных значениях  $X_{реактора} =7,35$  Ом и  $X_{кб} = 183,75$  Ом (фильтр точно настроен на 5-ю гармонику). По рисунку 9 видно, что ЧХ имеет полюс на частоте гармоники 3,8. При этом 5 гармоника, как и в первом случае полностью компенсируется. Заметно усиление  $Z_{вх}$  на 3 и 4 гармониках. В таблице 8 представлены сопротивления входного сопротивления на канонических гармониках.  $Z_{вх.макс}=364,69$  Ом и имеет место на частоте 3,8.

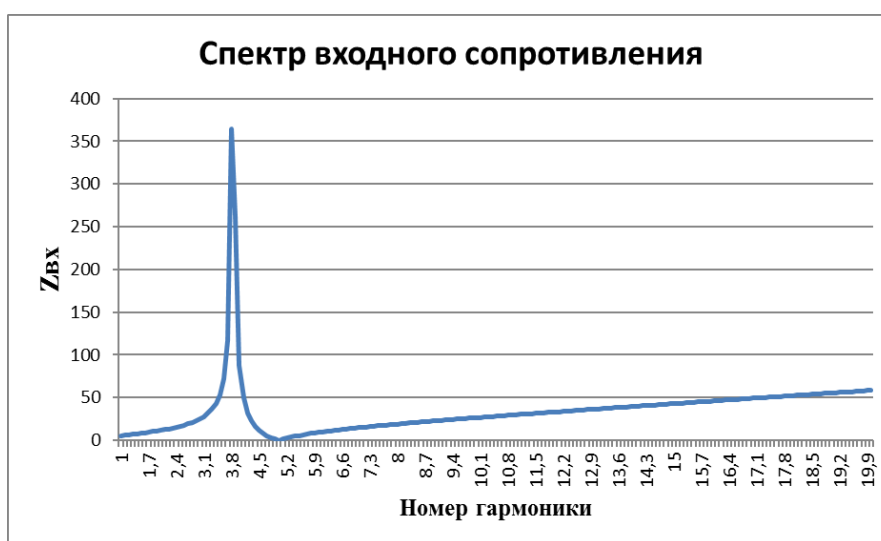


Рисунок 9 – Частотная характеристика при  $X_{реактора} =7,35$  Ом и  $X_{кб} = 183,75$  Ом

Таблица 8 – Входное сопротивление на различных номерах гармоник

Для 5 фильтра 600кВар		
$Z_{вх макс,}$ Ом	Номер гармоники	$Z_{вх,}$ Ом
1	2	3
364,69	3	25,014
	4	88,0846
	5	0
	6	9,34969

На рисунке 10 представлена характеристика входного сопротивления, при значении  $X_{реактора} = 14,7$  Ом (увеличили в 2 раза). При такой расстройке, пик ЧХ приходится на частоту 3. В таблице 9 представлены сопротивления входного сопротивления на канонических гармониках.  $Z_{вх.макс} = 139,29$  Ом и имеет место на частоте 6.



Рисунок 10 – Частотная характеристика при  $X_{реактора} = 14,7$  Ом и  $X_{кб} = 183,75$  Ом  
Таблица 9 – Входное сопротивление на различных номерах гармоник

Для 5 фильтра 600кВар		
$Z_{вх макс,}$ Ом	Номер гармоники	$Z_{вх,}$ Ом
1	2	3
139,29	3	139,298
	4	7,88262
	5	15,0368
	6	19,9551

Варьирование параметров фильтра приведет к смещению полюса ЧХ влево. Была проведена оценка при каких расстройках параметров фильтра полюс ЧХ попадет на 3 гармонику. Расчеты показали, что полюс ЧХ будет на 5 гармонике при  $X_{реактора} = 14,7$  Ом ( $X_{реактора}$  увеличили в раза).

На рисунке 10 мы видим, что при  $X_{реактора} = 14,7$  Ом, увеличенном в 2 раза, пик сместился с частоты 3,8 на частоту 3. Из этого можно сделать вывод, что

при данной расстройке фильтра, его наибольшее усиление сдвигается на 3 гармонику.

На рисунке 11 представлена характеристика входного сопротивления, при значении  $X_{\text{реактора}} = 2,205 \text{ Ом}$  (уменьшили на 70%). При такой расстройке, пик ЧХ приходится на частоту 5. При этом происходит сильное усиление 5-ой гармоники. В таблице 10 представлены сопротивления входного сопротивления на канонических гармониках.  $Z_{\text{вх.макс}} = 2380,73 \text{ Ом}$  и имеет место на частоте 5.



Рисунок 11 – Частотная характеристика при  $X_{\text{реактора}} = 2,205 \text{ Ом}$ ,  $X_{\text{кб}} = 183,75 \text{ Ом}$

Таблица 10 – Входное сопротивление на различных номерах гармоник

Для 5 фильтра 600кВар		
$Z_{\text{вх макс, Ом}}$	Номер гармоники	$Z_{\text{вх, Ом}}$
1	2	3
2380,73	3	21,19
	4	45,09
	5	2380,73
	6	40,41

Была проведена оценка при каких расстройках параметров фильтра полюс ЧХ попадет на 5 гармонику. Расчеты показали, что полюс ЧХ будет на 5 гармонике при  $X_{\text{реактора}} = 2,205 \text{ Ом}$  ( $X_{\text{реактора}}$  уменьшили на 70%).

На рисунке 10 мы видим, что при  $X_{\text{реактора}} = 2,205 \text{ Ом}$ , уменьшенном на 70%, пик сместился с частоты 3,8 на частоту 5. Из этого можно сделать вывод, что

при данной расстройке фильтра, его наибольшее усиление сдвигается на 5 гармонику.

## 5 Анализ ЧХ входного сопротивления узла нагрузки с двумя фильтровыми звеньями

Проведем расчеты частотных характеристик входного сопротивления для случая подключения фильтра 5 и 7 гармоники одновременно, суммарной мощностью фильтровой батареи 950 кВАр. Частотные характеристики представлены на рисунках 12-16.

На рисунке 12 представлена характеристика входного сопротивления, при первоначальных значениях  $X_{\text{реактора}(350)} = 12,6 \text{ Ом}$ ,  $X_{\text{реактора}(600)} = 7,35 \text{ Ом}$  и  $X_{\text{кб}} = 115,05 \text{ Ом}$ . При такой настройке, явно выраженный пик отсутствует. При этом 5 гармоника полностью компенсируется, а значения входного сопротивления меньше чем при использовании фильтров по отдельности. В таблице 11 представлены сопротивления входного сопротивления на канонических гармониках.  $Z_{\text{вх.макс}} = 109,65 \text{ Ом}$ .



Рисунок 12 – Частотная характеристика при  $X_{\text{p}(350)} = 12,6 \text{ Ом}$ ,  $X_{\text{p}(600)} = 7,35 \text{ Ом}$

Таблица 11 – Входное сопротивление на различных номерах гармоник

Для 5 и 7 фильтра 950кВАр				
$Z_{\text{вх макс, Ом}}$	Номер гармоники	$Z_{\text{вх, Ом}}$	$X_{\text{реакт 350, Ом}}$	$X_{\text{реакт 600, Ом}}$
1	2	3	4	5
109,65	3	24,75	12,6	7,35
	4	10,44	12,6	7,35
	5	0	12,6	7,35
	6	8,51	12,6	7,35

На рисунке 13 представлена характеристика входного сопротивления, при значениях  $X_{\text{реактора}(350)} = 28,35 \text{ Ом}$ ,  $X_{\text{реактора}(600)} = 7,35 \text{ Ом}$ ,  $X_{\text{кб}(350)} = 315 \text{ Ом}$  и  $X_{\text{кб}(600)}$

= 183,75 Ом. При такой настройке, пик ЧХ приходится на частоту 3,7. При этом 5 гармоника также полностью компенсируется, а значения входного сопротивления меньше чем при использовании фильтров по отдельности. В таблице 11 представлены сопротивления входного сопротивления на канонических гармониках.  $Z_{вх.макс}=163,98$  Ом и имеет место на частоте 3,7.



Рисунок 13 – Частотная характеристика при  $X_{p(350)}=28,35$  Ом,  $X_{p(600)}=7,35$  Ом

Таблица 12 – Входное сопротивление на различных номерах гармоник

Для 5 и 7 фильтра 950кВар				
$Z_{вх макс},$ Ом	Номер гармоники	$Z_{вх},$ Ом	$X_{реакт 350},$ Ом	$X_{реакт 600},$ Ом
1	2	3	4	5
163,98	3	16,8	28,35	7,35
	4	66,15	28,35	7,35
	5	0	28,35	7,35
	6	11,8563	28,35	7,35

Была проведена оценка при каких расстройках параметров фильтра полюс ЧХ попадет на 3 гармонику. Расчеты показали, что полюс ЧХ будет на 3 гармонике при  $X_{реактора}=28,35$  Ом ( $X_{реактора}$  увеличили в 2 раза).

На рисунке 10 мы видим, что при  $X_{реактора}=28,35$  Ом, увеличенном в 2 раза, пик сместился с частоты 1 на частоту 3,7. Из этого можно сделать вывод, что при данной расстройке фильтра, его наибольшее усиление сдвигается на 4 гармонику.

На рисунке 14 представлена характеристика входного сопротивления, при значениях  $X_{реактора(350)}=28,35$  Ом,  $X_{реактора(600)}=7,35$  Ом,  $X_{кб(350)}=315$  Ом и  $X_{кб(600)}=183,75$  Ом. При такой расстройке, пик ЧХ приходится на частоту 6. При этом 5 гармоника также полностью компенсируется, а значения входного

сопротивления меньше чем при использовании фильтров по отдельности. В таблице 13 представлены сопротивления входного сопротивления на канонических гармониках.  $Z_{вх.макс}=161,7$  Ом и имеет место на частоте 6.



Рисунок 14 – Частотная характеристика при  $X_{p(350)}=6,3$  Ом,  $X_{p(600)}=7,35$  Ом

Таблица 13 – Входное сопротивление на различных номерах гармоник

Для 5 и 7 фильтра 950кВар				
$Z_{вх макс},$ Ом	Номер гармоники	$Z_{вх},$ Ом	$X_{реакт 350},$ Ом	$X_{реакт 600},$ Ом
1	2	3	4	5
161,7	3	26,9363	6,3	7,35
	4	12,6354	6,3	7,35
	5	0	6,3	7,35
	6	161,7	6,3	7,35

Была проведена оценка при каких расстройках параметров фильтра полюс ЧХ попадет на 6 гармонику. Расчеты показали, что полюс ЧХ будет на 6 гармонике при  $X_{реактора}=6,3$  Ом ( $X_{реактора}$  уменьшили на 50%).

На рисунке 14 мы видим, что при  $X_{реактора}=6,3$  Ом, уменьшенном на 50%, пик сместился с частоты 1 на частоту 6. Из этого можно сделать вывод, что при данной расстройке фильтра, его наибольшее усиление сдвигается на 6 гармонику.

На рисунке 15 представлена характеристика входного сопротивления, при значениях  $X_{реактора(350)}=28,35$  Ом,  $X_{реактора(600)}=7,35$  Ом,  $X_{кб(350)}=315$  Ом и  $X_{кб(600)}=183,75$  Ом. При такой расстройке, пик ЧХ приходится на частоту 4. При этом 5 гармоника также полностью компенсируется, а значения входного сопротивления меньше чем при использовании фильтров по отдельности. В таблице 14 представлены сопротивления входного сопротивления на канонических гармониках.  $Z_{вх.макс}=401,74$  Ом и имеет место на частоте 6.





Рисунок 15 – Частотная характеристика при  $X_{p(350)} = 12,6 \text{ Ом}$ ,  $X_{p(600)} = 19,11 \text{ Ом}$

Таблица 14 – Входное сопротивление на различных номерах гармоник

Для 5 и 7 фильтра 950кВар				
$Z_{вх \text{ макс, Ом}}$	Номер гармоники	$Z_{вх, Ом}$	$X_{\text{реакт } 350, \text{ Ом}}$	$X_{\text{реакт } 600, \text{ Ом}}$
1	2	3	4	5
401,74	3	3,70	12,6	19,11
	4	401,74	12,6	19,11
	5	0	12,6	19,11
	6	18,11	12,6	19,11

Была проведена оценка при каких расстройках параметров фильтра полюс ЧХ попадет на 6 гармонику. Расчеты показали, что полюс ЧХ будет на 6 гармонике при  $X_{\text{реактора}} = 19,11 \text{ Ом}$  ( $X_{\text{реактора}}$  увеличили в 2,5 раза).

