

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт – Энергетический

Направление подготовки – 13.04.02 Электроэнергетика и электротехника

Кафедра – ЭСиЭ

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы				
Анализ применения математических методов для получения коэффициентов полиномов статических характеристик нагрузки				
УДК <u>621.3.016.3:517.58</u>				

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5АМ4Г	Жумагазин Галымжан Бейимбетулы		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Бацева Наталья Ленмировна	к.т.н., доцент		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Фигурко Аркадий Альбертович	к.э.н., доцент		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Дашковский Анатолий Григорьевич	к.т.н., доцент		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ЭСиЭ	Прохоров Антон Викторович	к.т.н.		

Томск – 2016 г.

Планируемые результаты обучения по ООП

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)
Профессиональные компетенции	
P1	Применять углубленные естественнонаучные, математические, социально-экономические и профессиональные знания в междисциплинарном контексте в инновационной инженерной деятельности в области электроэнергетики.
P2	Применять углубленные естественнонаучные, математические, социально-экономические и профессиональные знания в междисциплинарном контексте в инновационной инженерной деятельности в области электроэнергетики.
P3	Выполнять инновационные инженерные проекты с применением оригинальных методов проектирования ЭЭС для достижения новых результатов, обеспечивающих конкурентные преимущества электроэнергетического производства в условиях жестких экономических и экологических ограничений.
P4	Проводить инновационные инженерные исследования в области электроэнергетики, включая критический анализ данных из мировых информационных ресурсов, эксперименты, формулировку выводов в условиях неоднозначности с применением глубоких и принципиальных знаний и оригинальных методов для достижения требуемых результатов.
P5	Создавать и использовать на основе глубоких и принципиальных знаний необходимое оборудование, инструменты и технологии для ведения практической инновационной инженерной деятельности в условиях жестких экономических, экологических, социальных и других ограничений.
P6	Демонстрировать компетенции, связанные с уникальностью задач, объектов и видов инновационной инженерной деятельности в области электроэнергетики на предприятиях и в организациях – потенциальных работодателях, а также готовность следовать их корпоративной культуре.
Универсальные компетенции	
P7	Использовать знания в области менеджмента для управления комплексной инженерной деятельностью в области электроэнергетики и электротехники
P8	Осуществлять коммуникации в профессиональной среде и в обществе в целом, активно владеть иностранным языком, разрабатывать документацию, презентовать и защищать результаты инновационной инженерной деятельности, в том числе на иностранном языке.
P9	Эффективно работать индивидуально, в качестве члена и руководителя группы, в том числе междисциплинарной и международной, с ответственностью за работу коллектива при решении инженерных задач.
P10	Демонстрировать личную ответственность и ответственность за работу возглавляемого коллектива, приверженность и готовность следовать профессиональной этике и нормам ведения инновационной инженерной деятельности.
P11	Демонстрировать глубокое знание правовых, социальных, экологических и культурных аспектов инновационной инженерной деятельности, компетентность в вопросах охраны здоровья и безопасности жизнедеятельности.
P12	Осознавать необходимость и демонстрировать способность к самостоятельному обучению в течение всей жизни и непрерывному самосовершенствованию в инженерной профессии.

Министерство образования и науки Российской Федерации
 Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
 высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
 ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт Энергетический

Направление подготовки 13.04.02 Электроэнергетика и электротехника

Кафедра ЭСиЭ

УТВЕРЖДАЮ:

Зав. кафедрой

_____ А. В. Прохоров

ЗАДАНИЕ

на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Магистерской диссертации

(бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации)

Студенту:

Группа	ФИО
5АМ4Г	Жумагазину Галымжану Бейимбетулы

Тема работы:

Анализ применения математических методов для получения коэффициентов полиномов статических характеристик нагрузки
--

Утверждена приказом директора (дата, номер)	22.01.2016г. № 275/с
---	-------------------------

Срок сдачи студентом выполненной работы:	07.06.2016
--	------------

Техническое задание:

Исходные данные к работе <i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).</i>	В качестве исходных данных представлены: 1. Лабораторные приборы для снятия статических характеристик нагрузки.
---	---

Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов <i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i>	1. Методы получения статических характеристик нагрузки. 2. Проведение экспериментальных исследований. 3. Получение коэффициентов полиномов статических характеристик нагрузки и регулирующих эффектов нагрузки математическими методами.
Перечень графического материала <i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i>	1. Схемы для снятия статических характеристик нагрузки. 2. Статические характеристики $P(U)$ и $Q(U)$.

Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы
(с указанием разделов)

Раздел	Консультант
«Социальная ответственность»	Дашковский А. Г.
«Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»	Фигурко А. А.
Раздел на иностранном языке	Низкодубов Г. А.

Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:

Сведения о статических характеристиках нагрузки по напряжению (язык написания – русский)	
Методы получения статических характеристик нагрузки (язык написания – русский)	
Проведение экспериментальных исследований (язык написания – русский)	
Математические основы получения коэффициентов полиномов статических характеристик нагрузки	
Социальная ответственность (язык написания – русский)	
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережения (язык написания – русский)	
Experimental research (язык написания – английский)	
Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	01.10.14

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент кафедры ЭСиЭ ЭНИН ТПУ	Н.Л. Бацева	к.т.н., доцент		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5AM4Г	Жумагазин Галымжан Бейимбетулы		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
5АМ4Г	Жумагазину Галымжану Бейимбетулы

Институт	ЭНИН	Кафедра	ЭСиЭ
Уровень образования	магистратура	Направление/ специальность	13.04.02 – «Электроэнергетические системы, сети, электропередачи, их режимы, устойчивость и надежность»

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:	1. Описание рабочего места на предмет возникновения: – вредных проявлений факторов производственной среды (микроклимат, шумы, эл – магнитные поля, освещение) – опасных проявлений факторов производственной среды (термического характера, электрической, пожарной и взрывной природы)
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке	1. Анализ выявленных вредных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности: – приведение допустимых норм с необходимой размерностью (с ссылкой на соответствующий нормативно технический документ); -- предлагаемые средства защиты (сначала коллективной защиты, затем – индивидуальные защитные средства) 2. Анализ выявленных опасных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности -- механические опасности (источники, средства защиты) -- термические опасности (источники, средства защиты) -- электробезопасность (в т.ч. статическое электричество, молниезащита - источники, средства защиты); -- пожаровзрывобезопасность (причины, профилактические мероприятия, первичные средства пожаротушения); 3. Охрана окружающей среды: - защита селитебной зоны - анализ воздействия ПК на окружающую среду; - анализ воздействия ЛЭП и подстанции на окружающую среду; - разработать решения по обеспечению экологической безопасности со ссылками на НТД по охране окружающей среды. 4. Защита в чрезвычайных ситуациях: - перечень возможных ЧС на объекте; - наиболее типичная ЧС – пожар; - разработка превентивных мер по предупреждению ЧС; - разработка мер по повышению устойчивости объекта к данной ЧС; - разработка действий в результате возникшей ЧС и мер по ликвидации её последствий. 5. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности: - специальные (характерные для проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; - организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.
Перечень расч-го и граф-го материала	Расчет искусственного освещения для помещения

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	
---	--

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Дашковский Анатолий Григорьевич	к.т.н., доцент		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5АМ4Г	Жумагазин Галымжан Бейимбетулы		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И
РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

Группа	ФИО
5AM4Г	Жумагазину Галымжану

Институт	Энергетический	Кафедра	Электрические сети и электротехника
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	13.04.02 – «Электроэнергетические системы, сети, электропередачи, их режимы, устойчивость и надежность»

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:	
1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
1. Оценка коммерческого и инновационного потенциала НТИ	
2. Планирование процесса управления НТИ: структура и график проведения, бюджет.	
3. Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности	
Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):	
1. «Портрет» потребителя результатов НТИ	
2. Диаграмма Исикавы	
6. График проведения и бюджет НТИ	

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	
--	--

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Фигурко А. А.	к.э.н., доцент		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5AM4Г	Жумагазин Галымжан		

Министерство образования и науки Российской Федерации
 Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
 высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
 ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт: Энергетический

Направление подготовки (специальность): 13.04.02 – «Электроэнергетические системы, сети, электропередачи, их режимы, устойчивость и надежность»

Уровень образования: Магистратура

Кафедра: ЭСиЭ

Период выполнения: 2014/2016

Форма представления работы:

Магистерская диссертация

КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН
выполнения выпускной квалификационной работы

Срок сдачи студентом выполненной работы:	07.06.2016
--	------------

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
23.10.2014 г.	Раздел 1. Сведения о статических характеристиках нагрузки по напряжению.	15
08.02.2015 г.	Раздел 2. Методы получения статических характеристик нагрузки.	15
10.06.2015 г.	Раздел 3. Проведение экспериментальных исследований.	15
18.03.2016 г.	Раздел 4 Математические основы получения коэффициентов полиномов статических характеристик нагрузки.	30
28.04.2016 г.	Раздел 4. Социальная ответственность	10
05.05.2016 г.	Глава 5. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	10
25.04.2016 г.	Оформление работы	5

Составил преподаватель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Н. Л. Бацева	к.т.н., доцент		

Согласовано:

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ЭСиЭ	А.В. Прохоров	к.т.н., доцент		

Реферат

Выпускная квалификационная работа 126 страниц, 55 рисунков, 34 таблицы, 26 литературных источников, 1 приложение.

Ключевые слова: статические характеристики нагрузки, метод наименьших квадратов, метод главных компонент, коэффициенты полиномов, регулирующий эффект нагрузки, активный эксперимент.

Keywords: static load characteristic, least square method, principal component analysis, polynomials coefficients, governing effect of load, active experiment.

Актуальность проводимых исследований: Эффективность функционирования как энергосистемы в целом, так и отдельного промышленного предприятия определяется в значительной мере режимом их работы. Не последнюю роль здесь играет процесс моделирования нагрузки. В последнее время активно проводятся исследования по обновлению альбомов СХН по напряжению. Это связано с тем, что они используются в программных комплексах по расчету режимов энергосистем в виде коэффициентов полиномов. Одним из методов получения данных для вычисления коэффициентов полиномов является натурный (активный) эксперимент. В результате его успешного проведения будут получены массивы напряжения, активной и реактивной мощностей, которые и требуют дальнейшей обработки с помощью математических методов для получения коэффициентов полиномов, поэтому тема магистерской диссертации является актуальной.

Объект исследования – математические методы для определения коэффициентов полиномов статических характеристик и регулирующих эффектов электрических нагрузок.

Целью работы является анализ применимости математических методов для задачи определения коэффициентов полиномов статических характеристик нагрузки по напряжению и регулирующих эффектов нагрузки.

Objective of the work is an analysis of the applicability of mathematical methods to the problem of determining the coefficients of static characteristics of polynomials and governing effects of electric loads.

Задачи исследования. Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие основные задачи:

1) Планирование и проведение активных экспериментов в лабораторных условиях для получения массивов данных;

2) Вычисление коэффициентов полиномов статических характеристик нагрузки и регулирующих эффектов нагрузки с помощью метода наименьших квадратов и метода главных компонент.

Методологическая основа. При работе над диссертацией использовались положения и выводы ученых-специалистов в области исследования статических характеристик нагрузки и обработке экспериментальных данных, таких как Ю. Е. Гуревич, Л. Е. Либова, Л. М. Горбунова, М. Г. Портной, Р. С. Рабинович, С. А. Совалов, В. Ф. Тимченко, В.А. Строев. Основными результатами этих исследований являются выявление эффективности использования активного эксперимента для снятия статических характеристик нагрузки и использование метода наименьших квадратов для обработки полученных массивов значений для получения полиномиальной модели.

Информационная база. Поставленная цель достигается в процессе изучения научной и специальной литературы, Интернет-источников; собственных исследований; анализа современного состояния отрасли; международной и отечественной практики исследования состояния вопроса.

Объектом исследования являются электрические нагрузки систем электроснабжения.

Предметом исследования выступают статические характеристики нагрузки по напряжению.

Положения, выносимые на защиту. При решении поставленных задач были получены следующие результаты, выносимые на защиту:

- 1) Коэффициенты полиномов статических характеристик нагрузки определенные по методу наименьших квадратов;
- 2) Регулирующие эффекты нагрузки полученные по методу наименьших квадратов и по методу главных компонент;
- 3) Сравнительный анализ результатов.

Практическая значимость работы состоит в разработке рекомендаций по применению математических методов для определения коэффициентов полиномиальной модели.

Обозначения и сокращения

АРНТ – автоматика регулирования напряжения трансформатора

ВЛ – воздушная линия

ВУЗ – высшее учебное заведение

ЛЭП – линия электропередач

МГК – метод главных компонент

МНК – метод наименьших квадратов

НТУ – научно технический уровень

ПУЭ – правила устройств электроустановок

ПЭЭ – потребители электроэнергии

РПН – регулирование под напряжением

СХН – статические характеристики нагрузки

ЭП – электрическое поле

ЭЭС – электроэнергетическая система

Оглавление

Реферат.....	8
Обозначения и сокращения.....	11
Введение.....	15
РАЗДЕЛ 1. СВЕДЕНИЯ О СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИКАХ НАГРУЗКИ ПО НАПРЯЖЕНИЮ.....	16
1.1 Моделирование нагрузки в расчетах режимов энергосистем.....	16
1.2 Обобщенные характеристики нагрузки.....	20
1.3 Возможности уточнения обобщенных характеристик нагрузки	24
1.4 Постановка задачи повторного исследования статических характеристик нагрузки.....	27
РАЗДЕЛ 2. МЕТОДЫ ПОЛУЧЕНИЯ СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК НАГРУЗКИ.....	29
2.1 Метод активного эксперимента.....	29
2.2 Метод пассивного эксперимента.....	33
2.3 Расчетный метод	35
2.4 Заключение по разделу.....	36
РАЗДЕЛ 3 ПРОВЕДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ..	37
3.1 Элементы физической модели, используемые в экспериментах.....	39
3.2 Технические характеристики элементов физической модели	43
3.3 Результаты экспериментов.....	44
2.5 Заключение по разделу.....	61
РАЗДЕЛ 4. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОЛУЧЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТОВ ПОЛИНОМОВ СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК НАГРУЗКИ.....	63
4.1 Определение коэффициентов полиномов СХН математическими методами	63
4.1.1 Метод наименьших квадратов.....	63
4.1.2 Метод главных компонент.....	68

4.2	Примеры получения коэффициентов полиномов статических характеристик нагрузки.....	73
4.2.1	Пример получения коэффициентов полиномов по методу наименьших квадратов.....	73
4.2.2	Пример получения коэффициентов полиномов по методу главных компонент	82
4.3	Заключение по разделу.....	95
РАЗДЕЛ 5. ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ И РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ		97
5.1	Календарный график выполнения диссертации	97
5.2	Диаграмма Исикавы.....	99
5.3	Бюджет работ.....	99
5.4	Анализ и оценка научно-технического уровня проекта (НТУ)	100
5.5	Заключение по разделу.....	105
РАЗДЕЛ 6. СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ.....		106
6.1	Описание рабочего места.....	106
6.2	Анализ выявленных вредных факторов проектируемой производственной среды	106
6.3	Анализ выявленных опасных факторов проектируемой производственной среды	112
6.4	Охрана окружающей среды	113
6.4.1	Нормирование уровней напряженности электрического поля	114
6.4.2	Мероприятия по защите от электрических полей	115
6.4.3	Нормирование уровней напряженности магнитного поля	116
6.4.4	Мероприятия по защите от воздействия электромагнитных полей	118
6.5	Защита в чрезвычайных ситуациях.....	119
6.5.1	Пожарная безопасность.....	119
6.6	Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	120
6.6.1	Специальные правовые нормы трудового законодательства.....	120
6.6.2	Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны	121

6.7 Заключение по разделу	123
Заключение	124
Список литературы	126
Приложение А	128

Введение

В процессе развития электроэнергетических систем (ЭЭС) происходят существенные изменения структуры, режимов и свойств ЭЭС как объектов управления. Вследствие этого усложняется проблема обеспечения их надёжности и эффективности работы ЭЭС. С переходом к рыночным отношениям между производителями и потребителями электрической энергии актуальность решения этой проблемы обострилась.

Известно, что большое влияние на точность расчета режимов оказывает выбор способа моделирования электрической нагрузки. Моделирование нагрузки для анализа режимов работы ЭЭС связано с определенными трудностями, обусловленными тем, что в каждом узле имеется большое количество электроприемников, различающихся по мощности, параметрам, загрузке и условиям работы. Существенно различается и состав нагрузки, а точная информация по составу и параметрам электроприемников узла нагрузки зачастую отсутствует.

Исходные данные для вычисления коэффициентов полиномов статических характеристик можно получить после проведения активного или пассивного эксперимента.

Активный эксперимент используется для определения статических характеристик нагрузки при принудительном изменении напряжения узла. При этом измеряются активная и реактивная мощности нагрузки, а также, при необходимости, отдельных электроприемников в её составе.

Пассивный эксперимент состоит в использовании для получения статических характеристик в основном случайных колебаний уровня напряжения, которые имеют место в электрической сети.

В результате успешного проведения активного эксперимента будут получены массивы напряжения, активной и реактивной мощностей, которые и требуют дальнейшей обработки с помощью математических методов для получения коэффициентов полиномов, поэтому тема магистерской диссертации является актуальной.

РАЗДЕЛ 1. СВЕДЕНИЯ О СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИКАХ НАГРУЗКИ ПО НАПРЯЖЕНИЮ

1.1 Моделирование нагрузки в расчетах режимов энергосистем

Правильность математического описания нагрузки может оказать существенное влияние на результаты расчетов как статической, так и динамической устойчивости энергосистем. При решении вопроса о том, насколько подробно должна учитываться нагрузка при выполнении расчетов, необходимо, с одной стороны, обеспечивать достаточную точность конечного результата, а с другой стороны – стремиться к сокращению объема исходной информации. Это требует определенного подхода, содержащего следующие основные моменты [1].

1. Необходимы критерии, в соответствии с которыми выбор необходимых расчетных моделей нагрузки может осуществляться до выполнения основной серии расчетов.

2. Возможности экспериментального или расчетного определения параметров крупных узлов нагрузки весьма ограничены отсутствием средств измерения на шинах высшего напряжения, дискретизацией измеряемых величин, отсутствием необходимых исходных данных. Кроме того, значительная часть расчетов выполняется на перспективу; в этом случае трудности получения конкретных параметров нагрузки особенно велики. По этим причинам нужна информация о статически обоснованных параметрах, которыми можно пользоваться, если конкретных данных недостаточно.

3. Необходима разработка простых способов, позволяющие оценивать влияние неточностей задания параметров нагрузки на результаты расчетов.

В расчетах устойчивости сложных энергосистем в зависимости от особенностей решаемой задачи нагрузка может быть представлена различными расчетными моделями.

Комплексная расчетная модель нагрузки описывает простейшую одноузловую схему нагрузки, например как показано на рис.1, которая, однако, позволяет воспроизвести в расчете основные особенности переходных

процессов в двигателях. Комплексная расчетная модель нагрузки содержит уравнения эквивалентного асинхронного двигателя, статической нагрузки и эквивалентного синхронного двигателя. В понятие статической нагрузки включаются все потребители электроэнергии, кроме двигателей: электропечи, освещение, значительная часть коммунально-бытовой нагрузки. К статической нагрузке относят также конденсаторные батареи, емкости воздушных и кабельных линий. В общем случае величина $Z_{ст}$ зависит от напряжения.

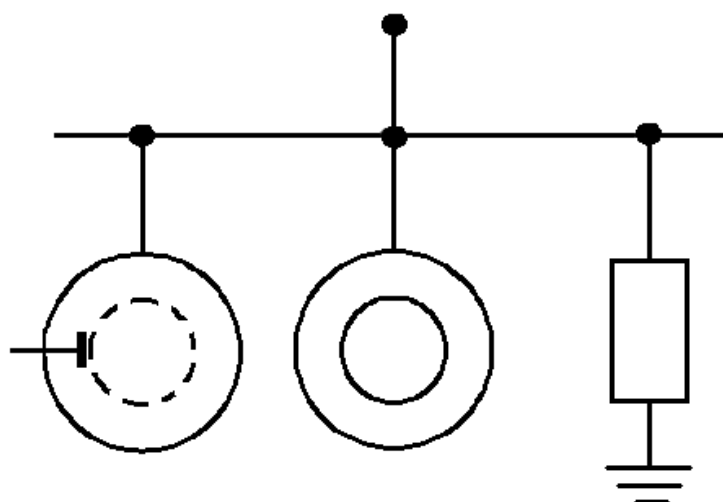


Рисунок 1.1 – Типовая комплексная модель нагрузки

В некоторых случаях используются многоэлементные комплексные модели. Они обеспечивают более детальный учет всех основных особенностей потребителей и распределительной сети. В зависимости от решаемой задачи и структуры нагрузки расчетная схема нагрузки может содержать различное количество узлов, синхронных и асинхронных двигателей и других потребителей. Чем меньше протяженность распределительной сети и чем более однородна нагрузка, тем проще может быть расчетная модель. Многоэлементные расчетные модели в расчетах динамической устойчивости энергосистем иногда приходится использовать для крупных предприятий, которые потребляют мощность, соизмеримую с мощностью электростанций.

В статической расчетной модели нагрузка задается своими статическими характеристиками по напряжению и частоте:

$$\left. \begin{aligned} P_n &= F_1(U, f); \\ Q_n &= F_2(U, f). \end{aligned} \right\} \quad (1.1)$$

Где:

P_n - активная мощность;

Q_n - реактивная мощность;

U - напряжение;

f - частота.

Основная область применения такой модели – расчеты статической устойчивости, поскольку статические характеристики отражают зависимости нагрузки от напряжения и частоты при медленных изменениях последних.

В расчетах динамической устойчивости нагрузку также нередко описывают статическими характеристиками. Это упрощает подготовку исходных данных, а сами статические характеристики известны лучше, чем какие-либо другие параметры нагрузки.

Применение выражений (1.1) в расчетах переходных процессов для резких возмущений приводит к заметным погрешностям, так как зависимости мощности от напряжения в переходном процессе иные, чем в установившемся режиме. Так, при возникновении короткого замыкания напряжение снижается практически мгновенно; при этом скольжение двигателей не успевает измениться. Если не учитывать электромагнитные переходные процессы и влияние насыщения, тогда активную и реактивную мощности асинхронных двигателей при скольжении $s = \text{const}$ можно считать пропорциональными квадрату напряжения. В течение короткого замыкания мощности изменяются вследствие изменений скольжения и питающего напряжения, а отключению короткого замыкания соответствует новый скачок активной и реактивной мощностей. Далее следует процесс само запуска.

Описанный выше процесс, можно представить в координатах U, P и U, Q где каждой точке соответствуют определенные значения времени t и в общем случае угловой частоты ω_* .

$$\left. \begin{aligned} P_n &= F_3(U, \omega_*, t); \\ Q_n &= F_4(U, \omega_*, t); \end{aligned} \right\} \quad (1.2)$$

Где:

P_n - активная мощность;

Q_n - реактивная мощность;

U - напряжение;

ω_* - угловая частота;

t - время.

Такие характеристики принято называть динамическими (термин «динамические характеристики нагрузки» иногда распространяют и на дифференциальные уравнения двигателей). Они в отличие от статических характеристик определяются не только параметрами нагрузки, но и параметрами схемы и режима всей энергосистемы.

Разница между зависимостями (1.1) и (1.2) характеризует погрешность, которая возникает при использовании статических характеристик (1.1) в расчетах динамической устойчивости.

Постоянное сопротивление (или проводимость) можно рассматривать как простейший случай статических характеристик нагрузки, когда активная и реактивная мощности пропорциональны квадрату напряжения. Замена нагрузок постоянными сопротивлениями $r + jx$ позволяет существенно упростить расчеты, но связана с наибольшими погрешностями.

Например, если в расчете, выполненном при постоянных сопротивлениях асинхронного двигателя $x_k = x_{k0}, r'_2 = r'_{20}$, само запуск оказывается невозможным, то нужно повторить расчет, подобрав такие значения x_k и r'_2 , чтобы получить наилучшее приближение для асинхронной характеристики двигателя в требуемом диапазоне s .

Способы упрощенного выбора вида расчетных моделей для узлов нагрузки применимы в тех случаях, когда нагрузка не имеет ярко выраженной специфики.

Вначале осуществляется выбор между комплексной расчетной моделью, учитывающей переходные процессы в двигателях, и статической моделью, нелинейной, то есть статическими характеристиками нагрузки, или линейной, $Z_n = const$, а затем определяется, нужно ли учитывать нелинейность статической модели [1].

1.2 Обобщенные характеристики нагрузки

Расчеты устойчивости выполняются для сложных энергосистем, содержащих десятки и сотни нагрузочных узлов. Использовать для таких расчетов конкретные характеристики каждого узла, входящего в расчетную схему, практически невозможно. Трудность определения статических характеристик нагрузки для всех узлов энергосистем вызывает стремление использовать для большинства узлов, « типовые » статические характеристики или « обобщенные » характеристики. Такие характеристики особенно необходимы при выполнении перспективных проектных расчетов.

Впервые типовые статические характеристики нагрузки были предложены Д. И. Азарьевым в 40-х годах. По этим характеристикам были определены коэффициенты корреляции $k_{P,U} \approx 0,66$, $k_{Q,U} \approx 1,7$ для узлов электрической сети номинальным напряжением 110 кВ. Однако по мере накопления экспериментальных данных о статических характеристиках нагрузки выявились большие отличия настоящих характеристик от « типовых », рассчитанных для комплексной модели нагрузки, принципиально правильной, но не учитывающей ряд факторов, которые есть в действительности, и которые существенно влияют на вид статических характеристик, например, изменился состав нагрузки.

Результаты экспериментального определения статических характеристик нагрузки по напряжению или только ее регулирующих эффектов, в случае если диапазон изменения напряжения ΔU в опыте не превышал 5-15%, описаны в большом количестве работ. Однако использовать

для получения «типовых» характеристик все эти данные без специального анализа нельзя.

Причины этого таковы:

1. многие эксперименты выполнены для небольших нагрузок (единицы мегаватт) или для небольших групп однотипных потребителей (чаще – асинхронных двигателей). Использовать такие данные для получения характеристик было бы неправильно.

2. поскольку состав нагрузки и влияние потерь в распределительной сети зависят от того, проведен ли эксперимент для режима максимальной нагрузки или для иного режима, при статической обработке следует учитывать и не рассматривать в одной совокупности данные, относящиеся к существенно разным режимам.

3. для обобщения характеристик $Q_n(U)$ нужно знать коэффициенты мощности нагрузки в нормальном режиме ($\cos \varphi_n$). Так как результаты многих экспериментов опубликованы без указания величины $\cos \varphi_n$, то тем самым сокращается общее количество данных, пригодных для обработки [1].

Обобщенные статические характеристики нагрузки, которые были получены экспериментально или расчетным путем различаются друг от друга. Это обусловлено различием состава оборудования у потребителей. Например, статические характеристики ткацких фабрик существенно отличаются от статических характеристик металлургических комбинатов.

Статические характеристики крупных комплексов потребителей электроэнергии обладают некоторыми сходственными особенностями. Такая сходственность определяется тем, что основную часть нагрузки большинства крупных потребителей электрической сети в настоящее время составляют асинхронные двигатели и лампы накаливания. Поэтому свойства этих потребителей электроэнергии оказывают определяющее влияние и на форму обобщенных статистических характеристик нагрузки электрической сети.

На рис.2 показаны качественно обобщенные статические характеристики узла нагрузки электрической сети соответственно по напряжению и частоте в окрестности точки исходного установившегося режима, в качестве которого в большинстве случаев рассматривается режим при номинальных значениях напряжения и частоты. В наиболее общем виде эти характеристики могут быть аппроксимированы следующими выражениями:

$$P_{*н} = (a_p U_{*н}^2 + b_p U_{*н} + c_p) [1 + d_p (f_* - 1)] \quad (1.3)$$

$$Q_{*н} = (a_q U_{*н}^2 + b_q U_{*н} + c_q) [1 + d_q (f_* - 1)] \quad (1.4)$$

Где: $P_{*н} = P_n / P_{н0}$, $Q_{*н} = Q_n / Q_{н0}$, $U_{*н} = U_n / U_{н0}$, $f_* = f / f_0$. Индекс 0 отмечает параметры исходного установившегося режима.

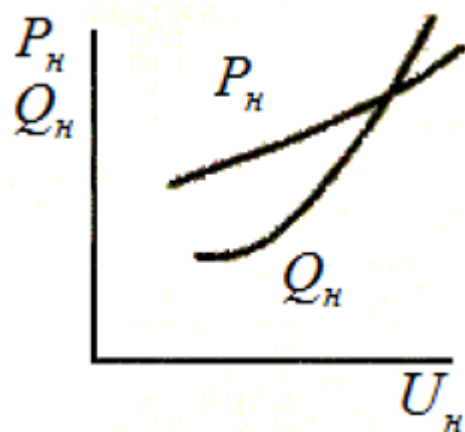


Рисунок 1.2 – Обобщенные статические характеристики комплексной нагрузки по напряжению и частоте.

Значения коэффициентов a , b , c и d в выражениях (1.3), (1.4) зависят от степени “пологости” СХН. Различают “пологие”, “средние” и “крутые” характеристики. В случае зависимостей активной мощности от напряжения и частоты обычно принимается $a_p = 0$, а коэффициенты b_p , c_p и d_p для каждой степени пологости меняются в зависимости от наличия или отсутствия в составе узла нагрузки крупных промышленных предприятий. В случае реактивной мощности коэффициенты a_q , b_q , c_q и d_q определяются как

степенью пологости, так и значением коэффициента мощности узла нагрузки для периода прохождения ее максимума.

Диапазоны изменения всех этих коэффициентов достаточно велики, поэтому в качестве иллюстрации приведем их значения для характеристик средней крутизны, которые соответствуют следующему составу нагрузки узла в процентах от суммарной активной мощности:

- крупные асинхронные двигатели – 15
- мелкие асинхронные двигатели – 35
- крупные, синхронные двигатели – 9
- преобразователи и электропечи – 11
- освещение и бытовая нагрузка – 22
- потери в сетях – 8

Для такого состава нагрузки средние значения коэффициентов для активной мощности нагрузки:

$$b_{pcp} = 0,9, \quad c_{pcp} = 0,1, \quad d_{pcp} = 1$$

В этом случае зависимость (1.3) принимает вид

$$P_{*H} = (0,9U_{*H} + 0,1) f_* \quad (1.5)$$

Зависимость реактивной мощности нагрузки на шинах 6-20 кВ понижающих подстанции ($\cos \varphi_{H(n\bar{b})} = 0,93$) характеризуется следующими средними значениями коэффициентов: $a_{qcp} = 13,5$, $b_{qcp} = -22,2$, $c_{qcp} = 9,7$, $d_{qcp} = -2$. Реактивная нагрузка, приведенная к ступени 110 кВ ($\cos \varphi_{H(n\bar{b})} = 0,88$) характеризуется средними коэффициентами $a_{qcp} = 11,4$, $b_{qcp} = -18,5$, $c_{qcp} = 8,1$, $d_{qcp} = -1,5$. В свою очередь, для реактивной нагрузки, приведенной к шинам 220 кВ ($\cos \varphi_{H(n\bar{b})} = 0,86$), справедливы следующие средние значения: $a_{qcp} = 9,6$, $b_{qcp} = -15,3$, $c_{qcp} = 6,7$, $d_{qcp} = -1,1$.

Из (5) следует, что обобщенные статические характеристики активной нагрузки в окрестности точки, соответствующей номинальным

значениям напряжения и частоты ($U_{н0} = U_{ном}$, $f_0 = f_{ном}$), являются линейными функциями соответствующих режимных параметров и характеризуются средними регулирующими эффектами.

$$a_{Ucp} = \partial P_n / \partial U_n = b_{pcp} = 0,9, a_{fcp} = \partial P_n / \partial f = d_{pcp} = 1.$$

Регулирующие эффекты обобщенных статических характеристик реактивной нагрузки в соответствии с (4) равны

$$b_U = \partial Q_n / \partial U_n = 2a_q + b_q, b_f = \partial Q_n / \partial f = d_q.$$

Значение b_U вычисление по средним значениям коэффициент a_q и b_q для нагрузок, приведенных к шинам различных номинальных напряжений, составляют:

$$b_{Ucp(6-20)} = 2 \cdot 13,5 - 22,5 = 4,8;$$

$$b_{Ucp(110)} = 2 \cdot 11,4 - 18,5 = 4,3;$$

$$b_{Ucp(220)} = 2 \cdot 9,6 - 15,3 = 3,9.$$

Этим значениям соответствует углы наклона касательной к статической характеристики $Q_{*н} = f(U_{*н})$ в точке с абсциссой $U_{н0} = U_{ном}$, равные $78,2^\circ$; $76,9^\circ$ и $75,6^\circ$ [2].

1.3 Возможности уточнения обобщенных характеристик нагрузки

Приведенные в п. 1.2 обобщенные статические характеристики нагрузки, применимы для тех узлов, где требования к точности их учета умеренны. Если расчеты показывают, что для некоторых узлов необходимо повысить точность расчетов, то возможны два пути: проведение активных экспериментов, либо получение характеристик расчетным методом.

Расчетный метод получения статических характеристик нагрузки по напряжению и частоте не может заменить активный эксперимент. В особенности это относится к характеристикам реактивной нагрузки из-за трудностей учета насыщения трансформаторов и асинхронных двигателей, регулирования возбуждения синхронных двигателей. Основная трудность расчетного определения характеристик нагрузки состоит в получении исходных данных, что для крупных узлов нагрузки, как правило, невозможно.

Реальный путь получения конкретных характеристик с помощью расчета состоит в следующем: за основу принимается та исходная схема и те ее параметры, которые использованы для получения обобщенных характеристик; в эти данные вносятся уточнения, соответствующие рассматриваемому узлу нагрузки и его режиму, и выполняется расчет искомых характеристик. Таким образом, для тех параметров, которые можно получить для рассматриваемой нагрузки, используются фактические значения, а для остальных, которые получить нельзя, используются средние значения. В итоге полученные характеристики будут тем более точными, чем больше введено фактических параметров.

Практика показывает, что даже для самых крупных узлов нагрузки реально получение следующей информации:

1. Параметры нормального режима $P_{\text{норм}}$, $Q_{\text{норм}}$.
2. Средние уровни напряжения для потребителей 6-10 кВ и 380 В, а также нормальное напряжение в узле нагрузки $U_{\text{норм}}$.
3. Количество ступеней трансформации, например, 110/10/0,4 или 110/35/0,4 кВ, а для узлов нагрузки, питающихся через трехобмоточные трансформаторы, например, 115/38,5/6,3 кВ, - отношение нагрузки, питающейся с шин 35 кВ, к полной нагрузке узла; коэффициенты загрузки по току основных трансформаторов, по крайней мере, трансформаторов, установленных непосредственно в узле нагрузки.
4. Средняя протяженность питающих линий в распределительной сети нагрузки.
5. Перечень наиболее крупных промышленных предприятий и потребляемая ими мощность; суммарная номинальная мощность нормально работающих синхронных двигателей, наличие на них автоматического регулирования возбуждения; наличие потребителей, из-за которых состав нагрузки может значительно отличаться от среднего, например, энергоемкие электропечи, потребители, питающиеся выпрямленным напряжением.

Эта информация может быть использована для расчета схемы, следующим образом:

1. Значения $P_{\text{норм}}$ и $Q_{\text{норм}}$ определяют базисные величины для характеристик нагрузки. Кроме того, по величине $Q_{\text{норм}}$ уточняется расчетная модель в соответствии с двухкомпонентным представлением нагрузки. Это необходимо в связи с тем, что обычно полученная в расчете реактивная мощность в узле нагрузки $Q'_{\text{норм}}$ не совпадает с ее фактическим значением $Q_{\text{норм}}$. Такую расчетную модель следует дополнить таким шунтом постоянной проводимости $\pm jx_{ш}$ на шинах балансирующего узла, чтобы выполнялось равенство $Q'_{\text{норм}} \pm Q_{ш} = Q_{\text{норм}}$.

2. Фактические (средние) напряжения в нормальном режиме в узлах рассматриваемой схемы позволяют рассчитать и правильно учесть коэффициенты трансформации трансформаторов.

3. Если число основных ступеней трансформации в реальной схеме такое же, как и в расчетной, то данные по трансформаторам необходимы лишь для уточнения номинальных мощностей эквивалентных трансформаторов. Если исходная схема содержит n последовательных двухобмоточных трансформаторов, например 500/220, 220/110 кВ, причем через них проходит практически вся мощность, то они также могут быть приведены к одному трансформатору.