На рисунке 15 мы видим, что при  $X_{\text{реактора}} = 6,3 \text{ Ом}$ , Увеличенном в 2,5 раза пик сместился с частоты 1 на частоту 4. Из этого можно сделать вывод, что при данной расстройке фильтра, его наибольшее усиление сдвигается на 4 гармонику. При этом для смещения пика на 4 частоту необходимо более сильно изменить сопротивление фильтра.

На рисунке 16 представлена характеристика входного сопротивления, при значениях  $X_{\text{реактора}(350)} = 28,35 \text{ Ом}$ ,  $X_{\text{реактора}(600)} = 7,35 \text{ Ом}$ ,  $X_{к6(350)} = 315 \text{ Ом}$  и  $X_{к6(600)} = 183,75 \text{ Ом}$ . При такой расстройке, пик ЧХ приходится на частоту 6,1. При этом 5 гармоника также полностью компенсируется, а значения входного сопротивления меньше чем при использовании фильтров по отдельности. В таблице 15 представлены сопротивления входного сопротивления на канонических гармониках.  $Z_{вх.макс} = 1544,058 \text{ Ом}$  и имеет место на частоте 6,1.



Рисунок 16 – Частотная характеристика при  $X_{p(350)} = 12,6 \text{ Ом}$ ,  $X_{p(600)} = 0,735 \text{ Ом}$

Таблица 15 – Входное сопротивление на различных номерах гармоник

Для 5 и 7 фильтра 950кВар				
$Z_{вх \text{ макс,}} \text{ Ом}$	Номер гармоники	$Z_{вх,} \text{ Ом}$	$X_{\text{реакт } 350,} \text{ Ом}$	$X_{\text{реакт } 600,} \text{ Ом}$
1	2	3	4	5
1544,058	3	31,42	12,6	0,735
	4	17,08	12,6	0,735
	5	0	12,6	0,735
	6	194,40	12,6	0,735

Была проведена оценка при каких расстройках параметров фильтра полюс ЧХ попадет на 6 гармонику. Расчеты показали, что полюс ЧХ будет на 6 гармонике при  $X_{\text{реактора}} = 0,735 \text{ Ом}$  ( $X_{\text{реактора}}$  уменьшили на 90%).

На рисунке 16 мы видим, что при  $X_{\text{реактора}} = 0,735 \text{ Ом}$ , уменьшенном на 90%, пик сместился с частоты 1 на частоту 6,1. Из этого можно сделать вывод, что при данной расстройке фильтра, его наибольшее усиление сдвигается на 6 гармонику. При этом для смещения пика на 6 частоту необходимо более сильно изменить сопротивление фильтра.

## 6 Анализ изменения напряжения на шинах подключения нагрузки

При случайных изменениях параметра фильтра даже на 1%, возможно возникновение резонансов на канонических гармониках. Это можно отследить путем анализа ЧХ входного сопротивления сети.

В данном разделе рассматривается изменение входного сопротивления в зависимости от случайных изменений параметров фильтра. Варьируется сопротивление реактора в диапазоне -10% до +10% от сопротивления реактора при точной настройке фильтра.

Так как на каждой секции РУ-10 кВ установлены двухзвенные компенсирующие устройства с разной мощностью фильтровых батарей (350 кВАр и 600 кВАр), то были выполнены серии расчетов для следующих случаев:

1. Изменение параметров фильтра 5 гармоники (менялось  $X_{реакт}$ );
2. Изменение параметров фильтра 7 гармоники (менялось  $X_{реакт}$ );
3. Изменение параметров фильтра 5 и 7 гармоники (менялось  $X_{реакт}$ );

Результаты расчетов представлены в таблицах 16-18.

В таблице 16 представлены результаты изменения  $Z_{вх}$  на 5 фильтре батареи мощностью 350 кВАр, при  $X_{реактора.0}=12,6$ . Из данных результатов видно, что при варьировании сопротивления реактора, изменения входного сопротивления незначительны.

Таблица 16 – изменение  $Z_{вх}$  в зависимости от  $\Delta X_{реактора}$  на 5 фильтре

$\Delta X_{реактора}$	$X_{реактора}$	$Z_{вх} (350), v=3$	$Z_{вх} (350), v=4$	$Z_{вх} (350), v=5$	$Z_{вх} (350), v=6$
1	2	3	4	5	6
-10%	11,34	19,46	52,17	8,37	10,29
-9%	11,46	19,48	53,45	7,29	10,62
-8%	11,59	19,51	54,84	6,28	10,94
-7%	11,71	19,54	56,35	5,33	11,25
-6%	11,84	19,57	57,99	4,44	11,55
-5%	11,97	19,6	59,8	3,59	11,83
-4%	12,09	19,63	61,78	2,79	12,11
-3%	12,22	19,66	63,98	2,04	12,38
-2%	12,34	19,69	66,42	1,33	12,65
-1%	12,47	19,73	69,16	0,65	12,9
0%	12,6	19,76	72,24	0	13,15
1%	12,72	19,79	75,73	0,61	13,39
2%	12,85	19,82	79,73	1,2	13,63
3%	12,97	19,86	84,35	1,76	13,86
4%	13,1	19,89	89,74	2,29	14,08
5%	13,23	19,92	96,14	2,8	14,29
6%	13,35	19,97	103,83	3,29	14,51
7%	13,48	20	113,26	3,76	14,71
8%	13,6	20,04	125,09	4,21	14,91
9%	13,73	20,08	140,37	4,64	15,11
10%	13,86	20,11	160,88	5,04	15,29

В таблице 17 представлены результаты изменения  $Z_{вх}$  на 7 фильтре батареи мощностью 600 кВАр, при  $X_{реактора.0}=7,04$ . Из данных результатов видно, что при варьировании сопротивления реактора на 5 гармонике происходит сильное усиление  $Z_{вх}$ , с максимальным значением 5656,15 Ом.

Таблица 17 – изменение  $Z_{ВХ}$  в зависимости от  $\Delta X_{реактора}$  на 7 фильтре

$\Delta X_{реактора}$	$X_{реактора}$	$Z_{ВХ} (600), \nu=3$	$Z_{ВХ} (600), \nu=4$	$Z_{ВХ} (600), \nu=5$	$Z_{ВХ} (600), \nu=6$
1	2	3	5	7	9
-10%	6,33	18,56	32,9	135,79	27,55
-9%	6,4	18,57	33,01	142,83	26,06
-8%	6,47	18,59	33,12	150,82	24,65
-7%	6,54	18,59	33,23	159,99	23,3
-6%	6,61	18,61	33,35	170,61	22,01
-5%	6,6	18,61	33,46	183,04	20,79
-4%	6,75	18,63	33,58	197,8	19,63
-3%	6,82	18,64	33,69	215,61	18,52
-2%	6,89	18,65	33,82	237,53	17,45
-1%	6,96	18,66	33,95	265,16	16,43
0%	7,04	18,67	34,07	301,07	15,45
1%	7,11	18,68	34,2	349,62	14,51
2%	7,18	18,69	34,33	418,95	13,61
3%	7,25	18,7	34,47	525,99	12,74
4%	7,32	18,71	34,6	713,03	11,91
5%	7,3	18,72	34,74	1123,25	11,11
6%	7,46	18,73	34,88	2746,89	10,34
7%	7,53	18,74	35,02	5656,15	9,59
8%	7,6	18,75	35,17	1364,47	8,88
9%	7,67	18,76	35,32	766,36	8,19
10%	7,7	18,77	35,48	528,14	7,5

В таблице 18 представлены результаты изменения  $Z_{ВХ}$  при варьировании сопротивления 5 и 7 фильтра батареи мощностью 950 кВАр. Из данных результатов видно, что при варьировании сопротивления реактора на 5 гармонике происходит сильное усиление  $Z_{ВХ}$ , с максимальным значением 5656,15 Ом.

Таблица 18 – изменение  $Z_{ВХ}$  в зависимости от  $\Delta X_{реактора}$  5 и 7 фильтр

$\Delta X_{реактора}$	3 гармоника		4 гармоника		6 гармоника	
	$X_{реактора}$	$Z_{ВХ} (950)$	$X_{реактора}$	$Z_{ВХ} (950)$	$X_{реактора}$	$Z_{ВХ} (950)$
1	2	3	4	5	8	9
-10%	25,80	9,59	13,31	8,05	11,28	8,24
-9%	26,08	9,630	13,46	8,10	11,41	8,3
-8%	26,37	9,67	13,61	8,16	11,15	8,37
-7%	26,66	9,7	13,75	8,21	11,65	8,44
-6%	26,95	9,75	13,91	8,26	11,78	8,5
-5%	27,24	9,78	14,05	8,31	11,91	8,57
-4%	27,52	9,82	14,2	8,37	12,03	8,63

Продолжение таблицы 18

-3%	27,81	9,86	14,35	8,42	12,16	8,69
-2%	28,09	9,89	14,49	8,47	12,28	8,76
-1%	28,38	9,93	14,65	8,52	12,41	8,82
0%	28,67	9,96	14,79	8,57	12,53	8,89
1%	28,96	9,99	14,94	8,62	12,66	8,95
2%	29,24	10,03	15,08	8,67	12,78	9,01
3%	29,53	10,07	15,24	8,72	12,91	9,07
4%	29,82	10,09	15,39	8,76	13,03	9,14
5%	30,1	10,13	15,53	8,81	13,16	9,19
6%	30,39	10,16	15,68	8,86	13,29	9,26
7%	30,68	10,19	15,83	8,91	13,41	9,32
8%	30,96	10,23	15,98	8,95	13,54	9,38
9%	31,25	10,26	16,13	8,99	13,66	9,44
10%	31,54	10,29	16,27	9,04	13,79	9,49

По данным таблиц 16-18 построены графики, представленные на рисунках 17-21. Из рисунка 17 наглядно видно, что при варьировании сопротивления реактора, что в большую, что в меньшую сторону каких-либо значительных изменений не происходит. Но при этом при регулировании обоих фильтров входное сопротивление значительно меньше, чем если бы мы их регулировали по отдельности.

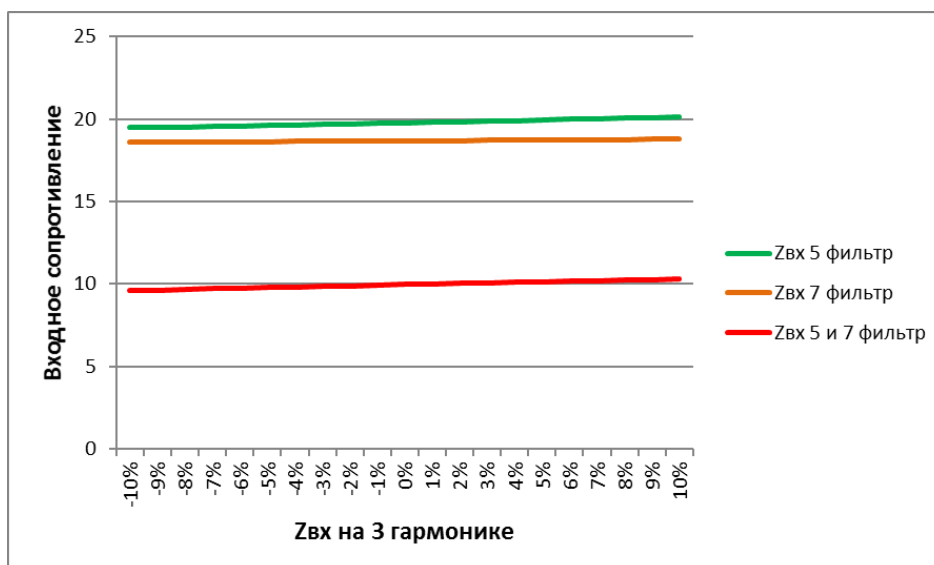


Рисунок 17 – изменение входного сопротивления на 3 гармонике

По рисунку 18 видно, что на 4 гармонике при увеличении сопротивления реактора присутствует сильное увеличение входного сопротивления. Если посмотреть по таблице 18, то можно сделать вывод, что  $Z_{вх}$  на 4 гармонике, при изменении  $X_{реактора}$  5 фильтра, увеличилось более чем в 2 раза, с 72,24 до 160,88.