4. Оценки средних протяженностей питающих линий позволяют задать сопротивления линий в расчетной схеме Z_1 и Z_2 . Использование средних оценок возможно, если потери напряжения в радиальных линиях распределительной сети близки друг к другу. В противном случае нужно рассчитывать более подробную схему.

5. Сведения об основных промышленных предприятиях нужны для уточнения состава нагрузки. Особенно важно правильно учесть суммарную мощность работающих синхронных двигателей. В нагрузке крупных предприятий учитываются синхронные двигатели, асинхронные двигатели 6-10

кВ и асинхронные двигатели низкого напряжения, а также все прочие потребители, если они имеют значительную мощность. Статические характеристики последних могут быть взяты либо по опубликованным данным, либо по данным специальных экспериментов, которые обычно несложно выполнить для небольших групп потребителей, если в этом есть необходимость.

Работа некоторых статических потребителей существенно зависит от того, в каком темпе изменяется напряжение, так как нередко применяются медленно действующие системы регулирования их режима. Поэтому, задавая характеристики таких потребителей, нужно иметь в виду цели расчетов. Например, работа термических печей может регулироваться изменением глубины погружения электрода в расплав с поддержанием постоянства тока. Для такого потребителя $k_{PU} \approx k_{QU} \approx 2$, если рассматривается процесс, занимающий несколько минут или еще более быстрый; для случаев медленного изменения условий питания $k_{PU} \approx k_{QU} \approx 1$.

Точность распределения двигателей между шинами мало сказывается на виде статических характеристик, но влияет на критическое напряжение.

Коммунально-бытовую нагрузку можно представлять содержащей статические потребители $Z_{ст} = const$ и асинхронные двигатели низкого напряжения (главным образом водоснабжение и канализация). Если в понятие коммунально-бытовой нагрузки включаются и мелкие предприятия, по которым нет данных о составе потребителей, то долю двигателей в этой нагрузке целесообразно увеличить на 10-15%.

На практике в зависимости от конкретных условий может оказаться возможным уточнение и других параметров расчетной схемы [1].

1.4 Постановка задачи повторного исследования статических характеристик нагрузки.

Ученые многих ВУЗов, а также специалисты, работающие в энергосистемах, признают важность точного моделирования нагрузки для

исследования энергосистем, однако, многие до сих пор используют типичное представление статических нагрузок посредством полных сопротивлений, токов и неизменными мощностями. Последнее систематическое обновление моделей нагрузки было проведено в середине 1990-х годов, поскольку тогда произошли значительные изменения в структуре, в типе и составе нагрузки в электрических сетях.

За последние несколько лет наблюдается повышенный интерес к моделированию нагрузки из-за появления новых типов нагрузок повышенной эффективности и управляемости. Различные типы современных нелинейных силовых электронных нагрузок теперь ответственны за значительную часть общего спроса нагрузки практически во всех секторах промышленности [3].

РАЗДЕЛ 2. МЕТОДЫ ПОЛУЧЕНИЯ СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК НАГРУЗКИ

2.1 Метод активного эксперимента.

Активный эксперимент используется для определения статических и динамических характеристик нагрузки по напряжению и частоте при принудительном изменении в широком диапазоне напряжения на нагрузке или частоты. При этом измеряются активная и реактивная мощности всей нагрузки узла и, при необходимости, отдельных потребителей.

При снятии статических характеристик нагрузки по напряжению узел нагрузки должен иметь одностороннее питание [4]. Если оно осуществляется по нескольким линиям электропередачи или через несколько трансформаторов, работающих параллельно, то для получения величин P_n и Q_n берется сумма соответствующих токов [5]. Изменение напряжения в достаточно узком диапазоне (до $\pm 10\%$) практически не опасно для потребителей и может быть допущено (если это технически выполнимо) для любого узла нагрузки. Снижение напряжения в более широких пределах [до $(0,8 \div 0,7)U_{ном}$] может приводить к нарушению электроснабжения, поэтому должны быть предусмотрены мероприятия для восстановления нормальной работы потребителей: быстрый подъем напряжения в узле, включение параллельных линий, несинхронное подключение выделенной для испытаний части энергосистемы к основной ее части.

Для снятия статических характеристик по напряжению изменение напряжения в узле нагрузки можно осуществлять двумя способами:

1. В нормальной схеме энергосистемы переключением под нагрузкой ответвлений обмоток понижающих трансформаторов (РПН). Напряжение на стороне низшего напряжения (6-10 кВ) трансформаторов изменяется в диапазоне 15-20%.

2. В выделенном от остальной части энергосистемы испытуемом узле нагрузки с несколькими генераторами (или электростанцией в целом) регулированием возбуждения выделенных генераторов. Напряжение при этом

может изменяться в широких пределах в сторону повышения и понижения. В выделенном районе обеспечивается резерв по располагаемой активной и реактивной мощности (обычно 20-30%). Частота при испытании поддерживается неизменной.

В обоих способах напряжение изменяется ступенями по 1-2%; на каждой ступени производятся измерения напряжений, мощностей и токов указывающими и регистрирующими через 1-2 мин после изменения режима. Опыт начинается при нормальном рабочем напряжении U_0 , затем напряжение поднимается ступенями до максимально возможного (или допустимого), после чего снижается: при первом способе – до минимального по располагаемому диапазону регулирования, при втором – до $(0,6 \div 0,8)U_{ном}$ - до возникновения лавины напряжения, либо до напряжения, при котором начинается саморазгрузка потребителей.

У нагрузок, питающихся через трансформаторы, снабженные устройствами автоматического регулирования напряжения (АРНТ), напряжение на шинах электроприемников поддерживается почти неизменным, пока не исчерпан диапазон регулирования АРНТ. При наличии АРНТ замеры целесообразно выполнять дважды после каждого изменения питающего напряжения:

1. сразу же после изменения напряжения, до того как произошло переключение ответвлений автоматически регулируемых трансформаторов; при этом определяются статические характеристик нагрузки и ее регулирующие эффекты по напряжению без учета действия АРНТ.

2. через 2-2,5 мин, то есть через промежуток времени, больший выдержки времени АРНТ; при этом выявляются характеристики и регулирующие эффекты нагрузки с учетом действия АРНТ [4].

Измерения обычно организуются так, чтобы при воздействии на одну систему управления режимом питания нагрузки (выделенные генераторы, РПН трансформаторов) получить как можно больше характеристик как для нагрузки в целом, так и для ее основных частей.

рис.2.1 показана схема первого этапа опытов. В результате суммарные характеристики, полученные для района в целом, соответствовали нагрузке свыше 400 МВт.

Важную роль играет неизменность состава нагрузки и режима работы потребителей в ходе эксперимента. Если «собственные» изменения величины нагрузки (включение и отключение отдельных потребителей) сравнимы с теми изменениями, которые обусловлены принудительными изменениями напряжения, то погрешности эксперимента резко возрастают. На рис.2.2,а показаны данные измерений сравнительно стабильной нагрузки. Здесь получить характеристику нетрудно. Разброс точек, обусловленный как небольшими флуктуациями нагрузки, так и погрешностями замеров, невелик.

Если в ходе опыта нагрузка под действием собственных причин увеличивалась или уменьшалась («дрейф» нагрузки, рис.2.2,б), то истинную характеристику установить труднее, но все же во многих случаях возможно. Если внимательно проанализировать полученные точки с учетом их последовательности и данных об интервалах времени между замерами: чем больше эти интервалы, тем вероятнее возникновение дрейфа. Формальное применение метода наименьших квадратов в этих случаях недопустимо.

Другой вид изменений нагрузки дает наличие электротяги, результаты здесь получаются приближенными рис.2.2,в, а иногда, при малом диапазоне изменения напряжения, опыт оказывается неудачным, как показано на рис.2.2,г.

Из примеров, приведенных на рис.2.2, следует, что диапазон изменения напряжения ΔU , который необходим для того, чтобы надежно выявить отрезок статической характеристики, в различных условиях может быть разным. Обычно при $\Delta U < 10\%$ можно получить лишь величины регулирующих эффектов.

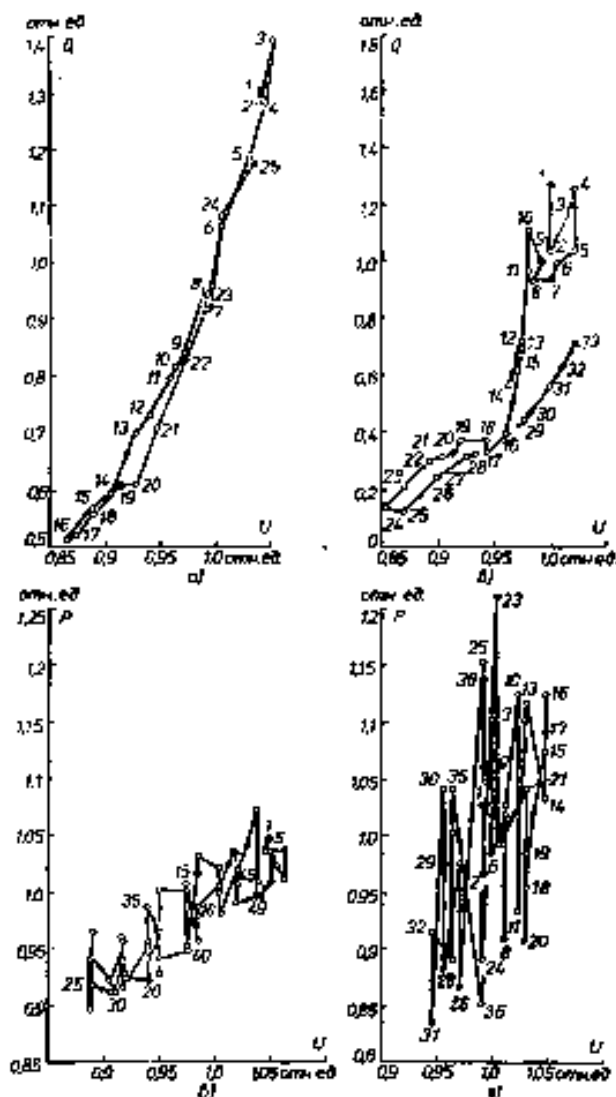


Рисунок 2.2 – Результаты активных экспериментов:

а – дрейф нагрузки отсутствует; б – значительный в начале эксперимента; в – нагрузка содержит значительную резкопеременную составляющую; г – разброс данных измерений для нагрузки, содержащей тяговую подстанцию [5].

2.2 Метод пассивного эксперимента.

Пассивный эксперимент состоит в использовании для получения регулирующих эффектов нагрузки по напряжению тех малых случайных колебаний напряжения, которые всегда имеют место в электрической сети. Реакция нагрузки на эти малые колебания напряжения происходит в соответствии с ее регулируемыми эффектами k_{PU} и k_{QU} . Учет каждого такого отклонения напряжения на десятые доли процента дал бы очень грубый результат. Но поскольку измерения проводятся без вмешательства в

нормальный режим электроснабжения, то можно накопить очень большое количество данных измерений и с помощью методов математической статистики получить регулирующие эффекты нагрузки по напряжению с достаточной точностью.

Требование односторонности питания испытываемой нагрузки здесь такое же, как при активном эксперименте.

Параметры нагрузки (U, P_n, Q_n) подвержены случайным колебаниям, обусловленным двумя причинами:

1. Идущие со стороны системы «внешние» изменениями параметров - изменения мощности нагрузок, не входящих в исследуемый узел, и другие факторы в системе, приводящие к малым изменениям напряжения.

2. «Собственные» изменения нагрузки - изменения загрузки двигателей, связанные с технологией, включения и отключения отдельных потребителей.

В период стационарности суточного графика в узлах нагрузки имеют место мелкие изменения режима, связанные с технологией производства, наличием бытовой нагрузки. Такие изменения режима не коррелированы между собой для различных узлов. Поэтому в каждом узле нагрузки не коррелированы «внешние» и «собственные» флуктуации [5].

Условия проведения пассивного эксперимента:

1. Эксперимент должен проводиться при стабильной частоте $f_{\text{сети}} \approx f_{\text{ном}}$.

2. Диапазон изменения напряжения в точке питания потребителей должен составлять не менее 15% от $U_{\text{ном}}$. Максимальное значение напряжения ограничивается условиями эксплуатации электрооборудования, а минимальное значение напряжения ограничивается условиями устойчивости узла нагрузки (нельзя допускать самоотключение двигателей).

3. Схема измерений должна обеспечить возможность регистрации напряжений в точке питания, результирующих значений активной и реактивной мощностей по всем присоединениям испытываемой нагрузки к точке питания.

При этом должны измеряться междуфазные напряжения $U_{м.ф.}$, трехфазные активная P и реактивная Q мощности, а при возможности – активные и реактивные мощности по фазам и соответствующие им напряжения. Кроме того, следует осуществлять контроль частоты. Класс точности используемой измерительной аппаратуры – не хуже 0,5.

4. Измерения должны выполняться многоканальными цифровыми средствами измерения, которые обеспечивают запись измерений один раз в секунду, сохраняют измерения в памяти, могут быть подключены к компьютеру для считывания данных в память компьютера в текстовом или табличном формате. При необходимости могут быть использованы дополнительные измерительные приборы с требуемым классом точности.

2.3 Расчетный метод

При использовании расчетного метода для совокупности из k групп однотипных потребителей электроэнергии (ПЭЭ) статические характеристики (СХН) нагрузки по напряжению могут быть определены по следующим выражениям:

$$P(U) = \sum_{i=1}^k \alpha_i P_i(U) + \alpha_\pi \Delta P(U);$$

$$Q(U) = \sum_{i=1}^k \beta_i Q_i(U) + \beta_\pi \Delta Q(U);$$

где $P(U)$ и $Q(U)$ – СХН по напряжению для активной и реактивной нагрузки соответственно; $P_i(U)$ и $Q_i(U)$ – СХН по напряжению для отдельных однотипных групп ПЭЭ; $\Delta P(U)$ и $\Delta Q(U)$ – зависимости потерь мощности от напряжения в электрической сети; α_i , β_i , α_π , β_π – весовые коэффициенты, определяемые по составу потребителей электроэнергии в расчетной нагрузке энергообъекта.

Для использования предложенного подхода к получению СХН по напряжению необходимы следующие данные:

- СХН по напряжению отдельных однотипных групп ПЭЭ;

- состав однотипных групп ПЭЭ в расчетной комплексной нагрузке рассматриваемого узла электрической сети.

В большинстве случаев имеются аналитические выражения СХН по напряжению для определенного состава ПЭЭ (асинхронных и синхронных двигателей, осветительных установок с различными источниками света, дуговых сталеплавильных печей). Данные по СХН для других групп ПЭЭ (сварочных установок, подъемно-транспортных механизмов, индукционных и лифтовых установок) ограничены либо вообще отсутствуют.

Расчетный метод получения СХН целесообразно использовать при наличии в узле комплексной нагрузки определенного количества ПЭЭ с известными СХН. Он применим, в основном, для промышленных предприятий, имеющих в своем составе высоковольтные ПЭЭ с известными типовыми СХН по напряжению [6].

2.4 Заключение по разделу

Данный раздел посвящен теоретическому описанию методов получения статических характеристик нагрузки. Для получения статических характеристик нагрузки можно провести активные и пассивные эксперименты.

Активный эксперимент используется для определения статических и динамических характеристик нагрузки по напряжению и частоте при принудительном изменении в широком диапазоне напряжения на нагрузке или частоты.

Пассивный эксперимент состоит в использовании для получения регулирующих эффектов нагрузки по напряжению тех малых случайных колебаний напряжения, которые всегда имеют место в электрической сети.

А также статические характеристики можно получить расчетным методом. Расчетный метод заключается в определении статических характеристик узла нагрузки на основе данных о статических характеристиках мощности электроприемников.

РАЗДЕЛ 3 ПРОВЕДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Физическое моделирование – это экспериментальный метод исследования. При этом реальному объекту ставится в соответствие его материальная копия – физическая модель, допускающая исследование в лабораторных условиях.

Несмотря на значительный прогресс в развитии методов математического моделирования, они не заменят физический или натурный эксперимент, так как опыт всегда является основой исследования, поэтому при изучении физических процессов и явлений очень важны экспериментальные исследования [7].

Измеренные в условиях эксперимента, проводимого на реальном объекте, опытные данные необходимы для решения следующих задач:

1. Понимание сути физических явлений и построение на основе экспериментальных данных адекватных физико-математических моделей рассматриваемого процесса.
2. Получение базы данных, необходимой для проведения расчетов по заданной математической модели процесса.
3. Подтверждение адекватности математического моделирования сравнением расчетных и опытных данных и уточнение физико-математической модели.

Планирование эксперимента – это комплекс мероприятий, направленных на эффективную постановку опытов. Без наличия плана эксперимента его результативность будет значительно снижена, например, может наблюдаться дублирование измерений некоторых параметров, в то время как другие параметры будут оценены недостаточно точно.

Планирование эксперимента включает ряд этапов:

1. Постановка цели эксперимента и его вида (определяющие, контрольные, сравнительные, исследовательские);

2. Уточнение условий проведения эксперимента – имеющееся или доступное оборудование, сроки работ, финансовые ресурсы, численность и кадровый состав работников;

3. Выявление и выбор входных и выходных параметров на основе сбора и анализа предварительной информации. Входные параметры могут быть регистрируемыми и управляемыми – зависимыми от наблюдателя, и случайными, то есть регистрируемыми, но неуправляемыми. Наряду с ними на состояние исследуемого объекта могут оказывать влияние нерегистрируемые и неуправляемые параметры, которые вносят систематическую или случайную погрешность в результаты измерений, например, ошибки измерительного оборудования, изменение свойств исследуемого объекта в период эксперимента, например, из-за старения материала, или износа, воздействия персонала;

4. Установление необходимой точности результатов измерений – выходных параметров, области возможного изменения входных параметров, уточнение видов воздействий. Выбирается вид образцов или исследуемых объектов, учитывая степень их соответствия реальному изделию по состоянию, устройству, форме, размерам и другим характеристикам. Точность экспериментальных данных существенно зависит от объёма испытаний – чем испытаний больше, тем при тех же условиях выше достоверность результатов;

5. Составление плана и проведение эксперимента — количество и порядок испытаний, способ сбора, хранения и документирования данных. Порядок проведения испытаний важен, если входные параметры (факторы) при исследовании одного и того же объекта в течение одного опыта принимают разные значения;

6. Статистическая обработка результатов эксперимента, построение математической модели поведения исследуемых характеристик. Необходимость обработки вызвана тем, что выборочный анализ отдельных данных, вне связи с остальными результатами, или же некорректная их

обработка могут не только снизить ценность практических рекомендаций, но и привести к ошибочным выводам;

7. Объяснение полученных результатов и формулирование рекомендаций по их использованию, уточнению методики проведения эксперимента [17].

3.1 Элементы физической модели, используемые в экспериментах

Физическая модель представляет собой систему электроснабжения [8].

На рис. 3.1 – 3.6 представлены схемы для проведения экспериментов по снятию статических характеристик нагрузки по напряжению.

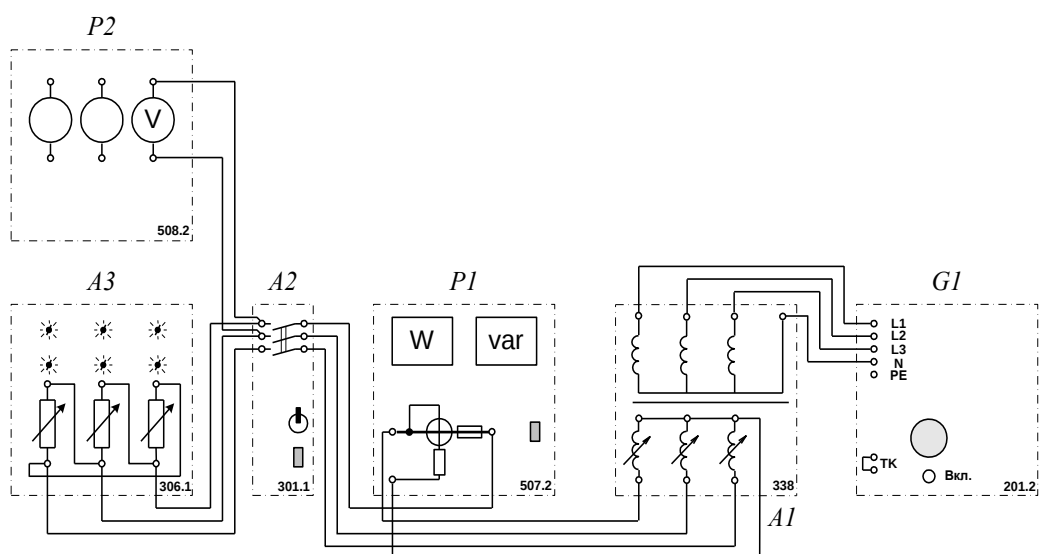


Рисунок 3.1 – Схема для снятия статических характеристик активной нагрузки

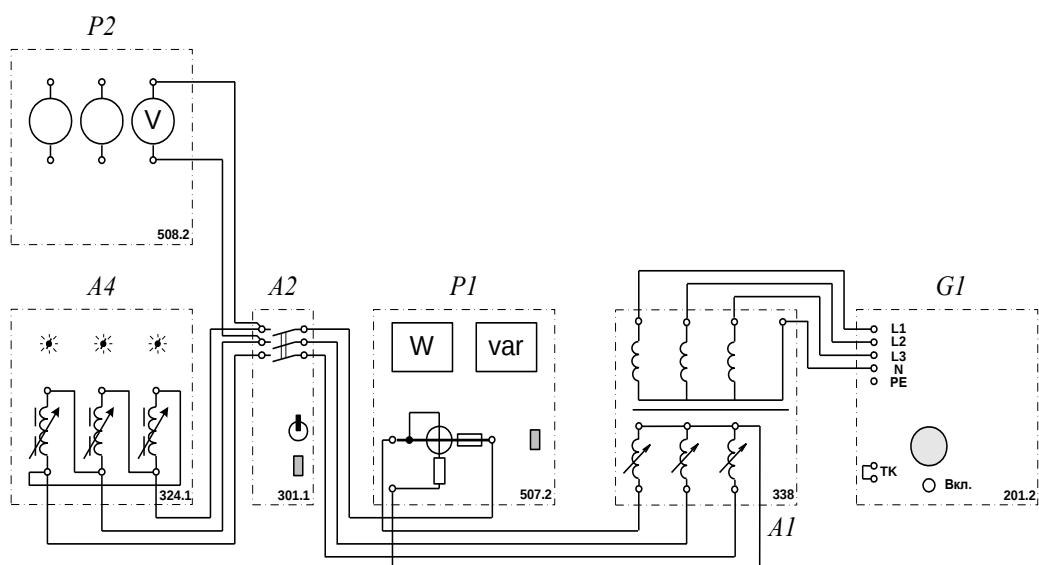


Рисунок 3.2 – Схема для снятия статических характеристик индуктивной нагрузки

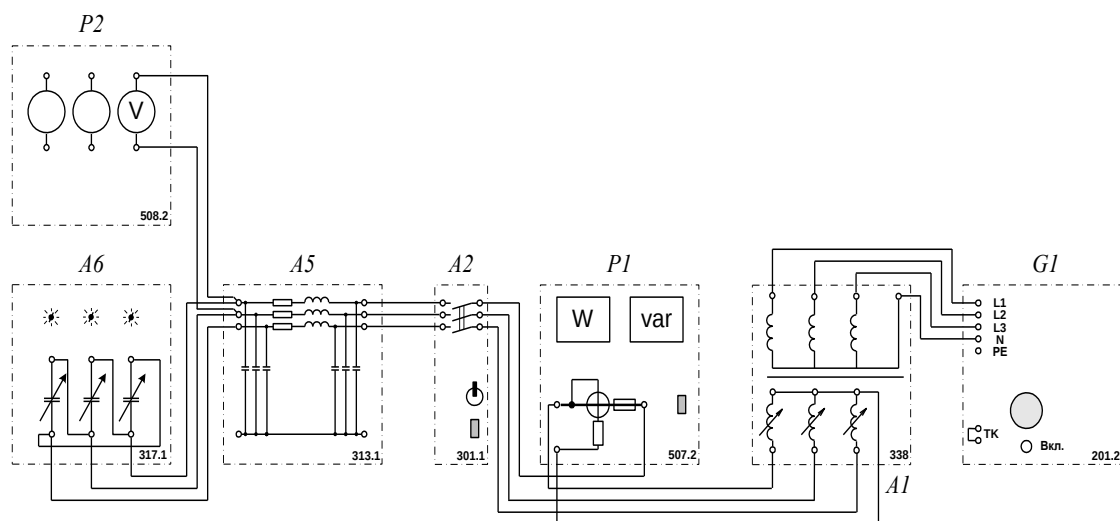


Рисунок 3.3 – Схема для снятия статических характеристик емкостной нагрузки

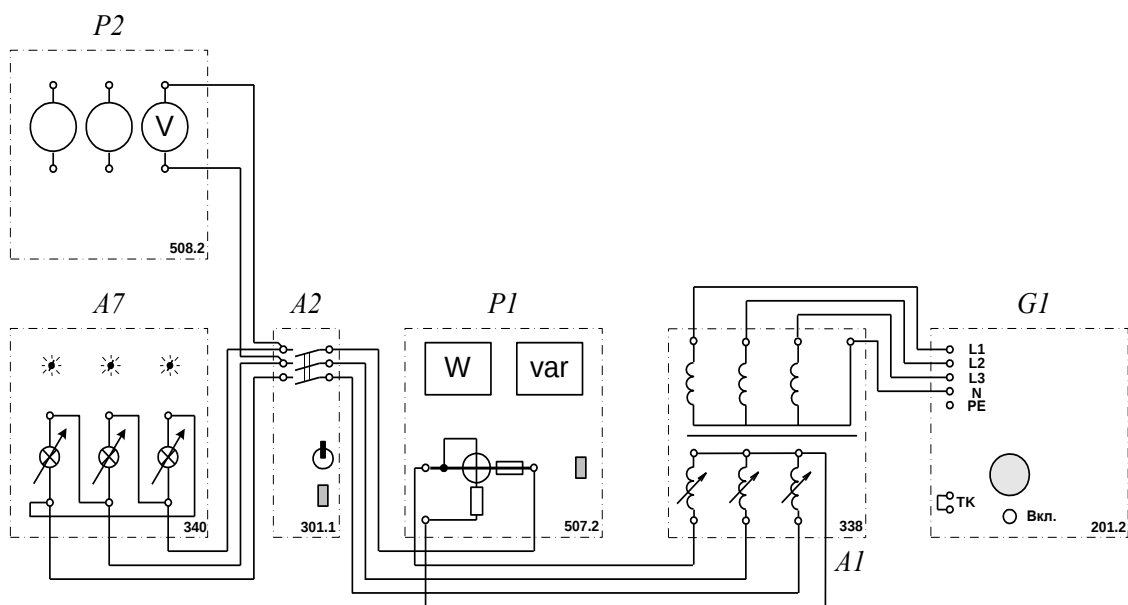


Рисунок 3.4 – Схема для снятия статических характеристик осветительной нагрузки

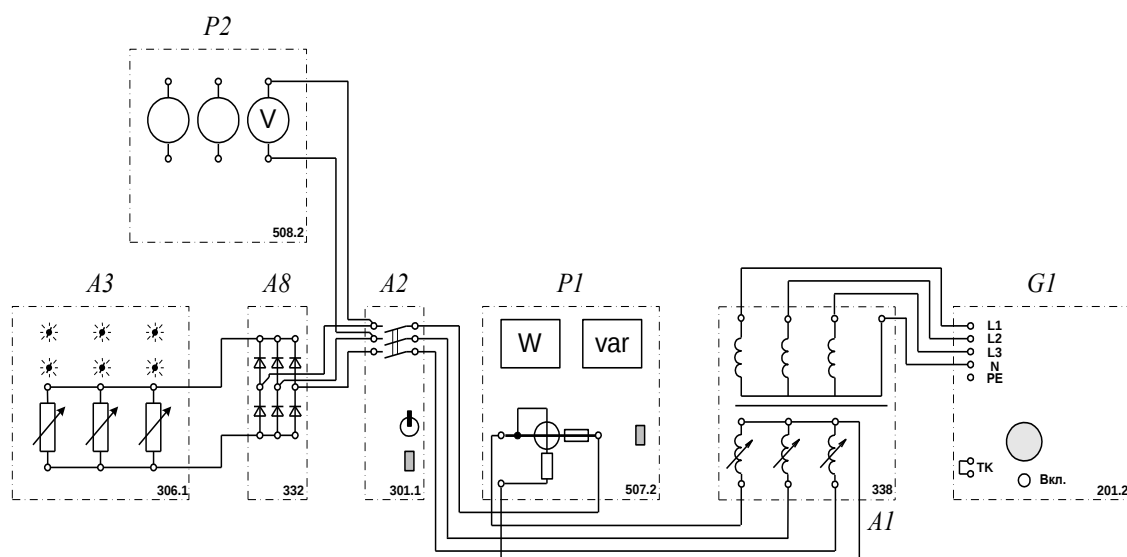


Рисунок 3.5 – Схема для снятия статических характеристик выпрямительной нагрузки

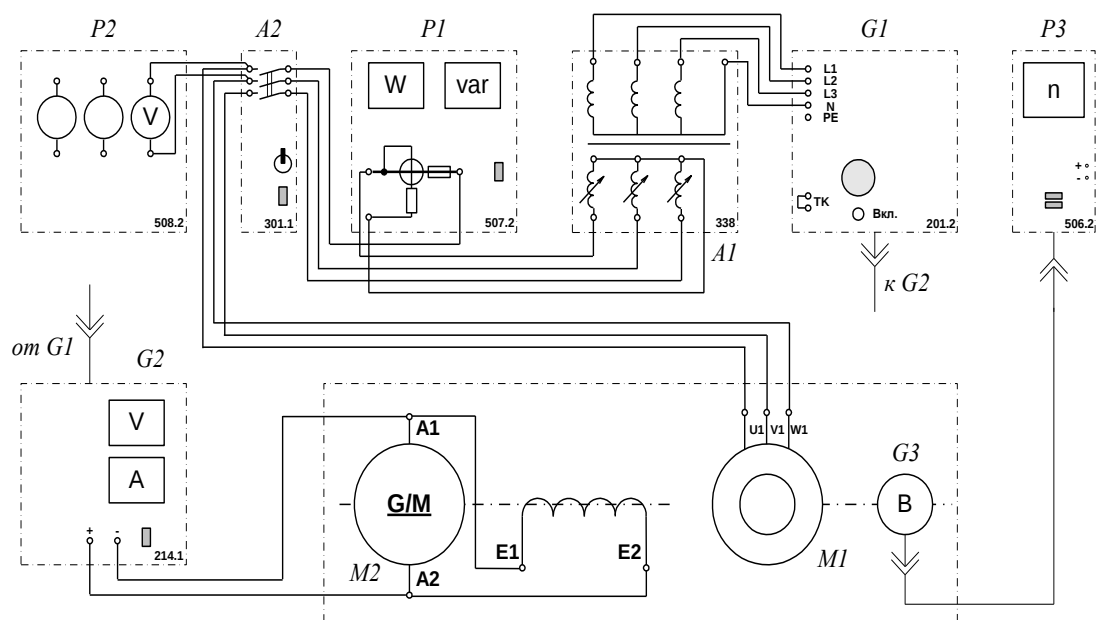


Рисунок 3.6 – Схема для снятия статических характеристик асинхронной нагрузки

По схемам, приведенным на рис 3.1-3.6 , были проведены активные эксперименты согласно плану.

При планировании необходимо учесть регулировочный диапазон и величину изменения напряжения при переходе с одной ступени регулирования трансформатора на другую. Эксперимент разбивается на четыре стадии. На первой стадии проведения эксперимента переключением РПН регулировочного трансформатора устанавливается напряжение, равным номинальному значению

$U_{\text{ном}}$. На второй стадии – последовательно повышается напряжение от $U_{\text{ном}}$ до максимального напряжения U_{max} ступенями по напряжению 2,3% от номинального напряжения $U_{\text{ном}}$. На третьей стадии переключением РПН трансформатора последовательно снижается напряжение от максимального напряжения U_{max} до минимального напряжения U_{min} ступенями по напряжению 2,3% от номинального напряжения $U_{\text{ном}}$. На четвертой стадии – последовательно повышается напряжение от минимального напряжения U_{min} до номинального напряжения $U_{\text{ном}}$ ступенями по напряжению 2,3% от номинального напряжения $U_{\text{ном}}$. Процесс изменения напряжения условно проиллюстрирован на рис 3.7

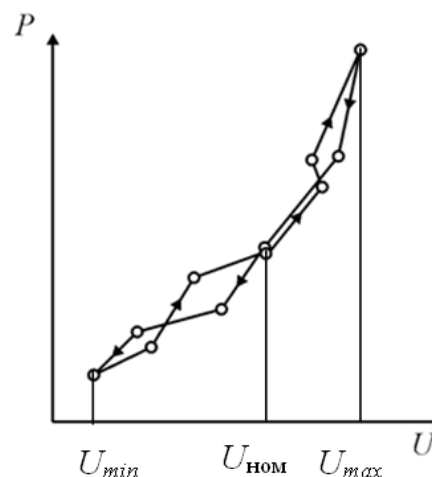


Рисунок 3.7 – Процесс изменения напряжения

На каждой стадии фиксируются напряжение, трехфазная активная P и реактивная Q мощности для одних и тех же ступеней при изменении напряжения по схеме: $U_{\text{ном}} \rightarrow U_{\text{max}} \rightarrow U_{\text{min}} \rightarrow U_{\text{ном}}$.

Продолжительность работы на каждой ступени с постоянным напряжением должна составлять не менее 2-х минут;

Схема измерений должна быть составлена таким образом, чтобы обеспечить регистрацию напряжений в точке питания, результирующих значений трехфазной активной P и реактивной Q мощностей.

3.2 Технические характеристики элементов физической модели

Перечень аппаратуры, требуемой для проведения экспериментов, приведен в табл. 3.1

Таблица 3.1 – Перечень аппаратуры

Обозначение	Наименование	Тип	Параметры
A1	Регулировочный трансформатор	338	250ВА 3х220/3х90...140В
A2	Трёхполюсный выключатель	301.1	400 В~;10А
A3	Активная нагрузка	306.1	3х0...50Вт; 220/380В
A4	Индуктивная нагрузка	324.2	220/380 В; 50 Гц; 3х50 Вар
A5	Модель линии электропередачи	313.2	400 В; 50 Гц; 3х0,3 А индуктивность/активное сопротивление фазы 0...1,5 Гн/ 0...250 Ом, ёмкость между фазой и землёй 0...0,45 мкФ
A6	Емкостная нагрузка	317.2	220/380 В; 50 Гц; 3х50 Вар
A7	Осветительная нагрузка	340	3х0...45 Вт 220 В 220/380 В; 50 Гц; 3х50 Вар
A8	Блок диодов	332	2 А;600 В
P1	Измеритель мощностей	507.2	0...600 ВА

Обозначение	Наименование	Тип	Параметры
			0...1 А 0...600 В
P2	Блок мультиметров	508.2	3 мультиметра 0...10 А; 0...1000 В; 0...20 МОм
P3	Указатель частоты вращения	506.2	2000...0...2000 мин ⁻¹
G1	Трехфазный источник питания	201.2	400 В ~; 16 А
G2	Источник питания двигателя постоянного тока	206.1	Цепь якоря 0...250 В–; 3 А Цепь возбуждения 200 В–; 1 А
G3	Преобразователь угловых перемещений	104	6 вых. каналов / 2500 импульсов за оборот
M1	Асинхронный двигатель	103.1	120 Вт; 220/380 В; cosφ=0,7; 1360 мин ⁻¹
M2	Машина постоянного тока	101.2	90 Вт / 220 В / 0,56 А (якорь) / 2×110 В / 0,25 А (возбуждение)

По схемам, приведенным на рис. 3.1 - 3.6, были проведены активные эксперименты.