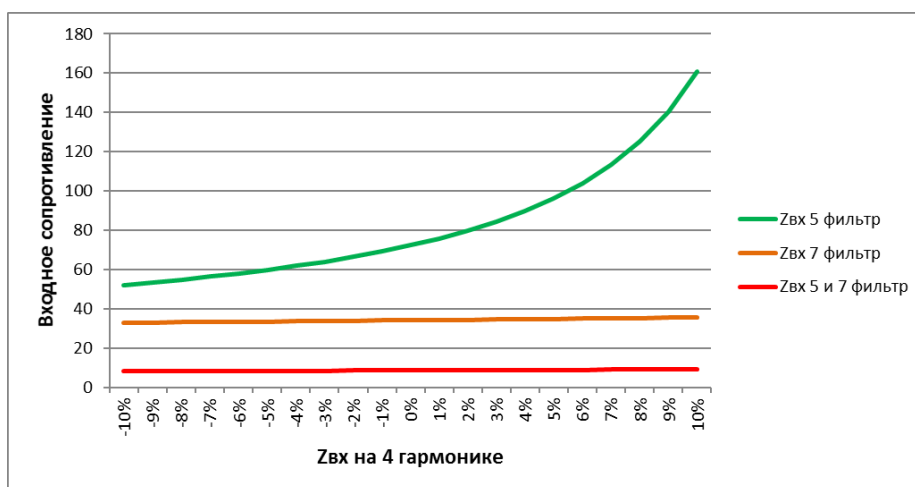


Рисунок 18 – изменение входного сопротивления на 4 гармонике

На рисунке 19, мы видим, что при любом изменении сопротивления реактора, на 5 фильтре 5-ой гармоники происходит значительное усиление входного сопротивления.

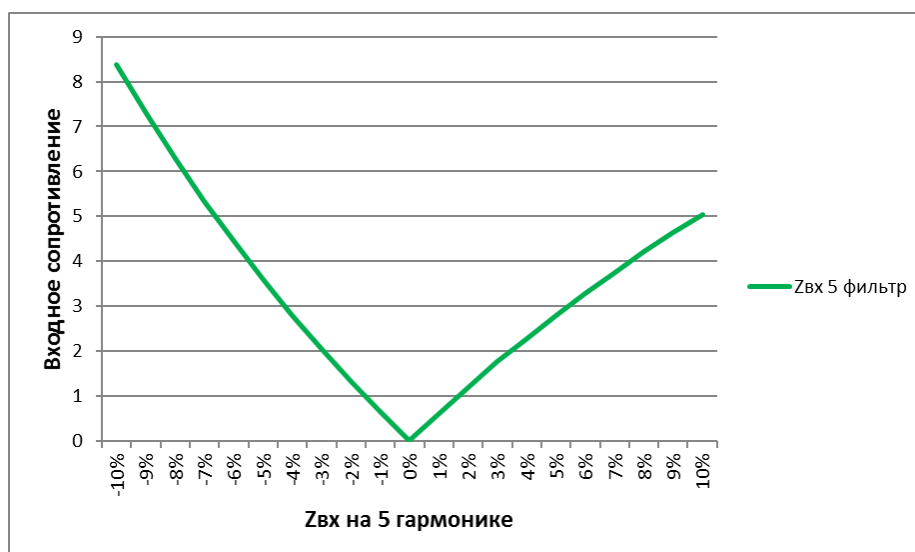


Рисунок 19 – изменение входного сопротивления на 5 фильтре 5 гармоники

На рисунке 20, также видно усиление входного сопротивления, но более сильное, наибольшее значение мы получаем при расстройке фильтра в большую сторону на 7%. Из таблицы 17 мы можем узнать, что  $Z_{вх}=5656,15$ .

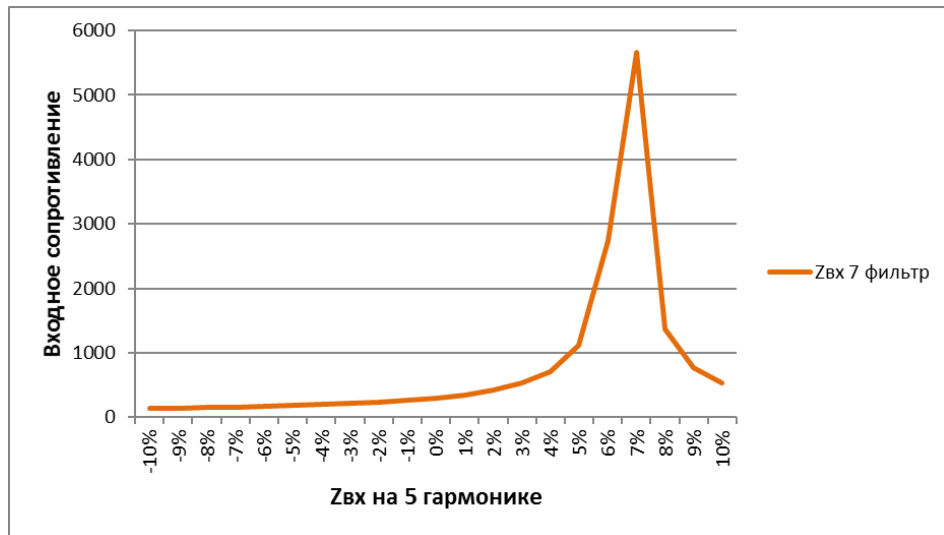


Рисунок 20 – изменение входного сопротивления на 7 фильтре 5 гармоники

На рисунке 21 хорошо видно, что при регулировании сопротивления реактора в большую сторону, входное сопротивление уменьшается. Наиболее стабильная ситуация, также остается при использовании 5 и 7 фильтра одновременно.

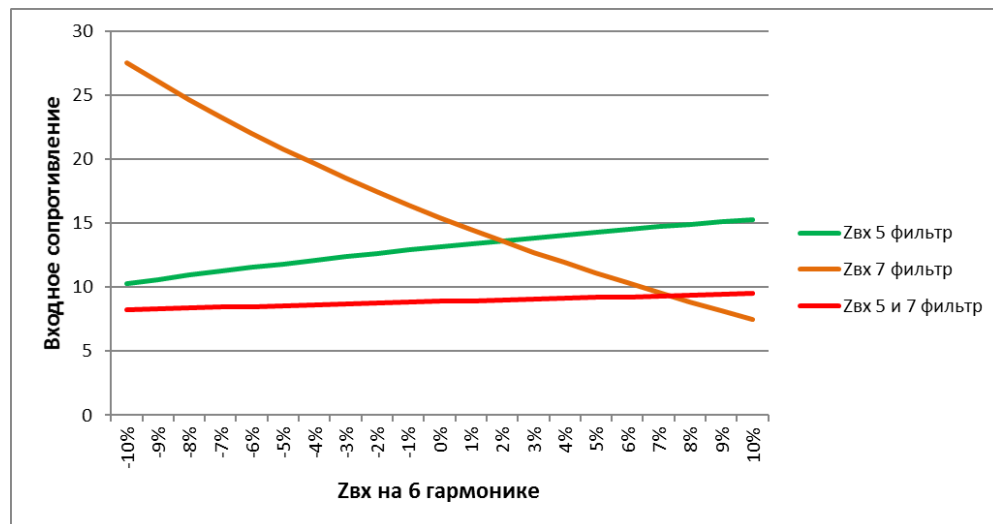


Рисунок 21 – изменение входного сопротивления на 6 гармоники

В таблице 19 представлены результаты изменения  $Z_{вх}$  на 5 фильтре батареи мощностью 350 кВАр, при  $X_{реактора.0}=7,35$ . Из данных результатов видно, что при варьировании сопротивления реактора в меньшую сторону, на 4 гармонике происходит сильное усиление входного сопротивления.

Таблица 19 – изменение  $Z_{вх}$  в зависимости от  $\Delta X_{реактора}$  на 5 фильтре

$\Delta X_{реактора}$	$X_{реактора}$	$Z_{вх} (350), v=3$	$Z_{вх} (350), v=4$	$Z_{вх} (350), v=5$	$Z_{вх} (350), v=6$
1	2	3	5	7	9
-10%	6,62	24,19	449,36	4,29	6,99
-9%	6,69	24,27	331,98	3,8	7,25

Продолжение таблицы 19

-8%	6,76	24,35	261,53	3,32	7,5
-7%	6,84	24,42	214,57	2,86	7,75
-6%	6,91	24,5	181,01	2,41	7,99
-5%	6,98	24,58	155,85	1,98	8,23
-4%	7,06	24,66	136,27	1,56	8,46
-3%	7,13	24,75	120,61	1,15	8,69
-2%	7,2	24,84	107,79	0,76	8,91
-1%	7,28	24,92	97,12	0,37	9,13
0%	7,35	25,01	88,08	0	9,35
1%	7,42	25,1	80,34	0,36	9,56
2%	7,5	25,19	73,62	0,71	9,76
3%	7,57	25,29	67,75	1,05	9,96
4%	7,64	25,38	62,57	1,38	10,16
5%	7,72	25,48	57,96	1,71	10,36
6%	7,79	25,58	53,84	2,03	10,55
7%	7,86	25,68	50,13	2,34	10,74
8%	7,94	25,78	46,77	2,64	10,92
9%	8,01	25,89	43,72	2,93	11,1
10%	8,09	26	40,93	3,21	11,27

В таблице 20 представлены результаты изменения  $Z_{вх}$  на 5 фильтре батареи мощностью 600 кВАр, при  $X_{реактора.0}=7,35$ . Из данных результатов видно, что при варьировании сопротивления реактора в меньшую сторону, на 4 гармонике происходит усиление входного сопротивления.

Таблица 20 – изменение  $Z_{вх}$  в зависимости от  $\Delta X_{реактора}$  на 7 фильтре

$\Delta X_{реактора}$	$X_{реактора}$	$Z_{вх} (600), v=3$	$Z_{вх} (600), v=4$	$Z_{вх} (600), v=5$	$Z_{вх} (600), v=6$
1	2	3	5	7	9
-10%	3,38	21,77	54,68	90,73	12,71
-9%	3,41	21,79	55,11	86,95	15,2
-8%	3,45	21,81	55,56	83,41	14,7
-7%	3,49	21,83	56,01	80,08	14,21
-6%	3,53	21,85	56,47	76,95	13,73
-5%	3,56	21,87	56,95	74	13,27
-4%	3,60	21,89	57,44	71,22	12,81
-3%	3,64	21,91	57,95	68,59	12,36
-2%	3,68	21,94	58,46	66,09	11,92
-1%	3,17	21,96	59	63,73	11,49
0%	3,75	21,98	10,44	61,48	11,07



Продолжение таблицы 20

1%	3,79	22	60,11	59,35	10,65
2%	3,83	22,03	60,69	57,32	10,25
3%	3,86	22,05	61,29	55,38	9,85
4%	3,90	22,07	61,9	53,53	9,46
5%	3,94	22,09	62,54	51,77	9,08
6%	3,98	22,11	63,19	50,08	8,71
7%	4,01	22,14	63,86	48,46	8,34
8%	4,05	22,16	64,56	46,91	7,97
9%	4,09	22,18	65,28	45,43	7,62
10%	4,13	22,21	66,02	44	7,27

В таблице 21 представлены результаты изменения  $Z_{вх}$  при варьировании сопротивления 5 и 7 фильтра батареи мощностью 950 кВАр. Из данных результатов видно, что при варьировании сопротивления не значительных изменений не происходит.