3.3 Результаты экспериментов

Результаты экспериментов приведены в табл. 3.2 – 3.11

Таблица 3.2 – Эксперимент с активной нагрузкой

Напряжение, В	Мощность	
	Р, Вт	Q, вар

220	8400	900
224	8850	1050
229	9375	1500
233	9750	1500
237	10125	1500
214	8250	1500
210	7875	1500
206	7500	1500
201	7350	1350
197	6900	1350
192	6375	1350
218	8850	1425
223	9000	1500
228	9375	1500
232	9750	1500
235	10125	1500
214	8250	1500
209	7875	1350
205	7500	1350
200	7350	1350
196	6900	1350
191	6375	1350

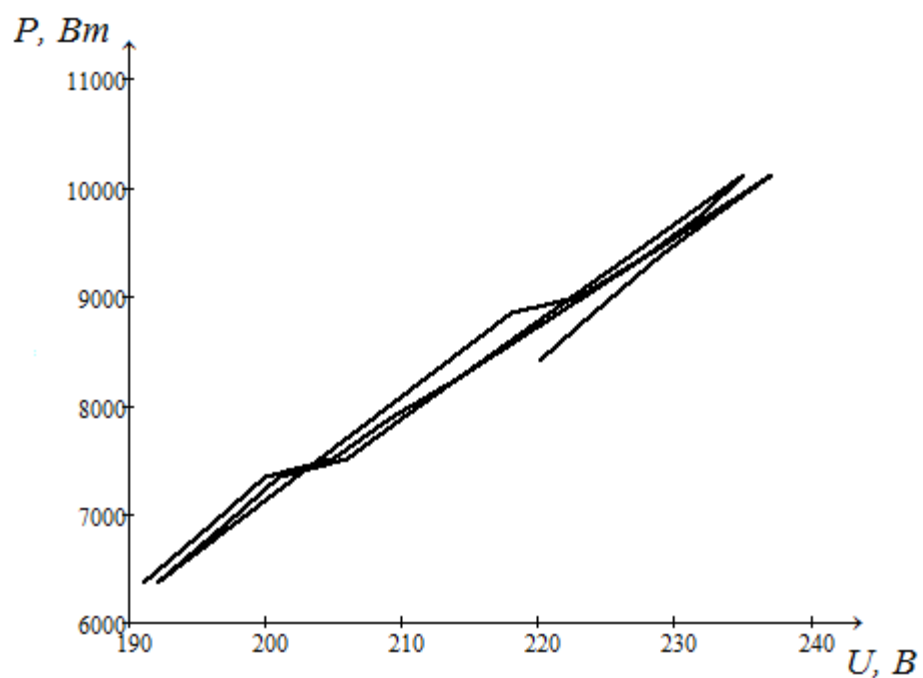


Рисунок 3.7 - Статические характеристики $P(U)$ при активной нагрузке

Таблица 3.3 – Эксперимент с индуктивной нагрузкой

Напряжение, В	Мощность	
	Р, Вт	Q, вар
220	0	9600
226	0	9975
230	0	10425
234	0	10725
238	0	11175
216	0	9150
211	0	8850
207	0	8475
202	0	8100
197	0	7800
193	0	7500
220	0	9600
224	0	10050
229	0	10245

234	0	10800
238	0	11175
215	0	9150
211	0	8850
206	0	8400
202	0	8100
197	0	7800
193	0	7500

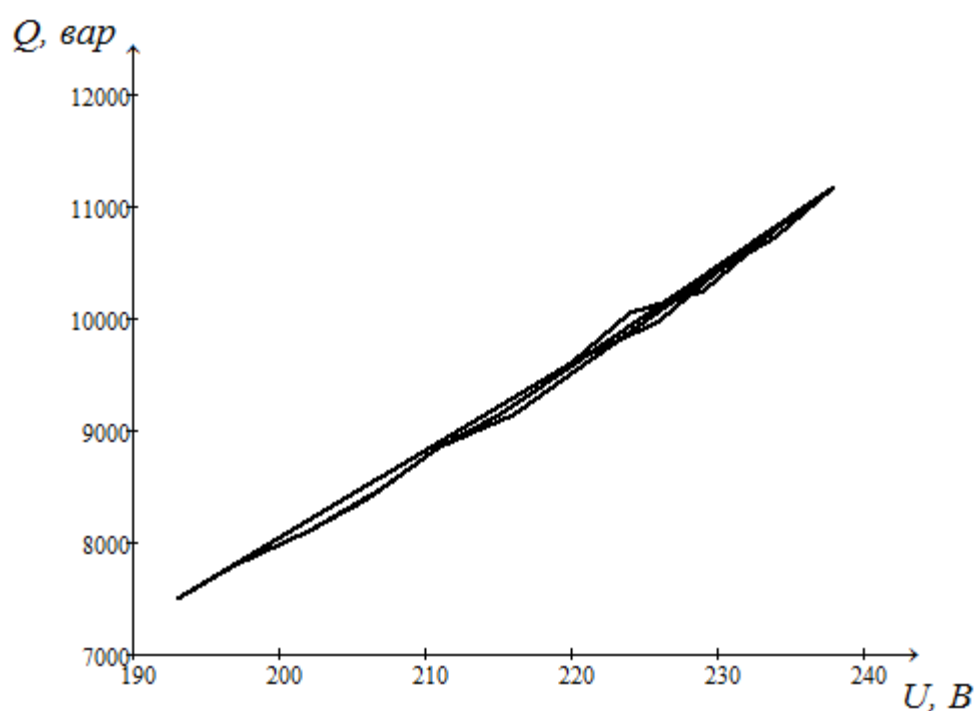


Рисунок 3.8 – Статические характеристики $Q(U)$ при индуктивной нагрузке

Таблица 3.4 – Эксперимент с емкостной нагрузкой

Напряжение, В	Мощность	
	Р, Вт	Q, вар
224	4125	-7125
228	4350	-7350
233	4500	-7575
238	4575	-7800
242	4725	-8175

219	3900	-6750
215	3750	-6375
210	3600	-6075
206	3375	-5850
201	3150	-5625
196	3000	-5325
224	4125	-7125
228	4350	-7350
232	4425	-7575
237	4575	-7800
242	4725	-8175
219	3900	-6675
214	3750	-6375
210	3525	-6075
205	3300	-5850
201	3075	-5625
196	3000	-5325

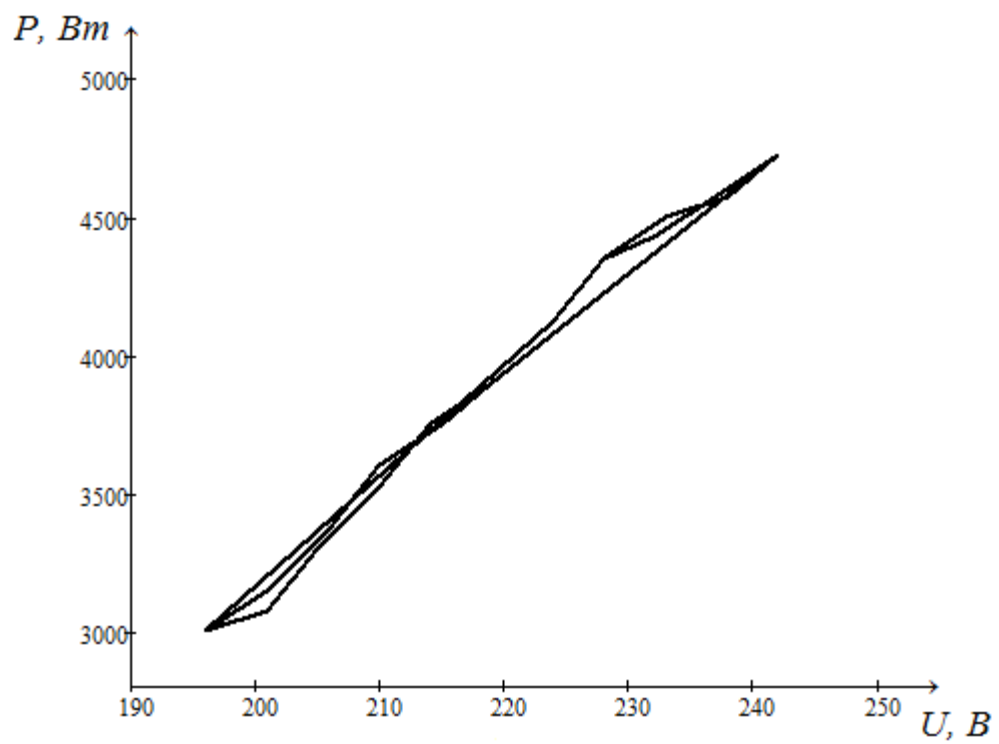


Рисунок 3.9 – Статические характеристики $P(U)$ при емкостной нагрузке

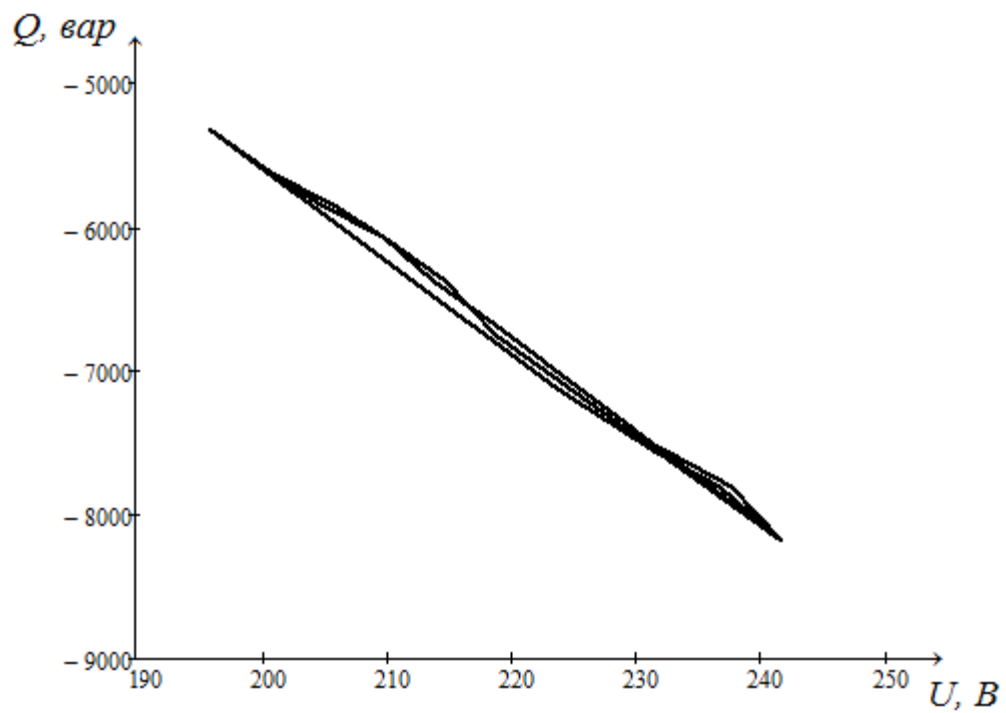


Рисунок 3.10 – Статические характеристики $Q(U)$ при емкостной нагрузке

Таблица 3.5 – Эксперимент с осветительной нагрузкой

Напряжение, В	Мощность	
	Р, Вт	Q, вар
218	2460	0
222	2610	0
227	2700	0
231	2820	0
236	2940	0
213	2460	0
209	2370	0
204	2280	0
200	2190	0
196	2100	0
191	2010	0
218	2460	0
222	2610	0
227	2700	0
231	2820	0
236	2940	0
213	2460	0
208	2370	0
204	2280	0
200	2190	0
196	2100	0
191	2010	0

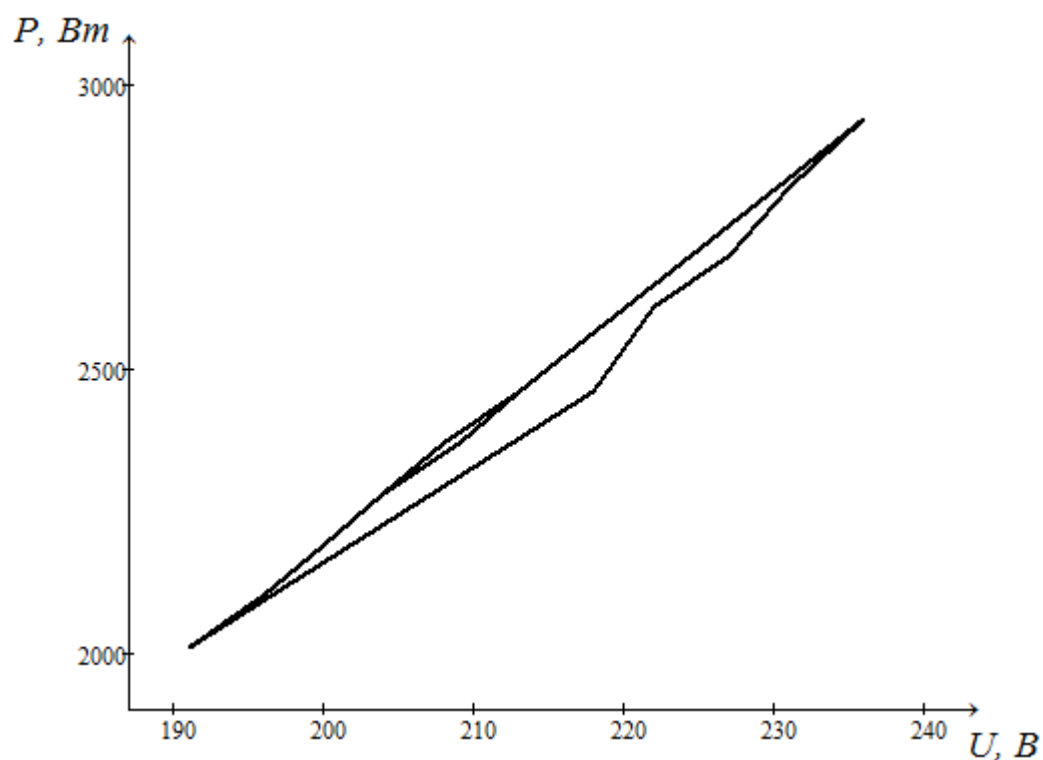


Рисунок 3.11 – Статические характеристики $P(U)$ при осветительной нагрузке

Таблица 3.6 – Эксперимент с выпрямительной нагрузкой

Напряжение, В	Мощность	
	Р, Вт	Q, вар
220	10875	375
225	11250	375
229	11625	375
233	12000	375
238	12375	375
216	10500	375
211	9750	375
207	9375	375
202	9000	375
198	8625	375
194	8250	375
220	10875	375
225	11250	375

Напряжение, В	Мощность	
230	11625	375
234	12000	375
238	12375	375
216	10500	375
212	9750	375
207	9375	375
203	9000	375
198	8625	375
194	8250	375

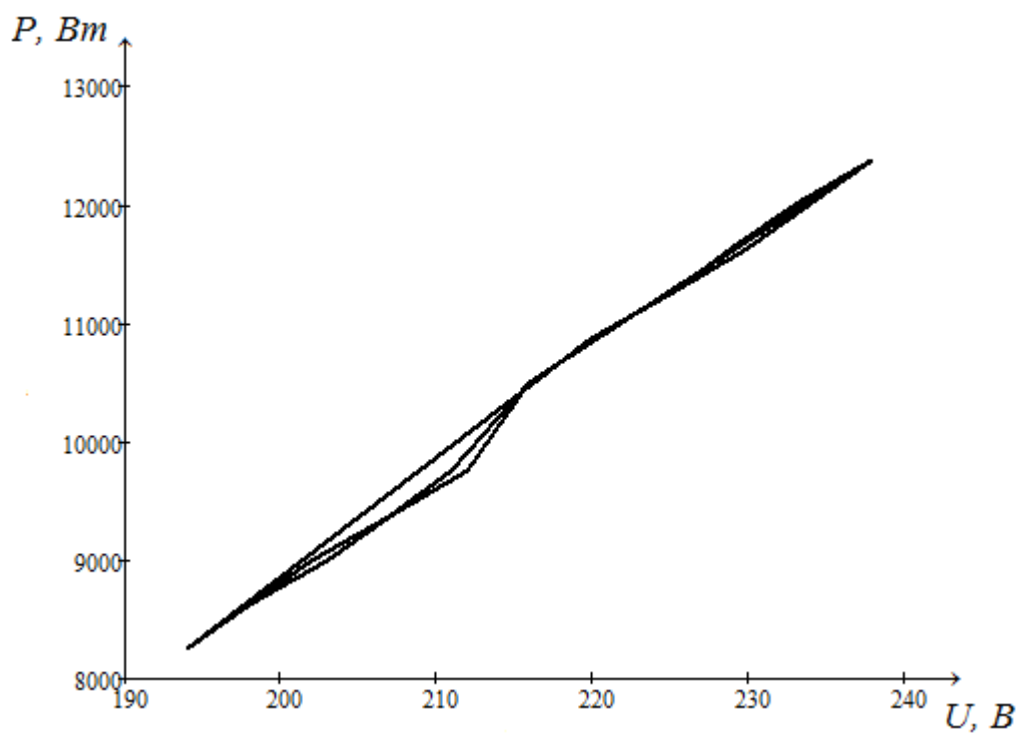


Рисунок 3.12 – Статические характеристики $P(U)$ при выпрямительной нагрузке

Таблица 3.7 – Эксперимент с активно-индуктивной нагрузкой

Напряжение, В	Мощность	
	Р, Вт	Q, вар
221	7350	7500

Напряжение, В	Мощность	
225	7500	7875
229	7875	8250
233	8250	8625
238	8475	8850
216	7125	7350
211	6675	7050
206	6300	6750
202	6075	6375
197	5850	6075
193	5625	5925
219	7350	7500
224	7500	7725
228	7650	7950
233	8175	8475
238	8475	8850
215	7125	7350
211	6675	7050
207	6375	6750
202	6075	6375
198	5850	6150
193	5625	6000

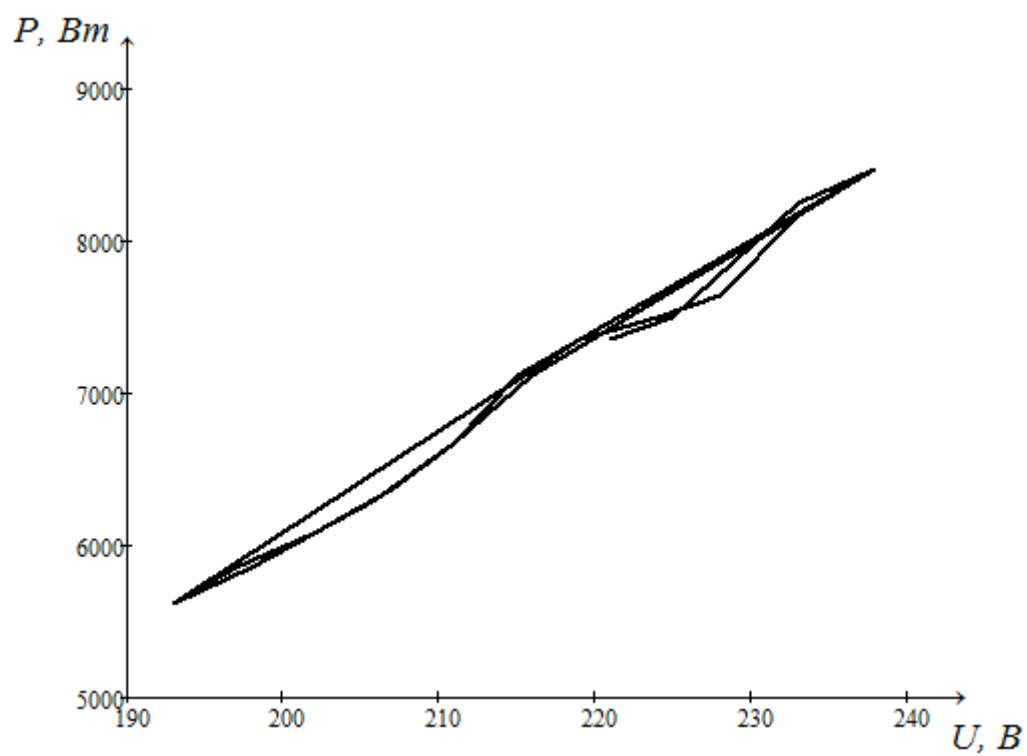


Рисунок 3.13 – Статические характеристики $P(U)$ при активно-индуктивной нагрузке

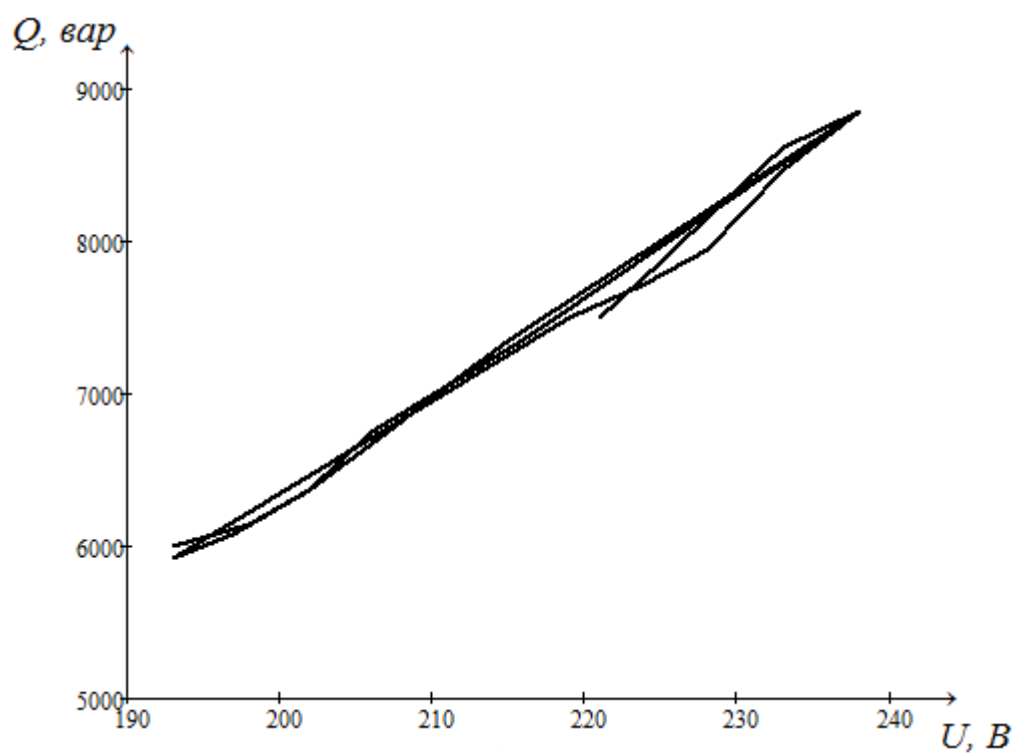


Рисунок 3.14 – Статические характеристики $Q(U)$ при активно-индуктивной нагрузке

Таблица 3.8 – Эксперимент с активно-емкостной нагрузкой

Напряжение, В	Мощность	
	Р, Вт	Q, вар
221	4575	-3075
226	4725	-3225
231	4875	-3375
235	5100	-3600
240	5325	-3825
217	4425	-3000
212	4350	-2925
208	4200	-2775
203	3900	-2475
199	3675	-2325
195	3375	-2250
221	4575	-3075
226	4725	-3225
231	4875	-3375
235	5100	-3600
240	5325	-3825
217	4425	-3000
212	4350	-2925
208	4200	-2775
204	3900	-2475
199	3675	-2325
194	3375	-2250

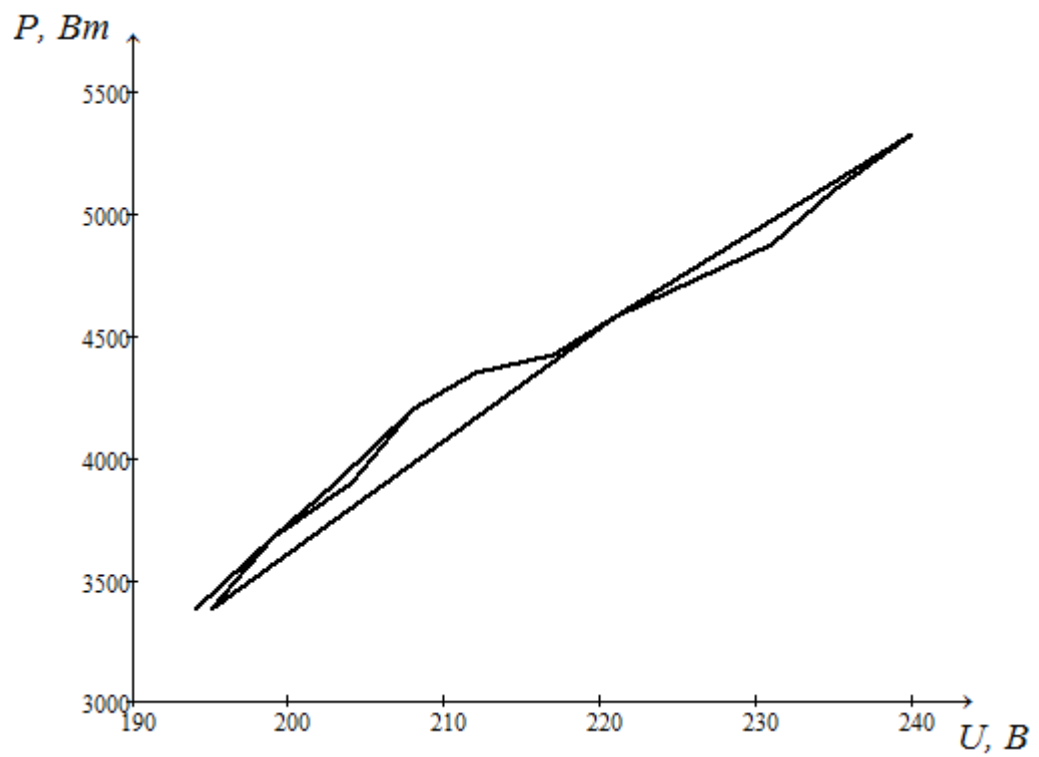


Рисунок 3.15 – Статические характеристики $P(U)$ при активно-емкостной нагрузке

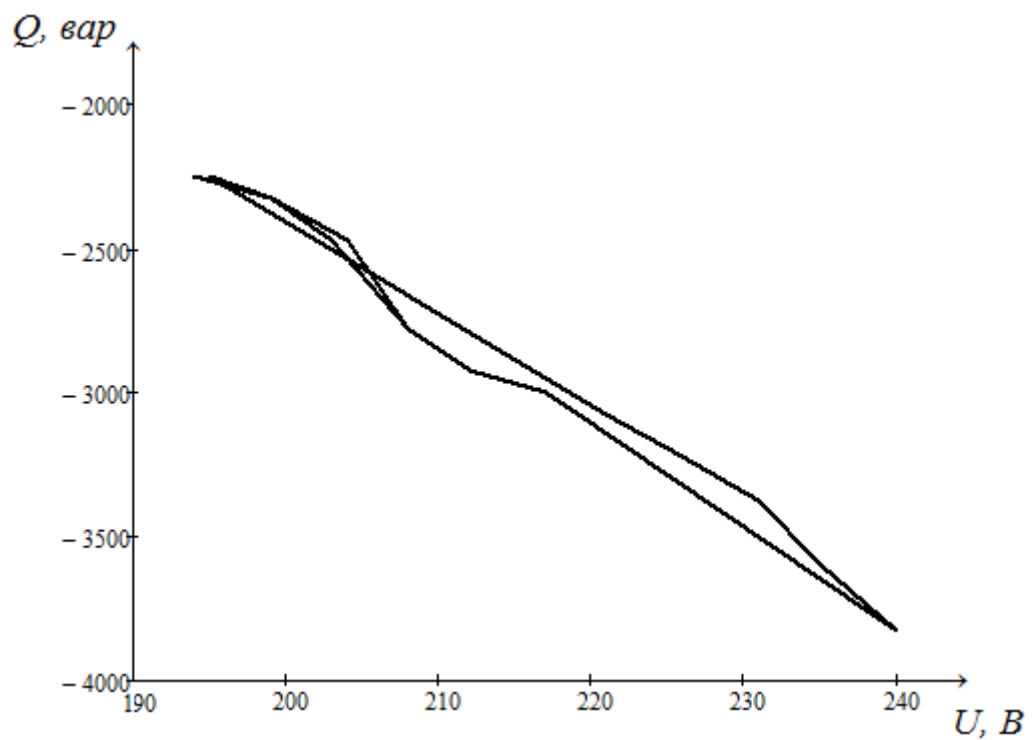


Рисунок 3.16 – Статические характеристики $Q(U)$ при активно-емкостной нагрузке

Таблица 3.9 – Эксперимент с индуктивно-емкостной нагрузкой

Напряжение, В	Мощность	
	Р, Вт	Q, вар
220	1125	7875
225	1200	8100
229	1275	8400
233	1350	8700
238	1425	9000
215	1050	7500
210	975	7275
206	900	7050
201	825	6675
197	750	6225
192	675	6000
219	1125	7875
224	1200	8025
229	1275	8325
233	1350	8775
238	1425	9000
215	1050	7500
211	975	7350
206	900	7050
202	825	6675
197	750	6300
193	675	6000

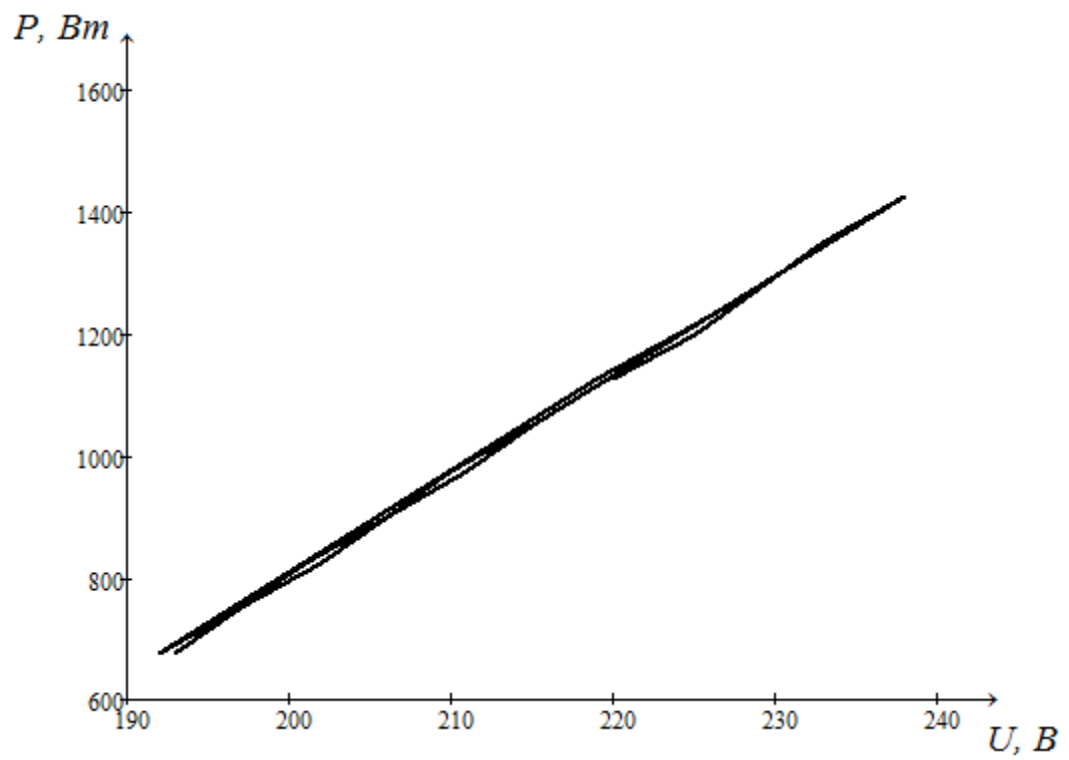


Рисунок 3.17 – Статические характеристики $P(U)$ при индуктивно-емкостной нагрузке

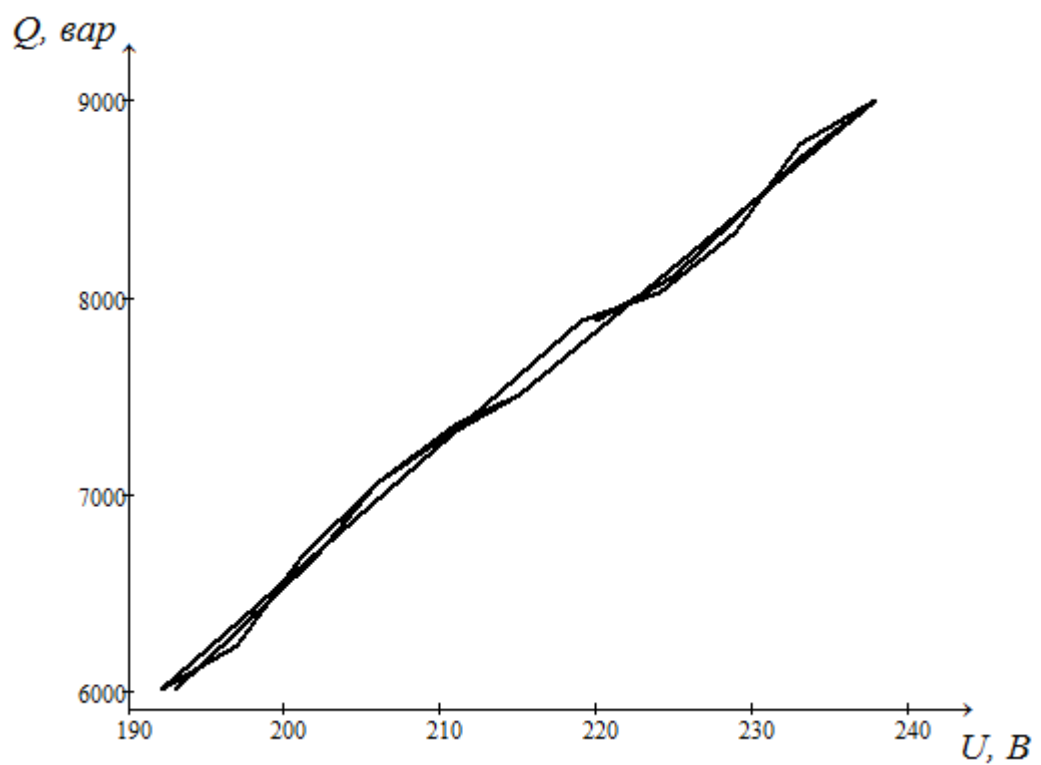


Рисунок 3.18 – Статические характеристики $Q(U)$ при индуктивно-емкостной нагрузке

Таблица 3.10 – Эксперимент с синхронным двигателем

Напряжение, В	Мощность	
	Р, Вт	Q, вар
220	19050	0
225	19200	0
230	19350	0
234	19650	0
216	18900	0
213	18600	0
208	18300	0
204	18150	0
199	18000	0
194	17700	0
190	17550	0
221	19050	0
225	19650	0
230	20250	0
234	20400	0
217	18900	0
212	18600	0
208	18150	0
203	17850	0
199	17700	0
195	17750	0
190	17400	0

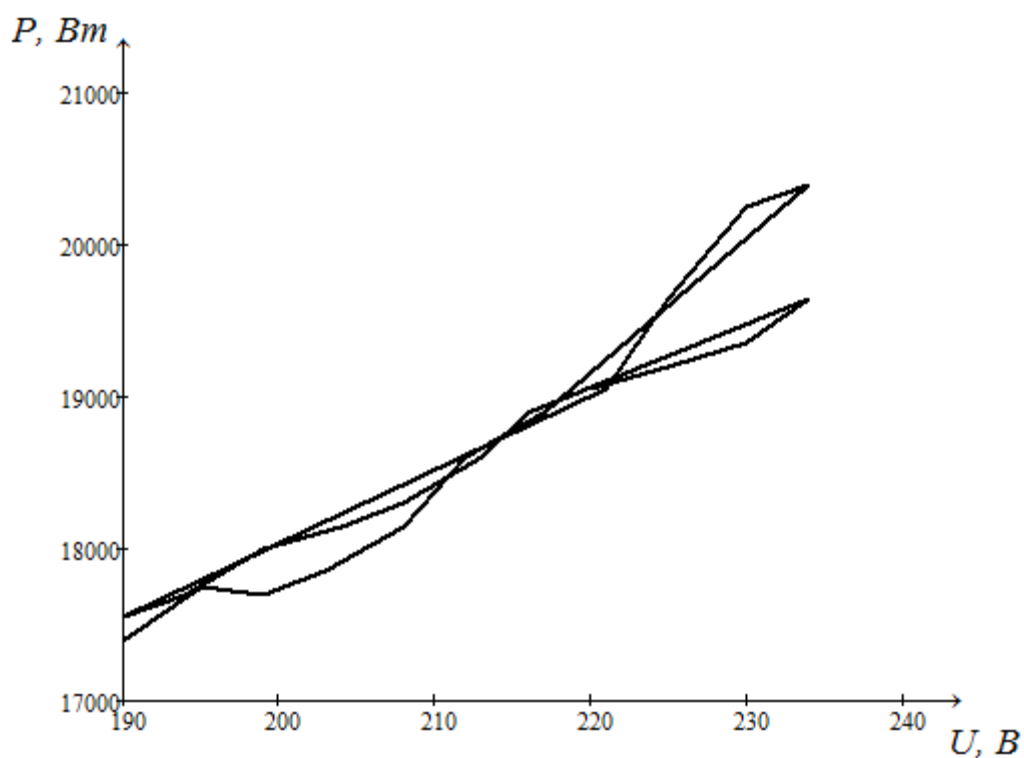


Рисунок 3.19 - Статические характеристики $P(U)$ при синхронной нагрузке

Таблица 3.11 – Эксперимент с асинхронным двигателем

Напряжение, В	Мощность	
	Р, Вт	Q, вар
216	1368	0
221	1344	0
225	1332	0
229	1326	0
231	1320	0
212	1386	0
207	1350	0
203	1326	0
199	1308	0
194	1266	0
189	1236	0
216	1374	0
220	1356	0