Таблица 21– изменение  $Z_{вх}$  в зависимости от  $\Delta X_{реактора}$  5 и 7 фильтр

$\Delta X_{реактора}$	$X_{реактора}$	$Z_{вх} (950), v=3$	$Z_{вх} (950), v=4$	$Z_{вх} (950), v=5$	$Z_{вх} (950), v=6$
1	2	3	5	7	9
-10%	17,96	26,15	12,3	2,32	5,73
-9%	18,15	26,01	12,12	2,08	6
-8%	18,35	25,87	11,93	1,86	6,28
-7%	18,55	25,73	11,74	1,62	6,56
-6%	18,75	25,59	11,55	1,39	6,84
-5%	18,95	25,45	11,37	1,16	7,11
-4%	19,15	25,31	11,18	0,93	7,39
-3%	19,35	25,17	11	0,69	7,67
-2%	19,55	25,04	10,81	0,46	7,95
-1%	19,75	24,89	10,63	0,23	8,23
0%	19,95	24,76	10,44	0	8,51
1%	20,15	24,62	10,25	0,23	8,79
2%	20,35	24,47	10,07	0,46	9,07
3%	20,55	24,34	9,88	0,69	9,34
4%	20,75	24,2	9,7	0,93	9,62
5%	20,95	24,06	9,52	1,16	9,9
6%	21,15	23,92	9,33	1,39	10,18
7%	21,35	23,78	9,14	1,62	10,46
8%	21,55	23,64	8,95	1,85	10,74
9%	21,75	23,5	8,77	2,08	11,01
10%	21,95	23,36	8,58	2,32	11,29

На рисунке 22 хорошо видно, что при регулировании сопротивления реактора в большую или меньшую сторону, входное сопротивление также как и в первом случае практически не изменяется.

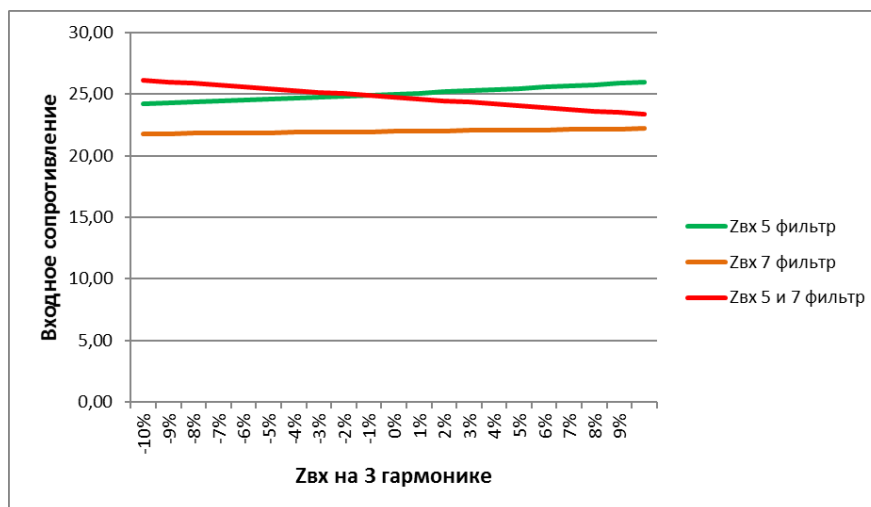


Рисунок 22 – изменение входного сопротивления на 3 гармонике

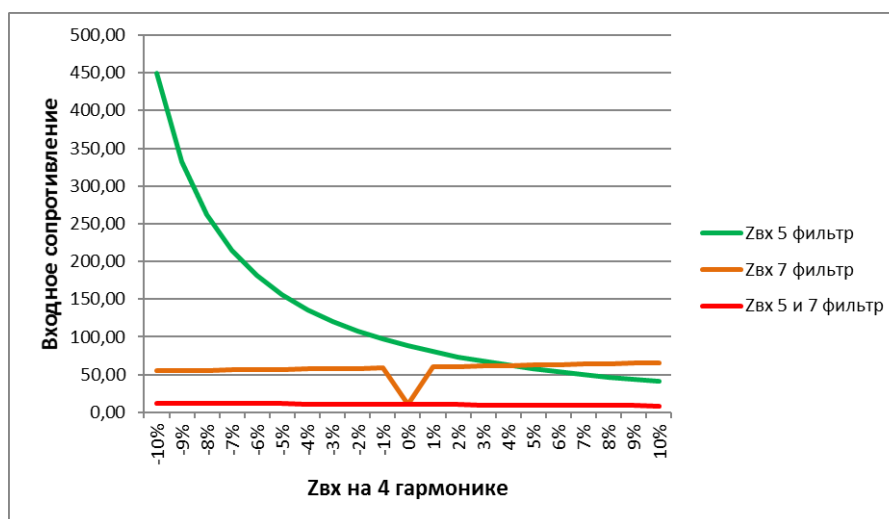


Рисунок 23 – изменение входного сопротивления на 4 гармонике

На рисунке 24 видно, что при регулировании сопротивления фильтра в меньшую сторону, происходит усиление 5 гармоник. Также мы можем видеть, что при использовании только 7 фильтра, значения входного сопротивления намного больше чем при использовании только 5 фильтра или 5 и 7 фильтра одновременно.

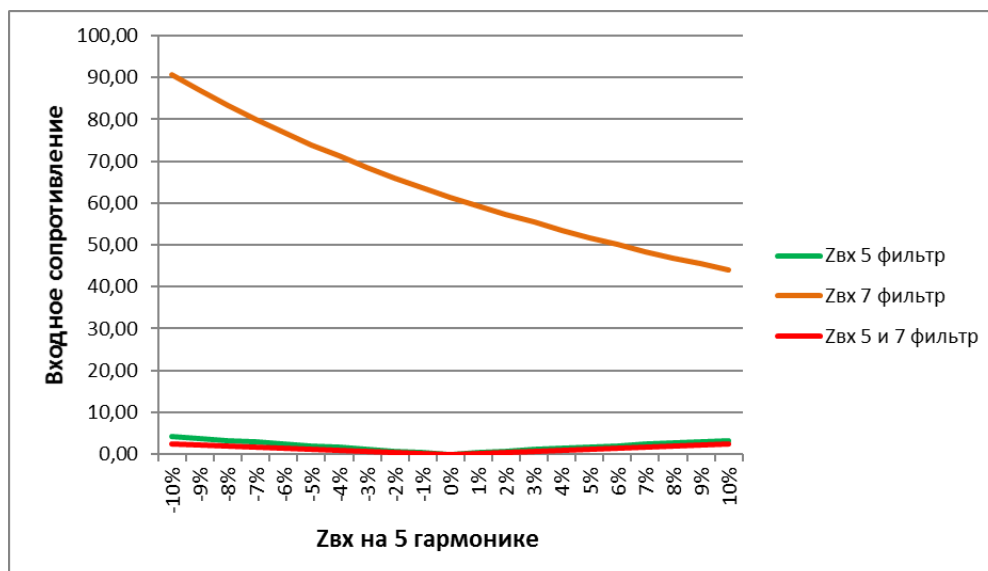


Рисунок 24 – изменение входного сопротивления на 5 гармонике

На рисунке 25 видно, что при регулировании сопротивления фильтра в меньшую сторону, происходит усиление 6 гармоника. Также мы можем видеть, что при использовании 5 и 7 фильтра, значения входного сопротивления наиболее стабильны.

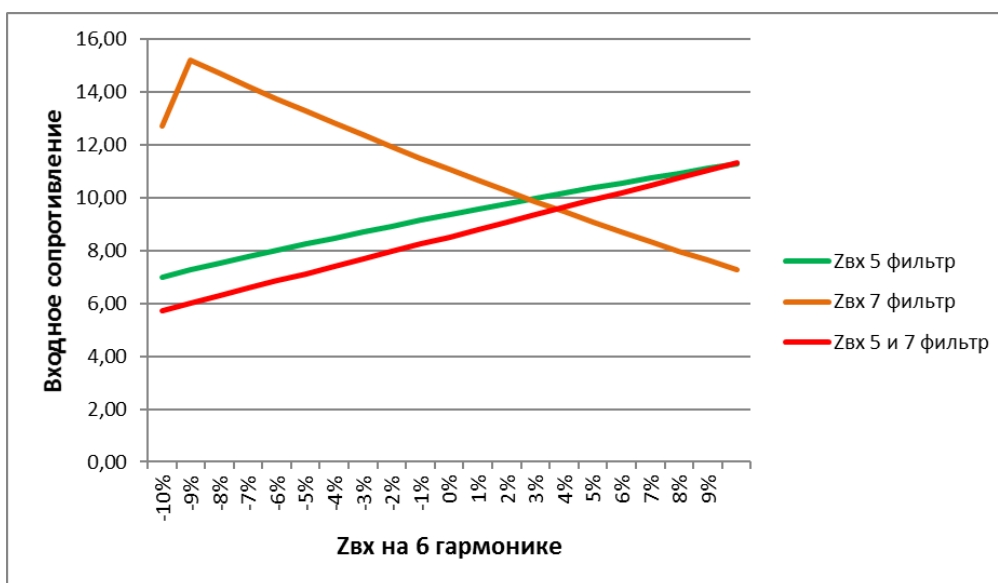


Рисунок 25 – изменение входного сопротивления на 6 гармонике

Из выше представленных графиков, видно, что в большинстве случаев наиболее благоприятная ситуация получается при использовании 5 и 7 фильтра одновременно. Исходя из этого, правильнее всего будет регулировать оба фильтра одновременно. Потому что при регулировании фильтров по отдельности, на 4 и 5 гармониках происходят сильные изменения входного сопротивления, что значительно повлияет на параметры сети.

## 7 Анализ усиления входного сопротивления по отношению к начальному значению

В этом разделе выполнен анализ того, на сколько изменится сопротивление на шинах подключения нагрузки при изменении входного сопротивления в случае отклонения параметров фильтра от его параметров при точной настройке. Изменение напряжения на определенной частоте определяется изменением входного сопротивления на этой частоте. То есть, его можно оценить по относительному изменению входного сопротивления  $Z_{BX}^*$

Расчет производится по формуле:

$$Z_{BXV}^* = \frac{Z_{BXV.i}}{Z_{BXV.0}} \quad (6.1)$$

Где:

$Z_{BXV.0}$  – начальное входное сопротивление;

$Z_{BXV.i}$  – входное сопротивление после изменения;

Результаты представлены в таблицах 22-24.

В таблице 22 представлены результаты усиления  $Z_{BX}$  на 5 фильтре, при  $Z_{BXV.0} = 19,76$  Ом,  $Z_{BXV.0} = 72,24$  Ом,  $Z_{BXV.0} = 13,15$  Ом для 3, 4 и 6 гармоник соответственно. Из полученных результатов видно, что какого-либо значительного усиления на 5 фильтре нет, однако на 4 гармонике, присутствует усиление в 2,22 раза.

Таблица 22 – усиление  $Z_{BX}$  на 5 фильтре

3 гармоника		4 гармоника		6 гармоника	
$Z_{BXV.i}$	$Z_{BXV.i}/Z_{BXV.0}$	$Z_{BXV.i}$	$Z_{BXV.i}/Z_{BXV.0}$	$Z_{BXV.i}$	$Z_{BXV.i}/Z_{BXV.0}$
1	2	3	4	7	8
19,46	0,9848	52,17	0,7222	10,29	0,7825
19,48	0,9858	53,45	0,7399	10,62	0,8076
19,51	0,9873	54,84	0,7591	10,94	0,8319
19,54	0,9889	56,35	0,7800	11,25	0,8555
19,57	0,9904	57,99	0,8027	11,55	0,8783
19,6	0,9919	59,8	0,8278	11,83	0,8996
19,63	0,9934	61,78	0,8552	12,11	0,9209
19,66	0,9949	63,98	0,8857	12,38	0,9414
19,69	0,9965	66,42	0,9194	12,65	0,9620
19,73	0,9985	69,16	0,9574	12,9	0,9810
19,76	1,0000	72,24	1,0000	13,15	1,0000
19,79	1,0015	75,73	1,0483	13,39	1,0183
19,82	1,0030	79,73	1,1037	13,63	1,0365
19,86	1,0051	84,35	1,1676	13,86	1,0540
19,89	1,0066	89,74	1,2422	14,08	1,0707
19,92	1,0081	96,14	1,3308	14,29	1,0867
19,97	1,0106	103,83	1,4373	14,51	1,1034
20	1,0121	113,26	1,5678	14,71	1,1186

Продолжение таблицы 22

20,04	1,0142	125,09	1,7316	14,91	1,1338
20,08	1,0162	140,37	1,9431	15,11	1,1490
20,11	1,0177	160,88	2,2270	15,29	1,1627

В таблице 23 представлены результаты усиления  $Z_{вх}$  на 7 фильтре, при  $Z_{вхv.0} = 18,67$  Ом,  $Z_{вхv.0} = 34,07$  Ом,  $Z_{вхv.0} = 301,07$  Ом,  $Z_{вхv.0} = 15,45$  Ом для 3, 4, 5 и 6 гармоник соответственно. В данном случае 5 гармоника уже не фильтруется и имеет достаточно сильное усиление, достигающее до значения 18,78 раз. На 6 гармонике также появляются незначительные усиления.