Напряжение, В	Мощность	
225	1338	0
230	1326	0
234	1320	0
212	1386	0
207	1344	0
203	1320	0
198	1296	0
194	1260	0
189	1224	0

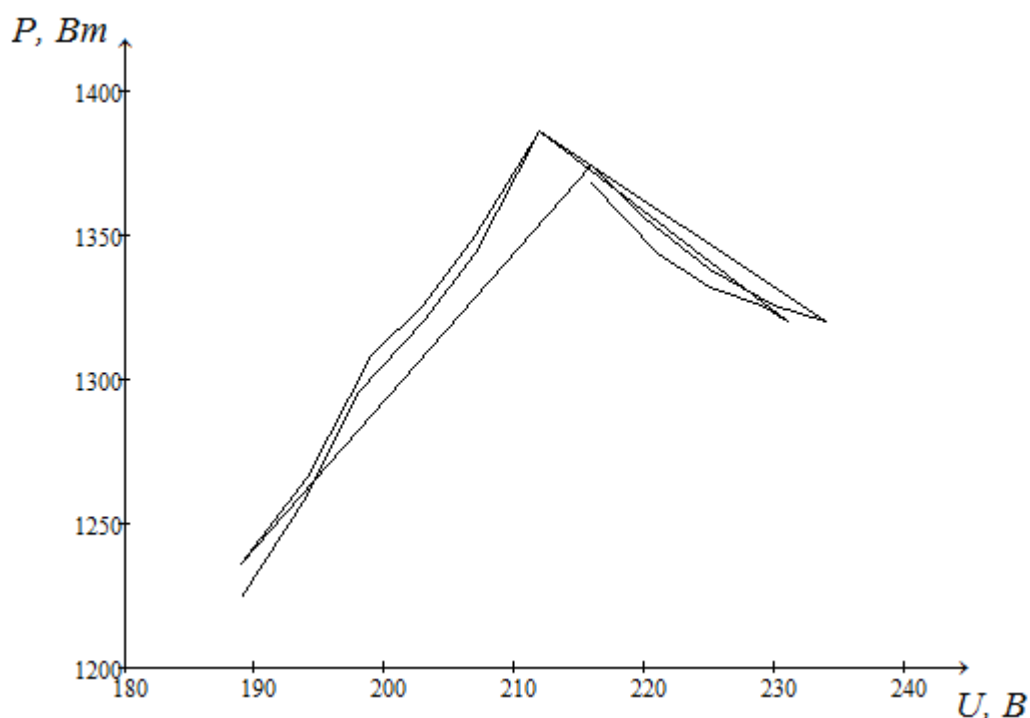


Рисунок 3.20 – Статические характеристики $P(U)$ при асинхронной нагрузке

2.5 Заключение по разделу

Раздел посвящен описанию физической модели, на которой будут проводиться активные эксперименты для получения статических характеристик нагрузки.

На основе описания лабораторного оборудования, были подготовлены электрические схемы соединения для проведения экспериментов.

Кроме того, в главе описана процедура планирования экспериментов, что позволит провести все необходимые опыты более эффективно, и снизит риск получения недостоверных результатов исследования.

В результате проведения экспериментов были получены массивы значений U, P, Q .

РАЗДЕЛ 4. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОЛУЧЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТОВ ПОЛИНОМОВ СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК НАГРУЗКИ

4.1 Определение коэффициентов полиномов СХН математическими методами

4.1.1 Метод наименьших квадратов

Для обработки экспериментальных данных часто используют разные виды аппроксимации. Метод построения аппроксимирующей функции $\varphi(x)$ из условия минимума суммы квадратов отклонений от экспериментальных точек

$$f(x_i), Q = \sum_{i=0}^n \varepsilon_i^2 = \sum_{i=0}^n [f(x_i) - \varphi(x_i)]^2 \Rightarrow \min \text{ называют методом наименьших}$$

квадратов. Наиболее распространен выбор функции $\varphi(x)$ в виде комбинации

$$\varphi(x) = k_0 \cdot \varphi_0(x) + k_1 \cdot \varphi_1(x) + \dots + k_m \cdot \varphi_m(x),$$

где $\varphi_m(x)$ - базисные функции; k_m - коэффициенты аппроксимации.

На рис 4.1 представлены виды аппроксимирующих функций.

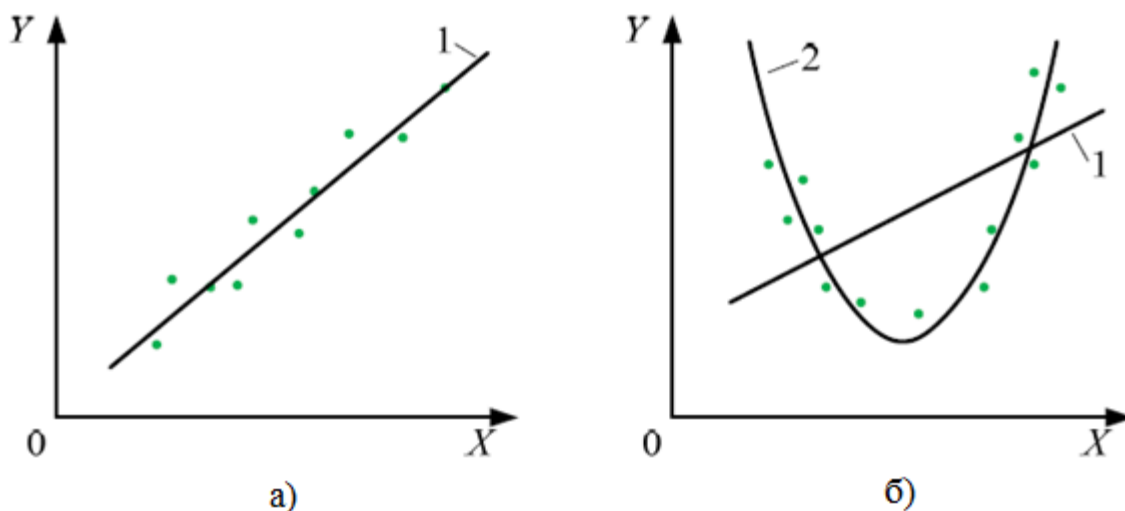


Рисунок 4.1 – Виды аппроксимирующей функции: (а) линейная аппроксимация;
(б) полиномиальная аппроксимация

Обычно при обработке экспериментальных данных начинают с основной базисной функции, например линейной. Выбор базисной функции определяется свойствами аппроксимируемой зависимости.

На практике при обработке экспериментальных данных оказывается возможным ограничиться построением линейной аппроксимации

$$\varphi(x) = a_0 + a_1 \cdot x, \quad (4.1)$$

коэффициенты которой определяют по выражениям

$$a_1 = \frac{\sum_{i=0}^{n-1} x_i \cdot \sum_{i=0}^{n-1} y_i - n \cdot \sum_{i=0}^{n-1} y_i \cdot x_i}{\left(\sum_{i=0}^{n-1} x_i\right)^2 - n \cdot \sum_{i=0}^{n-1} x_i^2}; a_0 = \frac{1}{n} \cdot \left[\sum_{i=0}^{n-1} y_i - a_1 \cdot \sum_{i=0}^{n-1} x_i \right]. \quad (4.2)$$

При применении СХН необходимо найти коэффициент квадратичного полинома, поэтому помимо линейной аппроксимации можно аппроксимировать функцию полиномиальной регрессией. В этом случае функция имеет вид (4.3)

$$\varphi(x) = a_0 + a_1 \cdot x + a_2 \cdot x^2 + \dots + a_m \cdot x^m. \quad (4.3)$$

Коэффициенты полинома (4.3) определяются путем решения СЛАУ (4.4)

$$\begin{aligned} c_0 \cdot a_0 + c_1 \cdot a_1 + c_2 \cdot a_2 + \dots + c_m \cdot a_m &= b_0; \\ c_1 \cdot a_0 + c_2 \cdot a_1 + c_3 \cdot a_2 + \dots + c_{m+1} \cdot a_m &= b_1; \\ \vdots & \\ c_m \cdot a_0 + c_{m+1} \cdot a_1 + c_{m+2} \cdot a_2 + \dots + c_{2 \cdot m} \cdot a_m &= b_m. \end{aligned} \quad (4.4)$$

Где:

$$\begin{aligned} c_i &= \sum_{i=0}^{n-1} x_i^j, & j &= 0, 1, 2, \dots, 2 \cdot m; \\ b_i &= \sum_{i=0}^{n-1} x_i^k \cdot y_i, & k &= 0, 1, 2, \dots, m. \end{aligned} \quad [19]$$

Исходными данными для определения коэффициентов квадратичного полинома статических характеристик нагрузки по активной и реактивной мощностям являются табличные значения P , Q , U . Число соответствующих точек (триад) должно быть не меньше шести.

Определение коэффициентов полиномов СХН методом наименьших квадратов выполняется по алгоритму:

1. Формируется система уравнений вида (4.5)

$$\begin{aligned}
a_0 + a_1 \cdot U_1 + a_2 \cdot U_1^2 &= P_1; \\
a_0 + a_1 \cdot U_2 + a_2 \cdot U_2^2 &= P_2; \\
&\vdots \\
a_0 + a_1 \cdot U_n + a_2 \cdot U_n^2 &= P_n.
\end{aligned}
\tag{4.5}$$

В матричной форме система уравнений (4.5) запишется как

$$\begin{pmatrix} 1 & U_1 & U_1^2 \\ 1 & U_2 & U_2^2 \\ \dots & \dots & \dots \\ 1 & U_n & U_n^2 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} P_1 \\ P_2 \\ \dots \\ P_n \end{pmatrix},
\tag{4.6}$$

где,

$U_1, U_2, \dots, U_n$ – значения напряжения в узле, для которого определяется статическая характеристика;

$P_1, P_2, \dots, P_n$ – значения мощности, соответствующие значениям напряжения в узле;

a_0, a_1, a_2 – коэффициенты полинома в именованных единицах.

Система уравнений (4.6) является переопределенной (число уравнений больше числа неизвестных).

2. Для определения коэффициентов a_0, a_1, a_2 проводится решение переопределенной системы уравнений (4.6) следующим образом:

$$X = (A^T \cdot A)^{-1} \cdot A^T \cdot B,
\tag{4.7}$$

где

$$X = \begin{pmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \end{pmatrix}, A = \begin{pmatrix} 1 & U_1 & U_1^2 \\ 1 & U_2 & U_2^2 \\ \dots & \dots & \dots \\ 1 & U_n & U_n^2 \end{pmatrix}, B = \begin{pmatrix} P_1 \\ P_2 \\ \dots \\ P_n \end{pmatrix}.
\tag{4.8}$$

Полученные коэффициенты имеют размерность:

$$a_0 = [\text{Вт}];$$

$$a_1 = [\text{Вт/В}];$$

$$a_2 = [\text{Вт/В}^2].$$

3. Далее производится переход к коэффициентам в относительных единицах. Для этого необходимо задать базисные значения напряжения и мощности. За базисное напряжение может приниматься номинальное напряжение электроприемника (узла сети, для которого определяется статическая характеристика). В качестве базисной мощности принимается мощность, соответствующая базисному напряжению. После задания мощности и напряжения коэффициенты полинома в относительных единицах определяются как:

$$a_0 = \frac{a'_0}{P_{баз}}, a_1 = \frac{a'_1 \cdot U_{баз}}{P_{баз}}, a_2 = \frac{a'_2 \cdot U_{баз}^2}{P_{баз}}. \quad (4.9)$$

После получения коэффициентов необходимо осуществить их проверку, которая основана на проверке нулевой гипотезы [23]. Нулевая гипотеза отвергает гипотезу, положенную в основу моделирования, то есть предполагает, что модель не улавливает закономерностей процесса.

Одним из параметров для оценки правильности полученной модели является оценка дисперсии. Дисперсия случайной величины характеризует меру разброса случайной величины около ее математического ожидания. Математическое ожидание — это число, вокруг которого сосредоточены значения случайной величины [25].

Например, оценка дисперсии значений мощности с числом степеней свободы $\lambda_1 = N - 1$ находится по формуле (4.10)

$$S_P^2 = \frac{\sum_{i=1}^N [P_i - M(P)]^2}{N - 1}, \quad (4.10)$$

Где:

P_i — значение мощности из ряда исходных данных;

N — количество точек измерений;

$M(P) = \frac{\sum_{i=1}^N P_i}{N}$ — математическое ожидание мощности по ряду данных.

Вторым параметром для оценки правильности определения коэффициентов СХН является дисперсия ошибки $S_{\text{ош}}^2$ с числом степеней свободы $\lambda_2 = N - n$

$$S_{\text{ош}}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N \varepsilon_i^2}{N - n}, \quad (4.11)$$

Где:

$\varepsilon_i = (P_i - P_{mi})$, где

P_{mi} - значение мощности по полиному, соответствующее i -тому напряжению;

n – число коэффициентов модели (полинома).

Отношение дисперсий $F = \frac{S_P^2}{S_{\text{ош}}^2}$ подчиняется распределению Фишера,

так как это показано на рис.4.2.

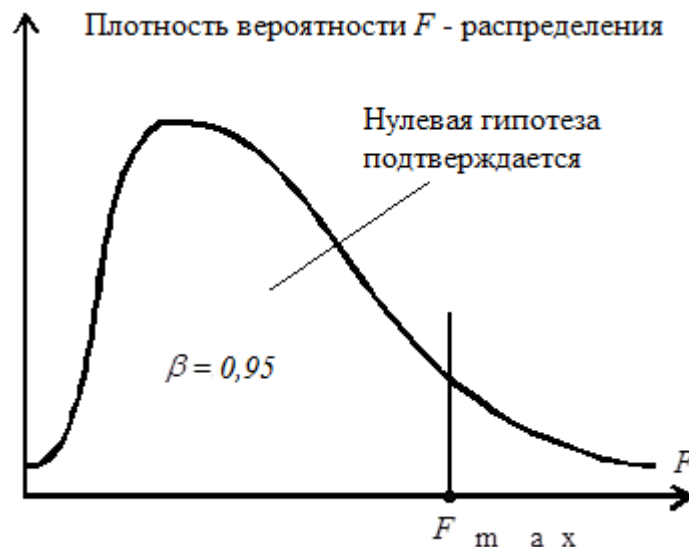


Рисунок 4.2 – Распределение Фишера

Задавая близкий к единице доверительный уровень $\beta = 0,95$, можно определить по стандартному F -распределению максимальное значение F_{max} , при котором еще подтверждается нулевая гипотеза, то есть S_P^2 и $S_{\text{ош}}^2$ близки по значению друг другу и статистически неотличимы.

При значениях $F > F_{\max}(\beta, \lambda_1, \lambda_2)$ дисперсия ошибки мала по сравнению с дисперсией показателя y , и нулевая гипотеза отвергается, а, следовательно, подтверждается гипотеза о виде модели.

В том случае, когда проверка по F -распределению удовлетворительна, модель принимается для дальнейшего исследования; если нет, то необходимо изменить или вид модели, или состав показателей для повышения ее адекватности модели.

После получения коэффициентов квадратичного полинома, необходимо выполнить оценку регулирующего эффекта нагрузки по напряжению. Регулирующим эффектом нагрузки называют степень изменения активной и реактивной мощности нагрузки при изменении напряжения или частоты. Регулирующий эффект нагрузки определяется по выражению (4.12):

$$K_{PU} = \frac{dP}{dU}. \quad (4.12)$$

4.1.2 Метод главных компонент

Метод главных компонент один из основных способов уменьшить размерность данных, потеряв наименьшее количество информации (англ. Principal Components Analysis, PCA) [26], которая объясняет связь между исходными данными. Метод изобретен К. Пирсоном в 1901 году, применяется в таких областях, таких как распознавание образов, компьютерное зрение, сжатие данных.

Важно отметить, что метод главных компонент подходит для решения задач анализа данных, таких как вспомогательное преобразование, позволяющее определить эффективную размерность исходных данных, классификация данных, аппроксимация.

Теория метода главных компонент заключается в следующем: первая главная компонента выбирается так, чтобы вдоль нее происходило максимальное изменение данных. Исходные точки проецируются на главную компоненту. Предположим, что на самом деле все наши экспериментальные точки и должны были лежать на этой компоненте, но погрешности

измерительных приборов, изменения мощности во внешней электрической сети отклонили их от идеального положения, тогда все точки, отклоненные от новой оси можно считать шумом. Проверить шум ли это, можно найдя в них ось максимальных изменений. Она и называется второй главной компонентой. Таким образом, надо действовать, до тех пор, пока шум уже не станет действительно шумом, то есть случайным хаотическим набором величин. В энергетике принято искать только две главные компоненты.

Алгоритм метода главных компонент можно разбить на несколько этапов и продемонстрировать на примере результатов значений напряжения и мощностей для осветительной нагрузки (рис. 4.3):

1. Выделить главную компоненту. Выделение главной компоненты рассматриваемым алгоритмом является решением задачи оценки коэффициентов линейной модели методом наименьших квадратов.

2. Найти проекцию каждой точки данных на выделенную главную компоненту. Для определения координат, соответствующих перпендикулярной проекции i -той точки данных на выделенную главную компоненту, воспользуемся рис 4.3.