Таблица 23 – усиление  $Z_{вх}$  на 7 фильтре

3 гармоника		4 гармоника		5 гармоника		6 гармоника	
$Z_{вхv.i}$	$Z_{вхv.i}/Z_{вхv.0}$	$Z_{вхv.i}$	$Z_{вхv.i}/Z_{вхv.0}$	$Z_{вхv.i}$	$Z_{вхv.i}/Z_{вхv.0}$	$Z_{вхv.i}$	$Z_{вхv.i}/Z_{вхv.0}$
1	2	3	4	5	6	7	8
18,567	0,9945	32,904	0,9658	135,79	0,4510	27,55	1,7832
18,570	0,9946	33,011	0,9689	142,83	0,4744	26,06	1,6867
18,59	0,9957	33,121	0,9721	150,82	0,5010	24,65	1,5955
18,597	0,9961	33,23	0,9753	159,99	0,5314	23,3	1,5081
18,61	0,9968	33,35	0,9789	170,61	0,5667	22,01	1,4252
18,617	0,9972	33,46	0,9821	183,04	0,6080	20,79	1,3456
18,63	0,9979	33,58	0,9856	197,8	0,6570	19,63	1,2706
18,64	0,9984	33,69	0,9888	215,61	0,7162	18,52	1,1987
18,65	0,9989	33,82	0,9927	237,53	0,7890	17,45	1,1294
18,66	0,9995	33,95	0,9965	265,16	0,8807	16,43	1,0634
18,67	1,0000	34,07	1,0000	301,07	1,0000	15,45	1,0000
18,68	1,0005	34,201	1,0038	349,62	1,1613	14,51	0,9392
18,69	1,0011	34,33	1,0076	418,95	1,3915	13,61	0,8809
18,7	1,0016	34,47	1,0117	525,99	1,7471	12,74	0,8246
18,71	1,0021	34,6	1,0156	713,03	2,3683	11,91	0,7709
18,72	1,0027	34,74	1,0197	1123,2	3,7309	11,11	0,7191
18,73	1,0032	34,88	1,0238	2746,8	9,1238	10,34	0,6693
18,74	1,0037	35,029	1,0281	5656,1	18,7868	9,59	0,6207
18,75	1,0043	35,17	1,0323	1364,4	4,5321	8,88	0,5748
18,76	1,0048	35,32	1,0367	766,36	2,5455	8,19	0,5301
18,77	1,0054	35,48	1,0414	528,14	1,7542	7,5	0,4854

В таблице 24 представлены результаты усиления  $Z_{вх}$  на 5 и 7 фильтре, при  $Z_{вхv.0} = 9,96$  Ом,  $Z_{вхv.0} = 8,57$  Ом,  $Z_{вхv.0} = 8,89$  Ом, для 3, 4, и 6 гармоник соответственно. В данном случае ситуация аналогично первой ситуации, 5 гармоника также фильтруется при этом, значения усиления находятся примерно в одном диапазоне, что позволяет нам более точно настраивать фильтр.

Таблица 24 – усиление Z<sub>вх</sub> на 5 и 7 фильтре

3 гармоника		4 гармоника		6 гармоника	
Z <sub>вхv i</sub>	Z <sub>вхv.i</sub> /Z <sub>вхv 0</sub>	Z <sub>вхv i</sub>	Z <sub>вхv.i</sub> /Z <sub>вхv 0</sub>	Z <sub>вхv i</sub>	Z <sub>вхv.i</sub> /Z <sub>вхv 0</sub>
1	2	3	4	7	8
9,59	0,9629	8,05	0,9393	8,24	0,9269
9,630	0,9669	8,10	0,9452	8,3	0,9336
9,67	0,9709	8,16	0,9522	8,37	0,9415
9,7	0,9739	8,21	0,9580	8,44	0,9494
9,75	0,9789	8,26	0,9638	8,5	0,9561
9,78	0,9819	8,31	0,9697	8,57	0,9640
9,82	0,9859	8,37	0,9767	8,63	0,9708
9,86	0,9900	8,42	0,9825	8,69	0,9775
9,89	0,9930	8,47	0,9883	8,76	0,9854
9,93	0,9970	8,52	0,9942	8,82	0,9921
9,96	1,0000	8,57	1,0000	8,89	1,0000
9,99	1,0030	8,62	1,0058	8,95	1,0067
10,03	1,0070	8,67	1,0117	9,01	1,0135
10,07	1,0110	8,72	1,0175	9,07	1,0202
10,09	1,0131	8,76	1,0222	9,14	1,0281
10,13	1,0171	8,81	1,0280	9,19	1,0337
10,16	1,0201	8,86	1,0338	9,26	1,0416
10,19	1,0231	8,91	1,0397	9,32	1,0484
10,23	1,0271	8,95	1,0443	9,38	1,0551
10,26	1,0301	8,99	1,0490	9,44	1,0619
10,29	1,0331	9,04	1,0548	9,49	1,0675

По выше показанным таблица, были построены графики на рисунках 26-29.

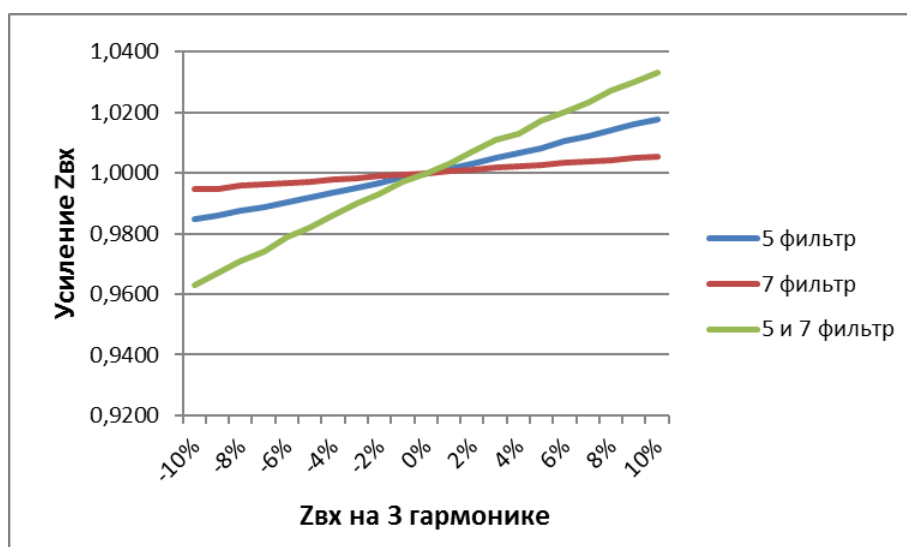


Рисунок 26 – усиление напряжения на 3 гармонике

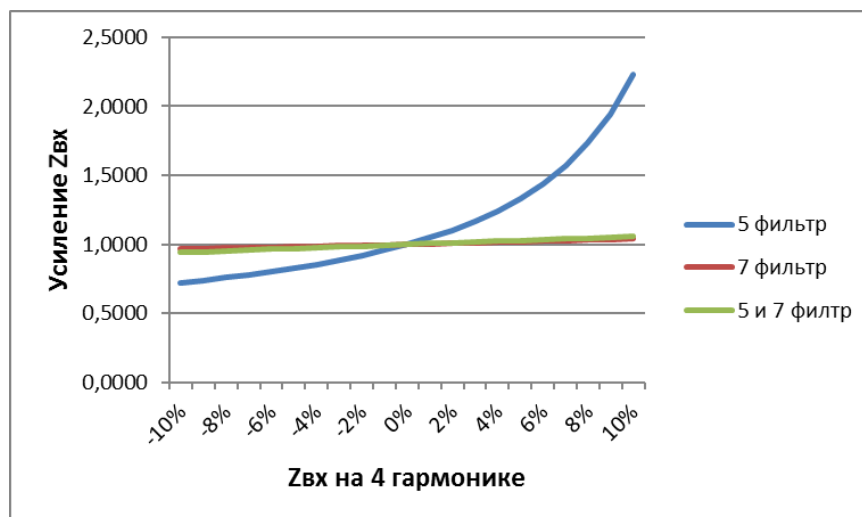


Рисунок 27 – усиление входного сопротивления на 4 гармонике



Рисунок 28 – усиление входного сопротивления на 5 гармонике

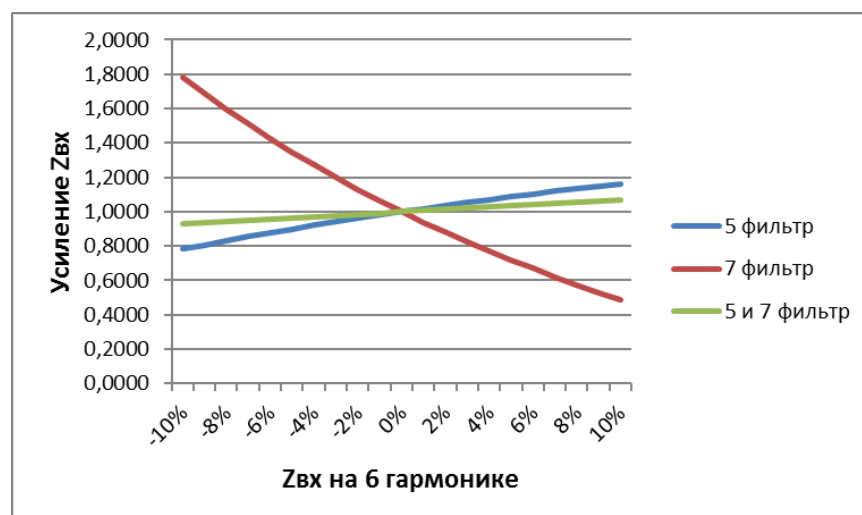


Рисунок 29 – усиление входного сопротивления на 6 гармонике

Как видно из выше представленных графиков на 3, 4 и 6 гармонике, практически нет изменения входного сопротивления при отклонении настроек

фильтра. Но например при увеличении сопротивления реактора более чем на 4% увеличивает входное сопротивление более чем в 2 раза, из за чего входное напряжение на шинах подключение может уменьшиться в 2 раза, что приведет к поломке оборудования или выхода его из строя, что в свою очередь может привести к невыполнению нормы работ или несчастным случаем на производстве.

Также при уменьшении на 8%, 6 гармоника на 7 фильтре имеет значительно изменение входного сопротивления, что также может привести к поломкам оборудования, повышенное напряжение весьма пагубно влияет на систему, а также на качество электроэнергии, что в свою очередь, может привести к поломкам не только на производстве, а также у потребителей.

Большое внимание стоит уделить изменению 5 гармоники. На 7 фильтре, при изменении более чем на 4%, происходит резкое увеличение входного сопротивления, вплоть до увеличения более чем в 18 раз, если 2 кратное увеличение уже может привести к серьезным поломкам, то при 18 кратном изменении оборудование может не запуститься вовсе, а подключенные кабеля сгореть от повышенных значений токов или напряжений.

При этом 5 фильтр настроен на компенсирование 5 гармоники, благодаря чему, он нивелирует эту самую гармонику, которую не может компенсировать 7 фильтр из-за других настроек. Из рисунка 28 видно, что при использовании обоих фильтров одновременно 5 гармоника отсутствует, что позволяет нам изменять сопротивление реактора на 7 фильтре и компенсировать это изменение, с помощью фильтра 5 гармоники. Но так как 7 фильтр на 5 гармонике имеет сильное усиление после определенных значений, у нас присутствует только небольшой диапазон регулирования.

### 7.1 Анализ изменения гармонических составляющих напряжения с другим сопротивлением фильтров

В таблице 25 представлены результаты усиления  $Z_{вх}$  на 5 фильтре, при  $Z_{вхv.0} = 25,01 \text{ Ом}$ ,  $Z_{вхv.0} = 88,08 \text{ Ом}$ ,  $Z_{вхv.0} = 9,35 \text{ Ом}$ , для 3, 4, и 6 гармоник соответственно. В данном случае 5 гармоника полностью фильтруется. Однако на 4 гармонике появляются усиления, достигающие до 5 кратных значений, из чего можно сделать вывод, что в данном случае диапазон регулирования уменьшается и фильтр будет труднее настроить.

Таблица 25 – усиление  $Z_{вх}$  на 5 фильтре

3 гармоника		4 гармоника		6 гармоника	
$Z_{вхv.i}$	$Z_{вхv.i}/Z_{вхv.0}$	$Z_{вхv.i}$	$Z_{вхv.i}/Z_{вхv.0}$	$Z_{вхv.i}$	$Z_{вхv.i}/Z_{вхv.0}$
1	2	3	4	7	8
24,19	0,9672	449,36	5,1017	6,99	0,7476
24,27	0,9704	331,98	3,7691	7,25	0,7754



24,35	0,9736	261,53	2,9692	7,50	0,8021
24,42	0,9764	214,57	2,4361	7,75	0,8289
24,50	0,9796	181,01	2,0551	7,99	0,8545
24,58	0,9828	155,85	1,7694	8,23	0,8802
24,66	0,9860	136,27	1,5471	8,46	0,9048
24,75	0,9896	120,61	1,3693	8,69	0,9294
24,84	0,9932	107,79	1,2238	8,91	0,9529
24,92	0,9964	97,12	1,1026	9,13	0,9765
25,01	1,0000	88,08	1,0000	9,35	1,0000
25,10	1,0036	80,34	0,9121	9,56	1,0225
25,19	1,0072	73,62	0,8358	9,76	1,0439
25,29	1,0112	67,75	0,7692	9,96	1,0652
25,38	1,0148	62,57	0,7104	10,16	1,0866
25,48	1,0188	57,96	0,6580	10,36	1,1080
25,58	1,0228	53,84	0,6113	10,55	1,1283
25,68	1,0268	50,13	0,5691	10,74	1,1487
25,78	1,0308	46,77	0,5310	10,92	1,1679
25,89	1,0352	43,72	0,4964	11,10	1,1872
26,00	1,0396	40,93	0,4647	11,27	1,2053

В таблице 26 представлены результаты усиления  $Z_{\text{вх}}$  на 7 фильтре, при  $Z_{\text{вхV.0}} = 21,98 \text{ Ом}$ ,  $Z_{\text{вхV.0}} = 10,44 \text{ Ом}$ ,  $Z_{\text{вхV.0}} = 61,48 \text{ Ом}$ ,  $Z_{\text{вхV.0}} = 11,07 \text{ Ом}$  для 3, 4, 5 и 6 гармоник соответственно. В данном случае 5 гармоника уже не фильтруется. На 4 гармонике также как и в прошлом случае у нас присутствуют усиления при любом варьировании, из чего следует, что в данном случае мы не сможем перенастроить фильтр при необходимости.

Таблица 26 – усиление  $Z_{\text{вх}}$  на 7 фильтре

3 гармоника		4 гармоника		5 гармоника		6 гармоника	
$Z_{\text{вхV.i}}$	$Z_{\text{вхV.i}}/Z_{\text{вхV.0}}$	$Z_{\text{вхV.i}}$	$Z_{\text{вхV.i}}/Z_{\text{вхV.0}}$	$Z_{\text{вхV.i}}$	$Z_{\text{вхV.i}}/Z_{\text{вхV.0}}$	$Z_{\text{вхV.i}}$	$Z_{\text{вхV.i}}/Z_{\text{вхV.0}}$
1	2	3	4	5	6	7	8
21,77	0,9904	54,68	5,2375	90,73	1,4758	12,71	1,1481
21,79	0,9914	55,11	5,2787	86,95	1,4143	15,2	1,3731
21,81	0,9923	55,56	5,3218	83,41	1,3567	14,7	1,3279
21,83	0,9932	56,01	5,3649	80,08	1,3025	14,21	1,2836
21,85	0,9941	56,47	5,4090	76,95	1,2516	13,73	1,2403
21,87	0,9950	56,95	5,4550	74	1,2036	13,27	1,1987
21,89	0,9959	57,44	5,5019	71,22	1,1584	12,81	1,1572
21,91	0,9968	57,95	5,5508	68,59	1,1156	12,36	1,1165
21,94	0,9982	58,46	5,5996	66,09	1,0750	11,92	1,0768
21,96	0,9991	59	5,6513	63,73	1,0366	11,49	1,0379
21,98	1,0000	10,44	1,0000	61,48	1,0000	11,07	1,0000
22	1,0009	60,11	5,7577	59,35	0,9654	10,65	0,9621
22,03	1,0023	60,69	5,8132	57,32	0,9323	10,25	0,9259
22,05	1,0032	61,29	5,8707	55,38	0,9008	9,85	0,8898
22,07	1,0041	61,9	5,9291	53,53	0,8707	9,46	0,8546

22,09	1,0050	62,54	5,9904	51,77	0,8421	9,08	0,8202
22,11	1,0059	63,19	6,0527	50,08	0,8146	8,71	0,7868
22,14	1,0073	63,86	6,1169	48,46	0,7882	8,34	0,7534
22,16	1,0082	64,56	6,1839	46,91	0,7630	7,97	0,7200
22,18	1,0091	65,28	6,2529	45,43	0,7389	7,62	0,6883
22,21	1,0105	66,02	6,3238	44	0,7157	7,27	0,6567

В таблице 27 представлены результаты усиления  $Z_{\text{вх}}$  на 5 и 7 фильтре, при  $Z_{\text{вхв.0}} = 24,76 \text{ Ом}$ ,  $Z_{\text{вхв.0}} = 10,44 \text{ Ом}$ ,  $Z_{\text{вхв.0}} = 8,51 \text{ Ом}$ , для 3, 4, и 6 гармоник соответственно. В данном случае 5 гармоника полностью фильтруется. А также пропадают сколько-нибудь значительные усиления, остаются его небольшие значения, не влияющие сильно на систему. Благодаря этому диапазон варьирования в данном случае весьма обширен и позволяет нам провести более точную настройку фильтра.

Таблица 27 – усиление  $Z_{\text{вх}}$  на на 5 и 7 фильтре

3 гармоника		4 гармоника		6 гармоника	
$Z_{\text{вхв. i}}$	$Z_{\text{вхв. i}}/Z_{\text{вхв. 0}}$	$Z_{\text{вхв. i}}$	$Z_{\text{вхв. i}}/Z_{\text{вхв. 0}}$	$Z_{\text{вхв. i}}$	$Z_{\text{вхв. i}}/Z_{\text{вхв. 0}}$
1	2	3	4	7	8
26,15	1,0561	12,3	1,1782	5,73	0,6733
26,01	1,0505	12,12	1,1609	6	0,7051
25,87	1,0448	11,93	1,1427	6,28	0,7380
25,73	1,0392	11,74	1,1245	6,56	0,7709
25,59	1,0335	11,55	1,1063	6,84	0,8038
25,45	1,0279	11,37	1,0891	7,11	0,8355
25,31	1,0222	11,18	1,0709	7,39	0,8684
25,17	1,0166	11	1,0536	7,67	0,9013
25,04	1,0113	10,81	1,0354	7,95	0,9342
24,89	1,0053	10,63	1,0182	8,23	0,9671
24,76	1,0000	10,44	1,0000	8,51	1,0000
24,62	0,9943	10,25	0,9818	8,79	1,0329
24,47	0,9883	10,07	0,9646	9,07	1,0658
24,34	0,9830	9,88	0,9464	9,34	1,0975
24,2	0,9774	9,7	0,9291	9,62	1,1304
24,06	0,9717	9,52	0,9119	9,9	1,1633
23,92	0,9661	9,33	0,8937	10,18	1,1962
23,78	0,9604	9,14	0,8755	10,46	1,2291
23,64	0,9548	8,95	0,8573	10,74	1,2620
23,5	0,9491	8,77	0,8400	11,01	1,2938
23,36	0,9435	8,58	0,8218	11,29	1,3267

По выше показанным таблицам, были построены графики на рисунках 30-33.

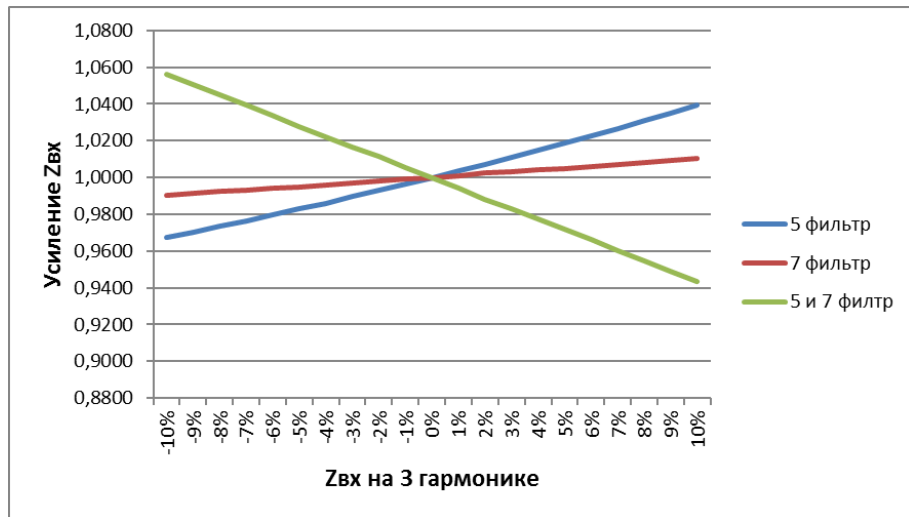


Рисунок 30– усиление входного сопротивления на 3 гармонике

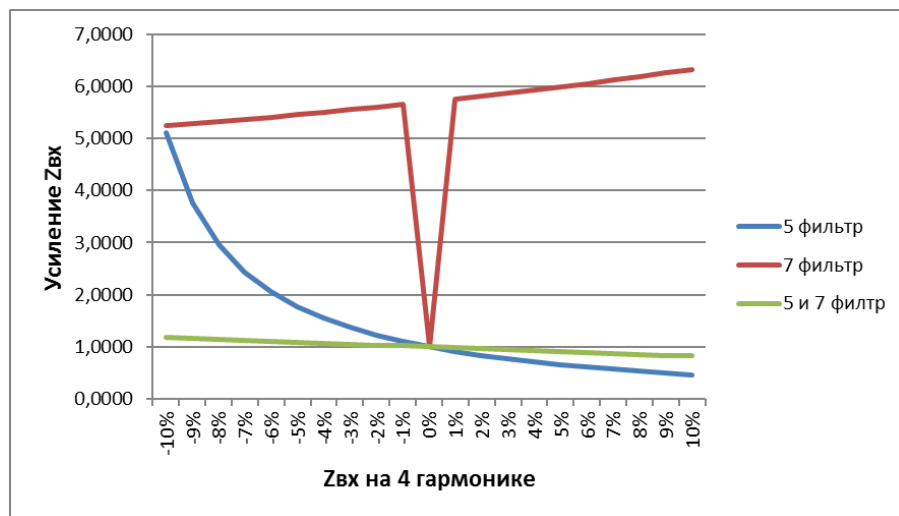


Рисунок 31 – усиление входного сопротивления на 4 гармонике



Рисунок 32 – усиление входного сопротивления на 5 гармонике

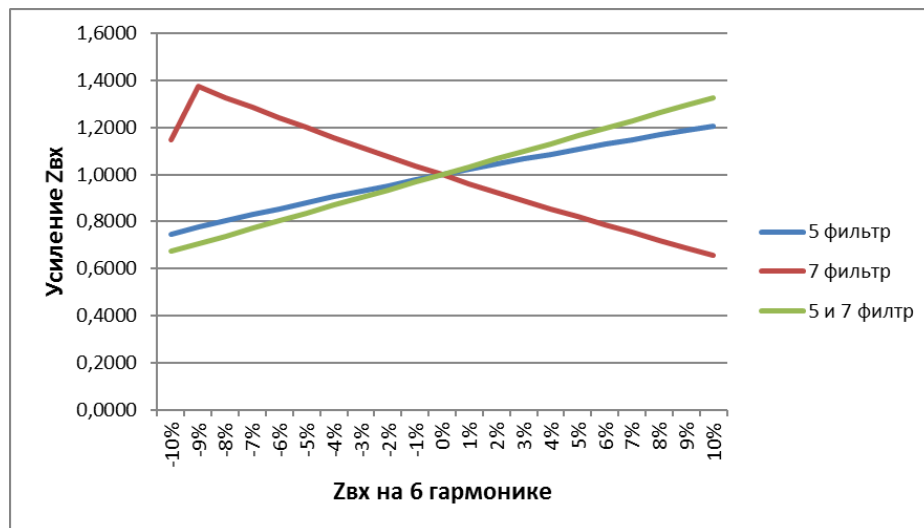


Рисунок 33 – усиление входного сопротивления на 6 гармонике

При использовании фильтров с другими сопротивлениями реактора, можно сделать вывод, что ситуация осталась практически такой же, как и в первом случае. Однако на 4 гармонике видно, что, при изменении сопротивления реактора в большую или меньшую сторону, на его первоначальном значении происходит резкий скачок входного сопротивления на значение равное 1. Это говорит о том, что при правильной настройке фильтра, он будет полностью поглощать необходимую гармонику.

На 5 гармонике ситуация повторяется с прошлыми расчетами, за исключением того, что в отличие от первого случая, где происходит резкий скачок на высокие значения, во втором случае у нас получаются более низкие значения и также плавный спад от высоких значений к низким.

## 8 Анализ влияния гармонических составляющих напряжения на шинах подключения нагрузки на его величину

В данном пункте рассматривается усиление напряжения, после изменения настройки фильтра гармоники.

Расчет будет производиться по следующим формулам:

$$\Delta U = \frac{K_i^2}{\left(\frac{Z_{вх.i}}{Z_{вх.нач}}\right)^2} \quad (7.1)$$

Где:

$Z_{вх.нач}$  – начальное входное сопротивление;

$Z_{вх.i}$  – входное сопротивление после изменения;

$K_i$  – коэффициент гармонических составляющих;

Значения коэффициента мы получаем из замеров гармонических составляющих, сделанных на «ПС Майрыхская». Замеры представлены на рисунке 7.1.

$$\Delta U_{\text{сумм}} = \sqrt{1 + \Delta U_3 + \Delta U_4 + \Delta U_5 + \Delta U_6} \quad (7.2)$$

Где:

$\Delta U_{\text{сумм}}$  – суммарное усиление напряжения;

$\Delta U_i$  – усиление напряжения на  $i$ -ой гармонике;

Результаты расчетов представлены в таблицах 29-31.

Из таблицы 29 мы видим, что наибольшее усиление гармоник доходит до 5%, что практически не будет оказывать влияния на систему.

Таблица 29 – усиление напряжения при различном  $\Delta X_{\text{реактора}}$  на 5 фильтре

$\Delta X_{\text{реактора}}$	3 гармоника	4 гармоника	6 гармоника	Суммарное усиление
1	2	3	4	5
-10%	0,051	0,005	0,002	1,0286
-9%	0,051	0,005	0,002	1,0288
-8%	0,052	0,006	0,002	1,0291
-7%	0,052	0,006	0,002	1,0294
-6%	0,052	0,006	0,002	1,0297
-5%	0,052	0,007	0,002	1,0300
-4%	0,052	0,007	0,002	1,0304
-3%	0,052	0,008	0,002	1,0307
-2%	0,053	0,008	0,002	1,0312
-1%	0,053	0,009	0,002	1,0317
0%	0,053	0,010	0,003	1,0322
1%	0,053	0,011	0,003	1,0328
2%	0,053	0,012	0,003	1,0335
3%	0,053	0,014	0,003	1,0343
4%	0,054	0,015	0,003	1,0353
5%	0,054	0,018	0,003	1,0365
6%	0,054	0,021	0,003	1,0381
7%	0,054	0,025	0,003	1,0401
8%	0,054	0,030	0,003	1,0429
9%	0,055	0,038	0,003	1,0467
10%	0,055	0,050	0,003	1,0525

Из таблицы 30 мы видим, что при изменении настройки реактора на 7 фильтре, уже заметно сильное усиление. В данном случае при изменении настройки фильтра более чем на 3%, происходит усиление напряжения более чем на 70%, что уже достаточно сильно влияет на систему и на качество электроэнергии. Например при изменении настройки на 7%, суммарное усиление равняется 11,32, что является очень большим значением. Наибольшее усиление на 7% имеет 5 гармоника, так как в данном случае регулируется только 7 фильтр, а из рисунка 28 мы знаем, что 5 гармоника имеет наибольшее значение в сети, то и усиление 5 гармоники у нас очень заметно. Из этого

можно сделать вывод, что на предприятии не следует использовать фильтры по отдельности.

Таблица 30 – усиление напряжения при различном  $\Delta X_{\text{реактора}}$  на 7 фильтре

$\Delta X_{\text{реактора}}$	3 гармоника	4 гармоника	5 гармоника	6 гармоника	Суммарное усиление
1	2	3	4	5	6
-10%	0,052	0,009	0,073	0,008	1,0690
-9%	0,052	0,009	0,081	0,007	1,0723
-8%	0,052	0,009	0,090	0,006	1,0764
-7%	0,052	0,010	0,102	0,006	1,0814
-6%	0,053	0,010	0,116	0,005	1,0876
-5%	0,053	0,010	0,133	0,005	1,0954
-4%	0,053	0,010	0,155	0,004	1,1054
-3%	0,053	0,010	0,185	0,004	1,1184
-2%	0,053	0,010	0,224	0,003	1,1357
-1%	0,053	0,010	0,279	0,003	1,1597
0%	0,053	0,010	0,360	0,003	1,1939
1%	0,053	0,010	0,485	0,002	1,2453
2%	0,053	0,010	0,697	0,002	1,3275
3%	0,053	0,010	1,099	0,002	1,4710
4%	0,053	0,010	2,019	0,001	1,7562
5%	0,053	0,010	5,011	0,001	2,4649
6%	0,053	0,010	29,967	0,001	5,5707
7%	0,053	0,011	127,06	0,001	11,3192
8%	0,053	0,011	7,394	0,001	2,9085
9%	0,053	0,011	2,333	0,001	1,8432
10%	0,053	0,011	1,108	0,001	1,4740

Проанализировав таблицу 31, мы видим, что при регулировании обоих фильтров одновременно, усиление которое мы видели в таблице 30, пропадает. Помимо этого, по сравнению с таблицей 29, где мы регулировали только 5 фильтр, в данном случае, максимальное усиление напряжения уменьшилось с 5% до 3%, что дает нам возможность более точной регулировки фильтра.

Таблица 31 – усиление напряжения при различном  $\Delta X_{\text{реактора}}$  на 5 и 7 фильтре

$\Delta X_{\text{реактора}}$	3 гармоника	4 гармоника	6 гармоника	Суммарное усиление
1	2	3	4	5
-10%	0,049	0,009	0,002	1,0296
-9%	0,049	0,009	0,002	1,0298
-8%	0,050	0,009	0,002	1,0301
-7%	0,050	0,009	0,002	1,0303
-6%	0,051	0,009	0,002	1,0307
-5%	0,051	0,009	0,002	1,0309
-4%	0,051	0,010	0,002	1,0312
-3%	0,052	0,010	0,002	1,0314

Продолжение таблицы 31

-2%	0,052	0,010	0,002	1,0317
-1%	0,053	0,010	0,002	1,0320
0%	0,053	0,010	0,003	1,0322
1%	0,053	0,010	0,003	1,0324
2%	0,054	0,010	0,003	1,0327
3%	0,054	0,010	0,003	1,0330
4%	0,054	0,010	0,003	1,0331
5%	0,055	0,011	0,003	1,0334
6%	0,055	0,011	0,003	1,0337
7%	0,055	0,011	0,003	1,0339
8%	0,056	0,011	0,003	1,0342
9%	0,056	0,011	0,003	1,0344
10%	0,056	0,011	0,003	1,0346

При использовании 5 и 7 фильтра одновременно, мы видим, что максимальное усиление упало до 3%, что практически не влияет на систему. Опять же, по сравнению с использованием только 5 фильтра, где усиление равно 14%, целесообразнее будет подключить оба фильтра.

Делая вывод из выше представленных таблиц, можно сказать, что использовать фильтры по отдельности будет не целесообразно, потому что при использовании только 5 фильтра, мы получаем хоть незначительное, но заметное усиление при определенных значениях регулирования. При использовании же 7 фильтра у нас присутствует весьма сильное усиление. В том случае, когда используются оба фильтра, по таблице 31, можно увидеть, что усиление незначительное, а также диапазон регулирования достаточно обширный. Из чего рекомендуется использовать не предприятию оба фильтра одновременно.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения работы была достигнута цель и выполнены следующие задачи:

1. Разработана математическая модель для расчета частотной характеристики входного сопротивления узла нагрузки.
2. Проведен с использованием математической модели числовых экспериментов по определению диапазона регулирования реактивной мощности фильтровых звеньев.
3. Выбраны критерии управления параметрами ФКУ.
4. Выбран алгоритм и устройств регулирования мощности фильтровых звеньев ФКУ.

После анализа замеров ПС «Майрыхская», были выявлены проблемы с падением напряжения, а также с наличием ВГС в сети, что пагубно влияет на качество выдаваемой подстанцией электроэнергии и на саму систему.

Для того, чтобы изучить влияние этих факторов на систему были выведены формулы, по которым проводились расчеты, для анализа влияния сопротивления реактора на входное напряжение на шинах подключения ФКУ, а также формулы для анализа усиления напряжения при изменении сопротивления реактора. В ходе расчетов и анализа было выяснено, что наиболее благоприятная ситуация получается при использовании на производстве сразу 2 фильтров одновременно.

Потому что, при использовании 5 и 7 фильтров по отдельности в сети возникает сильное усиление входного сопротивления. Кроме того, на рисунках 26-29 видно, что при использовании фильтров по отдельности, в сети появляется усиление гармоник. При использовании 5 и 7 фильтра одновременно, усиление также остается, но это усиление незначительно, благодаря чему мы получаем возможность более обширного регулирования фильтров.

Далее расчеты усиления напряжения показали аналогичную ситуацию, при использовании фильтров по отдельности, в сети появляется усиление напряжения, при изменении настройки фильтров, в некоторых ситуациях усиление доходило до 18 кратных значений.

Проблемы с отклонением напряжения на ПС «Майрыхская» были связаны, с наличием ВГС в сети. Преимущественно на подстанции присутствуют 5 и 7 гармоника. Они вызывают отклонение напряжения в сети из-за чего ухудшается качество электроэнергии.

Если при наличии рабочего ФКУ отклонение напряжения и ВГС не компенсируются, рекомендуется проверить правильность подключения и настройки ФКУ. К тому же рекомендуется использовать для компенсации одновременно 5 и 7 фильтры, для избегания усиления напряжения.

Таким образом, если использовать все вышесказанное, то можно значительно повысить качество выдаваемой электроэнергии.



## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Выпускная квалификационная работа по направлению 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника» : метод. указания / сост. Н. В. Дулесова; Сиб. федер. ун-т, ХТИ – филиал СФУ. – Абакан : Ред.изд. сектор ХТИ – филиала СФУ, 2017.
2. Влияние высших гармоник напряжения и тока на работу электрооборудования [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://electricalschool.info/main/elsnabg/260-vlijanie-vysshikh-garmonik.html>
3. Рогозина, Д. А. Специальные фильтрокомпенсирующие устройства как метод борьбы с несинусоидальностью напряжения / Д. А. Рогозина, Т. С. Хворова. // Молодой ученый. — 2016. — URL: <https://moluch.ru/archive/128/35506/> (дата обращения: 16.11.2023).
4. Боярская, Н. П. , Синтез фильтрокомпенсирующих устройств для систем электроснабжения : монография / Н. П. Боярская, В. П. Довгун, Д. Э. Егоров. — Красноярск : СФУ, 2014.
5. Боярская, Н. П. , Широкополосные фильтры гармоник : Н. П. Боярская, В. П. Довгун, Д. Э. Егоров. — Красноярск : СФУ, 2014.
6. Довгун, В. П. Синтез пассивных фильтрокомпенсирующих устройств. / В. П. Довгун, Н. П. Боярская, В. В. Новиков // Изв. вузов. Проблемы энергетики. – 2011.
7. Вагин, Г. Я. Электромагнитная совместимость в электроэнергетике / Г. Я. Вагин, А. Б. Лоскутов, А. А. Севостьянов. – Н. Новгород : НГТУ, 2004.
8. Дьяков, А. Ф. Электромагнитная совместимость в электроэнергетике и электротехнике / А. Ф. Дьяков, Б. К. Максимов, Р. К. Борисов и др.; под редакцией А. Ф. Дьякова. – М. : Энергоатомиздат, 2003.
9. Боярская, Н. П. Проблемы компенсации высших гармоник в распределительных сетях агропромышленного комплекса : монография / Н. П. Боярская, В. П. Довгун, Я. А. Кунгс. — Красноярск : КрасГАУ, 2012.
10. Боярская, Н. П. Анализ качества электроэнергии в распределительных сетях АПК / Н. П. Боярская, В. П. Довгун, С. А. Темербаев // Вестник КрасГАУ : научный журнал / Красноярский государственный аграрный университет. — Красноярск, 2012.
11. Боярская, Н. П. Гармонический анализ процессов в электрических сетях с нелинейными нагрузками / Н. П. Боярская, В. П. // Вестник КрасГАУ : научный журнал / Красноярский государственный аграрный университет. — Красноярск, 2010.
12. Довгун, В. П. Синтез пассивных фильтрокомпенсирующих устройств / В. П. Довгун, Н. П. Боярская, В. В. Новиков // Известия вузов. Проблемы энергетики : научно-технический и производственный

- журнал / Казанский государственный энергетический университет. — Казань, 2011.
13. Довгун, В. П. Синтез широкополосных фильтров гармоник / В. П. Довгун, Д. Э. Егоров, А. Ф. Синяговский // Известия вузов. Проблемы энергетики : научно-технический и производственный журнал / Казанский государственный энергетический университет. — Казань, 2014.
  14. Егоров, Д. Э. Совершенствование методов расчета многофункциональных фильтрокомпенсирующих устройств для сетей 10-0,4 кВ : дис. ... канд. техн. Наук : 05.14.02 / Егоров Денис Эдуардович. — Красноярск, 2015
  15. Жежеленко, И. В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий / И. В. Жежеленко. — Изд. 4-е, перераб. и доп. — Москва : Энергоатомиздат, 2000.
  16. Железко, Ю. С. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии. Руководство для практических расчетов / Ю. С. Железко. — Москва : ЭНАС, 2009.
  17. Карташев, И. И. Управление качеством электроэнергии / И. И. Карташев, В. Н. Тульский, Р. Г. Шамонов ; под ред. Ю. В. Шарова. — Москва : Издательский дом МЭИ, 2006.
  18. Скакунов, Д. А. Методы и средства обеспечения качества электрической энергии в распределительных сетях 0.4-6 кВ Ачинского НПЗ / Д. А. Скакунов // Мир нефтепродуктов. Вестник нефтяных компаний / Международная Академия Информатизации. — Москва, 2012.
  19. Темербаев, С. А. Анализ качества электроэнергии в городских распределительных сетях 0,4 кВ / С. А. Темербаев, Н. П. Боярская, В. П. Довгун // Журнал Сибирского федерального университета. Серия техника и технологии / Сибирский федеральный университет. — Красноярск, 2013.
  20. ГОСТ 13109—97 Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. — Взамен ГОСТ 13109—87 ; введ. 01.01.1999. — Москва : Международный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 2006. —
  21. ГОСТ 23875—88 Качество электрической энергии. Термины и определения. — Взамен ГОСТ 23875—79 ; введ. 30.06.1989. — Москва : ИПК Издательство стандартов, 2008.
  22. Абрамович Б.Н., Сычев Ю.А., Жуковский Ю.Л. Методы и средства повышения уровня энергосбережения и энергоэффективности на горных предприятиях. Горное оборудование и электромеханика. 2015.
  23. Абрамович Б.Н., Сычев Ю.А., Мингазов А.С., Полищук В.В. О компенсации высших гармоник тока и напряжения, создаваемых источником бесперебойного питания. Нефтяное хозяйство. 2013.

- 24.Абрамович Б.Н., Сычев Ю.А. Методы и средства обеспечения энергетической безопасности промышленных предприятий с непрерывным технологическим циклом. Промышленная энергетика. 2016.
- 25.Абрамович Б.Н., Сычев Ю.А. Повышение качества электрической энергии с помощью параллельного активного фильтра в системах электроснабжения промышленных предприятий. Электричество. 2012.
- 26.Агунов М.В., Агунов А.В., Вербова Н.М. Новый подход к измерению электрической мощности. // Промышленная энергетика, №2, 2004.
- 27.Агунов А.В. Статический компенсатор неактивных составляющих мощности с полной компенсацией гармонических составляющих тока нагрузки. // Электротехника, №2, 2003.
- 28.Агунов А.В., Титова Т.С., Кручек В.А. О построении систем управления качеством электроэнергии. Электротехника. 2016.
- 29.Агунов А.В. Управление качеством электроэнергии при несинусоидальных режимах. Монография / А. В. Агунов ; М-во образования и науки Российской Федерации, Гос. 295 образовательное учреждение высш. проф. образования "Санкт-Петербургский гос. морской технический ун-т". Санкт-Петербург, 2009.
- 30.Жежеленко И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий. - 4-е изд., перераб. и доп. - М: Энергоатомиздат. 2000.
- 31.Добрусин Л.А. Фильтрокомпенсирующие устройства для преобразовательной техники. – М.: НТФ “Энергопрогресс”, 2003.
- 32.Управление качеством электроэнергии / И.И. Карташев, В.Н. Тульский, Р.Г. Шамонов и др.; под ред. Ю.В. Шарова. – М.: МЭИ. 2006.
- 33.Абрамович, Б.Н. Повышение качества электрической энергии с помощью параллельного активного фильтра в системах электроснабжения промышленных предприятий/ Б.Н. Абрамович, Ю.А. Сычев // Электричество. - 2012.
- 34.Абрамович, Б.Н. Оценка эффективности гибридных систем коррекции формы кривых тока и напряжения в электрических сетях с распределенной генерацией / Б.Н. Абрамович, Ю.А. Сычев, Р.Ю. Зимин // Промышленная энергетика. - 2015.
- 35.Алгоритм расчета потерь мощности, обусловленных высшими гармониками и интергармониками на основе вейвлет-преобразования/ Д.С. Осипов, А.Г. Лютаревич, В.А. Ткаченко, Я.Ю. Логунова // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. - 2023.
- 36.Анализ несинусоидальных режимов в системах электроснабжения горных предприятий с нелинейной нагрузкой и конденсаторными установками / Ю.А. Сычев, В.Н. Костин, В.А. Сериков, Аладьин М.Е.// Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023.

- 37.Белей, В.Ф. Стандарты в области качества электроэнергии: проблемы и тенденции/ В.Ф. Белей, М.С. Харитонов. // Информационные ресурсы России. - 2016.
- 38.Бош, В.И. Резонансные явления от гармонических составляющих в системах электроснабжения/ В.И. Бош // Промышленная энергетика. - 2006.
- 39.Булычева, Е.А. Анализ современных методов определения фактического вклада потребителей в общий уровень несинусоидальности напряжения электрической сети. Часть 1 / Е.А. Булычева, С.А. Янченко // Методы отклонений измеряемых величин // Промышленная энергетика. - 2019.
- 40.Булычева, Е.А. Анализ современных методов определения фактического вклада потребителей в общий уровень несинусоидальности напряжения электрической сети. Часть 2 / Е.А. Булычева, С.А. Янченко // Методы статистического анализа данных // Промышленная энергетика. - 2019.
- 41.Булычева, Е.А. Идентификация высших гармоник в реальном времени в электрических сетях с переменным режимом работы/ Е.А. Булычева, 149 Г.С. Кулешова, С.А. Янченко // Промышленная энергетика. - 2020.
- 42.Булычева, Е.А. Экспериментальное определение влияния источников искажений на несинусоидальность напряжения сети/ Е.А. Булычева, С.А. Янченко // В сборнике: Управление качеством электрической энергии. Сборник трудов Международной научно-практической конференции. - 2020.
- 43.Влияние высших гармоник тока на режимы работы кабелей распределительной сети 380 В/ В.Н. Тульский, И.И. Карташев, М.Г. Симуткин, Р.Р. Насыров // Промышленная энергетика. - 2013.
- 44.Довгун, В.П. Синтез пассивных фильтрокомпенсирующих устройств/ В.П. Довгун, Н.П. Боярская, В.В. Новиков// Проблемы энергетики. – 2011.
- 45.Дыбко, М.А. Анализ динамических параметров активных силовых фильтров на базе параллельных инверторов напряжения/ М.А. Дыбко, В.Г. Токарев, О.В. Нос // Электротехника. - 2020.
- 46.Зацепина, В.И. Анализ воздействия негативных сетевых возмущений резкопеременного характера на эффективность функционирования систем электроснабжения/ В.И. Зацепина, Е.П. Зацепин, П.И. Скоморохов // Вестник Тамбовского государственного технического университета. - 2019.
- 47.Зацепина, В.И. Анализ качества электроэнергии при наличии частотных искажений/ В.И. Зацепина, О.Я. Шачнев, Ю.П. Шачнева // Вести высших учебных заведений Черноземья. - 2022.
- 48.Зацепина, В.И. Статистический анализ искажений напряжения в системах передачи, распределения и потребления электрической

- энергии/ В.И. Зацепина, Е.П. Зацепин // Вести высших учебных заведений Черноземья. - 2011.
- 49.Мещеряков, В.Н. Оптимизация системы управления параллельным активным фильтром электроэнергии для компенсации нелинейных искажений в трехфазных электрических сетях / В.Н. Мещеряков, М.М. Хабибуллин // Материалы XIX международной научно-технической конференции студентов и 155 аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика». – Москва: Изд-во МЭИ. 2013.
- 50.Борисов П.А. Определение составляющих полной мощности энергосистем электротехнических комплексов / П.А. Борисов, В.С. Томасов // Математика в приложениях. – 2004.
- 51.Моделирование влияния величины нелинейной нагрузки на качество электроэнергии промышленных электротехнических систем / Н.Н. Портнягин, М.С. Ершов, П.Ю. Барбасов, М.Ю. Чернев // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. - 2017.
- 52.Сериков В.А. Повышение качества электроэнергии активными фильтрокомпенсирующими устройствами в промышленных электротехнических комплексах с нелинейной нагрузкой и конденсаторными установками при резонансных режимах : дис. ... на соиск. ученой степени канд. техн. Наук / Сериков В.А. – Санкт-Петербург – 2023.
- 53.Платонова Е.В. ПРИМЕНЕНИЕ ФИЛЬТРОКОМПЕНСИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА НАПРЯЖЕНИЯ УГОЛЬНЫХ РАЗРЕЗОВ / Е.В. Платонова, А.В. Коловский, А.С. Торопов [и др.] // Международный научно-исследовательский журнал. — 2023. — №8 (134). — URL: <https://research-journal.org/archive/8-134-2023-august/10.23670/IRJ.2023.134.35> (дата обращения: 12.11.2023). — DOI: 10.23670/IRJ.2023.134.35.
- 54.Метелев В.А. Расчет и принцип выбора фильтрокомпенсирующего устройства // Материалы XIX Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых Проспект Свободный – 2023, 2023 г.

Министерство науки и высшего образования РФ  
Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Политехнический институт  
институт

Электроэнергетики  
кафедра

УТВЕРЖДАЮ  
Заведующий кафедрой



В.И. Пантелеев  
инициалы, фамилия

« 22 » 12 2023 г.

### МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Анализ изменения уровней напряжения на шинах подключения ФКУ  
при отклонении их настройки  
Тема

13.04.02 – «Электроэнергетика и электротехника»

код и наименование направления

13.04.02.09 «Автоматизация энергетических систем»

код и наименование магистерской программы

Руководитель  18.12.23 доц. каф ЭМиАТ, к.т.н.  
подпись, дата должность, ученая степень


Е. В. Платонова  
инициалы, фамилия

Выпускник  18.12.23  
подпись, дата

В.А. Метелев  
инициалы, фамилия

Рецензент  18.12.23 начальник ОБиАП  
подпись, дата должность, ученая степень

С. Н. Сигаев  
инициалы, фамилия

Нормоконтролер  18.12.23 доц. каф ЭМиАТ, к.т.н.  
подпись, дата должность, ученая степень

А. В. Коловский  
инициалы, фамилия

Красноярск 2023