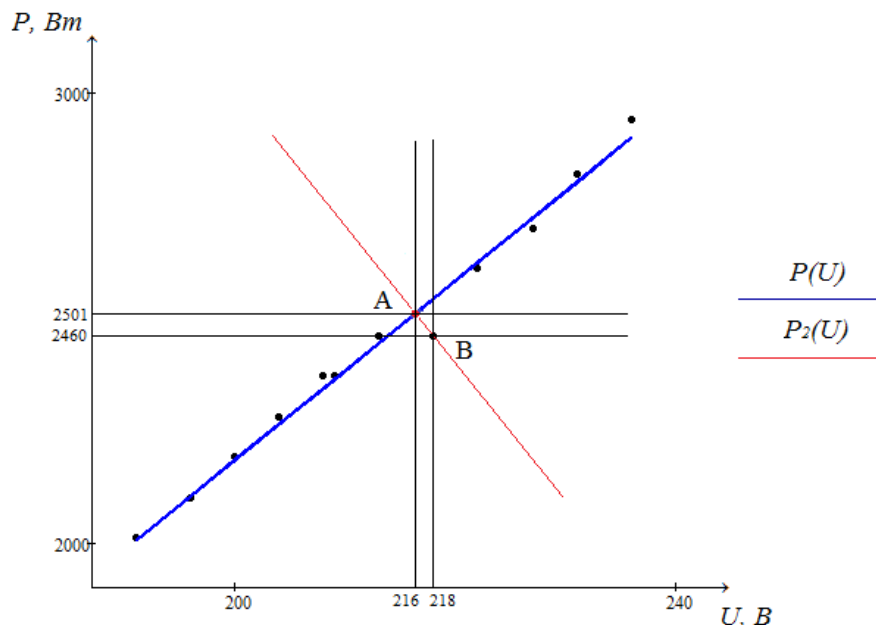


Рисунок 4.3 – Проецирование точки В на прямую (синий цвет); луч проекции (красный цвет) перпендикулярен прямой; точка А – проекция точки В на прямую

Для удобства программной реализации необходимо получить уравнения перпендикулярной проекции i -ой точки данных на выделенную главную компоненту в матричной форме.

Исходные данные для решения – это координаты точек А и В, коэффициенты прямой $P = f(U)$, тогда уравнение связи координат точки А можно представить в виде:

$$P_A = k \cdot U_A + b. \quad (4.13)$$

Уравнение связи координат точки В будет аналогичным. Необходимо отметить, что прямые $P(U)$ и $P_2(U)$ перпендикулярны, следовательно, тангенс угла наклона уравнения $P_2 = f(U)$ будет равен $-k$.

$$P_B = -k \cdot U_B + b_{\perp}. \quad (4.14)$$

Коэффициент $b_{\perp}$ можно представить в виде:

$$b_{\perp} = k \cdot U_B + P_B. \quad (4.15)$$

С учетом того, что прямая $P_2 = f(U)$ проходит через точку А, уравнение связи координат точки А можно представить следующим образом:

$$P_A = -k \cdot U_A + k \cdot U_B + P_B. \quad (4.16)$$

Приравняв выражения (4.13) и (4.16), получим:

$$-k \cdot U_A + k \cdot U_B + P_B = k \cdot U_A + b. \quad (4.17)$$

Выразим из уравнения (4.17) координату U_A :

$$2k \cdot U_A = k \cdot U_B + U_B - b; \quad (4.18)$$

$$U_A = \frac{k \cdot U_B + P_B - b}{2k}; \quad (4.19)$$

$$U_A = \frac{1}{2}U_B + \frac{1}{2k}P_B - \frac{b}{2k}. \quad (4.20)$$

Подставив (4.20) в уравнение (4.16), получим уравнение связи координаты P_A с координатами P_B и U_B .

$$P_A = -k\left(\frac{1}{2}U_B + \frac{1}{2k}P_B - \frac{b}{2k}\right) + k \cdot U_B + P_B. \quad (4.21)$$

Для упрощения выражения необходимо раскрыть скобки и привести подобные слагаемые:

$$P_A = -\frac{k}{2}U_B - \frac{1}{2}P_B + \frac{b}{2} + k \cdot U_B + P_B; \quad (4.22)$$

$$P_A = \frac{k}{2}U_B + \frac{1}{2}P_B + \frac{b}{2}. \quad (4.23)$$

С учетом выражений (4.20) и (4.23) можно представить в матричной форме уравнение перпендикулярной проекции точки на прямую:

$$\begin{pmatrix} 1/2 & 1/2k \\ k/2 & 1/2 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} U_B \\ P_B \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -b/2k \\ b/2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U_A \\ P_A \end{pmatrix}. \quad (4.24)$$

Для проверки корректности выводов необходимо найти численные значения координат проекции точки В с координатами $U = 218; P = 2460$ на прямую $P = 19,943 \cdot U - 1,805 \cdot 10^3$ согласно рис.4.3.

$$\begin{pmatrix} U_A \\ P_A \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0,5 & 1/2 \cdot 19,943 \\ 19,943/2 & 0,5 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 218 \\ 2460 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -(-1,805 \cdot 10^3)/2 \cdot 19,943 \\ -1,805 \cdot 10^3/2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 216 \\ 2501 \end{pmatrix}.$$

Полученные численные значения координат точки перпендикулярной проекции совпадают с координатами точки А. Следовательно, можно выдвинуть гипотезу о корректности выведенного уравнения перпендикулярной проекции на прямую.

3. для получения второй главной компоненты вычесть из исходных данных проекцию на первую главную компоненту:

$$\begin{pmatrix} U_{residual} \\ P_{residual} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U_{start} \\ P_{start} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} U_A \\ P_A \end{pmatrix}, \quad (4.25)$$

где $U_{residual}$ и $P_{residual}$ – остаток после исключения первой главной компоненты;

U_{start} и P_{start} – исходные значения величин;

U_A и P_A – координаты проекции точки исходной точки данных на главную компоненту.

4. повторить этапы с 1 по 3 для остаточной дисперсии. Значения остаточной дисперсии получаются после исключения U_A и P_A из исходных значений U_{start} и P_{start} .

5. оценить корректность полученных главных компонент для исходного массива идеальных данных. В п. 2 было сделано допущение о перпендикулярности прямых $P(U)$ и $P_2(U)$, следовательно, коэффициенты первой и второй главной компоненты должны быть $k_1 \perp k_2$.

6. После оценки главных компонент каждой группы данных необходимо выполнить оценку регулирующих эффектов нагрузки. Оценка регулирующего эффекта нагрузки выполняется по выражению:

$$k_{load} = k + tga_p \quad (4.26)$$

Где:

k_{load} – регулирующий эффект нагрузки; k – главная компонента с углом наклона менее 90° относительно оси абсцисс; tga_p тангенс угла наклона рассчитанный согласно выражению (4.27).

$$tga_p = \frac{(S_P^2 - S_U^2) \operatorname{tg} \psi_P + K_{PU} (1 - \operatorname{tg}^2 \psi_P)}{S_U^2 + 2K_{PU} \operatorname{tg} \psi_P + S_P^2 \operatorname{tg}^2 \psi_P} \quad (4.27)$$

Где:

S_U^2 – дисперсия напряжения; S_P^2 – дисперсия активной мощности; $\operatorname{tg} \psi_P$ – тангенс угла наклона выделенной главной компоненты; K_{PU} – корреляционный момент между напряжением и активной мощностью.

Корреляционный момент определяется по выражению (4.28):

$$K_{PU} = \frac{\sum_{i=1}^N ((P_i - P_{mean})(U_i - U_{mean}))}{\sqrt{\left(\sum_{i=1}^n (P_i - P_{mean})^2 \sum_{i=1}^N (U_i - U_{mean})^2 \right)}} \quad (4.28)$$

Где:

P_{mean} – математическое ожидание активной мощности; U_{mean} – математическое ожидание напряжения [10].

4.2 Примеры получения коэффициентов полиномов статических характеристик нагрузки

4.2.1 Пример получения коэффициентов полиномов по методу наименьших квадратов

Рассмотрим получение коэффициентов полиномов СХН для осветительной нагрузки. Напряжение и мощности, полученные в результате эксперимента, представлены в табл. 4.1.

Таблица 4.1 - Осветительная нагрузка

Напряжение, В	Мощность	
	Р, Вт	Q, вар
218	2460	0
222	2610	0
227	2700	0
231	2820	0
236	2940	0
213	2460	0
209	2370	0
204	2280	0
200	2190	0
196	2100	0
191	2010	0
218	2460	0
222	2610	0
227	2700	0
231	2820	0
236	2940	0
213	2460	0
208	2370	0
204	2280	0
200	2190	0
196	2100	0
191	2010	0

Графически эти ряды показаны на рис. 4.4

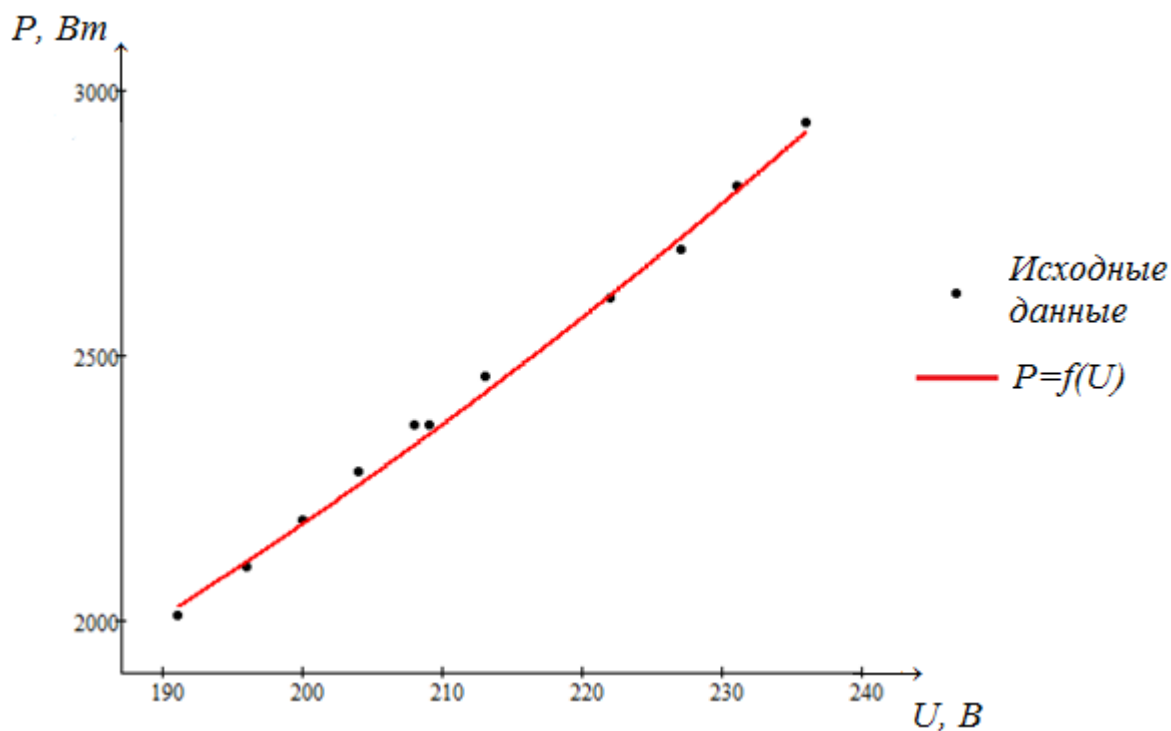


Рисунок 4.4 – Результат аппроксимации

Записываем систему уравнений в соответствии с (4.6), например, для активной мощности:

$$\begin{pmatrix} 1 & 218 & 47524 \\ 1 & 222 & 49284 \\ 1 & 227 & 51529 \\ 1 & 231 & 53361 \\ 1 & 236 & 55696 \\ 1 & 213 & 45369 \\ 1 & 209 & 43681 \\ 1 & 204 & 41616 \\ 1 & 200 & 40000 \\ 1 & 196 & 38416 \\ 1 & 191 & 36481 \\ 1 & 218 & 47524 \\ 1 & 222 & 49284 \\ 1 & 227 & 51529 \\ 1 & 231 & 53361 \\ 1 & 236 & 55696 \\ 1 & 213 & 45369 \\ 1 & 208 & 43264 \\ 1 & 204 & 41616 \\ 1 & 200 & 40000 \\ 1 & 196 & 38416 \\ 1 & 191 & 36481 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} a'_0 \\ a'_1 \\ a'_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2460 \\ 2610 \\ 2700 \\ 2820 \\ 2940 \\ 2460 \\ 2370 \\ 2280 \\ 2190 \\ 2100 \\ 2010 \\ 2460 \\ 2610 \\ 2700 \\ 2820 \\ 2940 \\ 2460 \\ 2370 \\ 2280 \\ 2190 \\ 2100 \\ 2010 \end{pmatrix}$$

Решая систему уравнений в соответствии с (4.7), получаем значения коэффициентов полинома в именованных единицах:

$$a'_0 = 1335 \text{ Вт};$$

$$a'_1 = -9,596 \text{ Вт/В};$$

$$a'_2 = 0,069 \text{ Вт/В}^2.$$

Далее переходим к коэффициентам полинома в относительных единицах в соответствии с (4.9):

$$a_0 = \frac{a'_0}{P_{\text{баз}}} = \frac{1335}{2571} = 0,51;$$

$$a_1 = \frac{a'_1 \cdot U_{\text{баз}}}{P_{\text{баз}}} = \frac{-9,596 \cdot 220}{2571} = -0,82;$$

$$a_2 = \frac{a'_2 \cdot U_{\text{баз}}^2}{P_{\text{баз}}} = \frac{0,069 \cdot 220^2}{2571} = 1,30.$$

Полином для статической характеристики, представленной на рис. 4.4, запишется в виде:

$$P(U) = 0,51 - 0,82 \cdot U + 1,30 \cdot U^2.$$

Подставляя базисное значение напряжения, получаем мощность 2571 Вт и принимаем ее в качестве базисной.

Оцениваем адекватность выбранной модели (полином второй степени). Для этого вначале определим значения мощности и значения ошибки (табл. 4.2).

Таблица 4.2 – Расчетные значения

№	Напряжение, U , В	Активная мощность, P , Вт	Мощность, полученная в результате аппроксимации, P_m , Вт	Ошибка значения мощности, ε , Вт	ε^2 , Вт ²
1	218	2460	2530	-70	4900
2	222	2610	2613	-13	169
3	227	2700	2721	-21	441

№	Напряжение, U , В	Активная мощность, P , Вт	Мощность, полученная в результате аппроксимации, P_m , Вт	Ошибка значения мощности, ε , Вт	ε^2 , Вт ²
4	231	2820	2809	11	121
5	236	2940	2923	17	289
6	213	2460	2429	31	961
7	209	2370	2351	19	361
8	204	2280	2256	24	576
9	200	2190	2182	8	64
10	196	2100	2111	-11	121
11	191	2010	2025	-15	225
12	218	2460	2530	-70	4900
13	222	2610	2613	-3	9
14	227	2700	2721	-21	441
15	231	2820	2809	11	121
16	236	2940	2923	17	289
17	213	2460	2429	31	961
18	208	2370	2331	39	1521
19	204	2280	2256	24	576
20	200	2190	2182	8	64
21	196	2100	2111	-11	121
22	191	2010	2025	-15	225

Далее определим среднее значение мощности по выборке, дисперсию мощности, дисперсию ошибки, численное значение распределения Фишера

соответственно: $M(P) = \frac{\sum_{i=1}^N P_i}{N} = \frac{53880}{22} = 2449 \text{ Вт};$ $S_P^2 = \frac{\sum_{i=1}^N [P_i - M(P)]^2}{N-1} = 84220;$

$$S_{\text{ош}}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N \varepsilon_i^2}{N-n} = \frac{17460}{19} = 919; \quad F = \frac{S_P^2}{S_{\text{ош}}^2} = \frac{84220}{919} = 91,64.$$

Далее по таблице распределения Фишера [24] для степеней свободы $\lambda_1 = 21$, $\lambda_2 = 19$ и доверительном интервале $\beta = 0,95$ находим $F_{\max}$:

$$F(0.95, 21, 19) = 2,144.$$

$F = 91,64$ больше $F_{\max} = 2,144$, следовательно гипотеза о виде модели принимается.

Регулирующий эффект осветительной нагрузки равен: $K_{PU} = 20,383$.

Для других видов нагрузки определение коэффициентов полиномов, регулирующий эффект нагрузки по напряжению и проверка адекватности модели определяются аналогично. Значения полученных коэффициентов и регулирующего эффекта нагрузки по напряжению приведены в табл. 4.3. Значения F - распределения для квадратичной модели приведены в табл. 4.4.

Таблица 4.3 – Результаты расчета

Виды нагрузки	Коэффициенты полиномов СХН						Регулирующий эффект нагрузки	
	по активной мощности			по реактивной мощности				
	a_0	a_1	a_2	b_0	b_1	b_2	K_{PU}	K_{QU}
Активная	-0,50	0,97	0,54	-	-	-	81,672	—
Индуктивная	-	-	-	0,52	-0,96	1,45	—	83,122
Емкостная	-3,23	6,30	-2,07	-0,83	1,62	0,20	40,26	- 63,862
Осветительная	0,52	-0,82	1,30	-	-	-	20,383	—
Выпрямительная	-1,51	3,08	-0,57	-	-	-	98,27	—
Активно-индуктивная	-0,32	0,65	0,67	0,58	-1,11	1,53	66,053	66,414
Активно-емкостная	-3,38	5,49	-2,55	-1,07	1,75	0,33	40,282	- 34,212
Индуктивно-емкостная	-2,35	3,50	-0,14	-1,70	3,63	-0,93	16,848	66,516

Виды нагрузки	Коэффициенты полиномов СХН						Регулирующий эффект	
Асинхронная	-5,60	13,43	-6,83	-	-	-	1,787	–
Синхронная	1,49	-1,75	1,26	-	-	-	60,44	–

Таблица 4.4 – Значения F – распределения

Виды нагрузки	Значения F при $P(U)$	Значения F при $P(U)$
Активная	69,67	-
Индуктивная	-	431,98
Емкостная	152	211,2
Осветительная	91,64	-
Выпрямительная	184,6	-
Активно-индуктивная	62,14	52,61
Активно-емкостная	123,91	123,62

Виды нагрузки	Значения F при $P(U)$	Значения F при $P(U)$
Индуктивно-емкостная	1285,55	180,49
Асинхронная	12,89	-
Синхронная	15,07	-

По результатам табл. 4.4 можно сделать вывод о том, что коэффициенты полинома второй степени для всех видов нагрузок определены верно.

На рис. 4.5 – 4.11 представлены результаты аппроксимации статических характеристик нагрузки для типов, представленных в табл. 4.4.

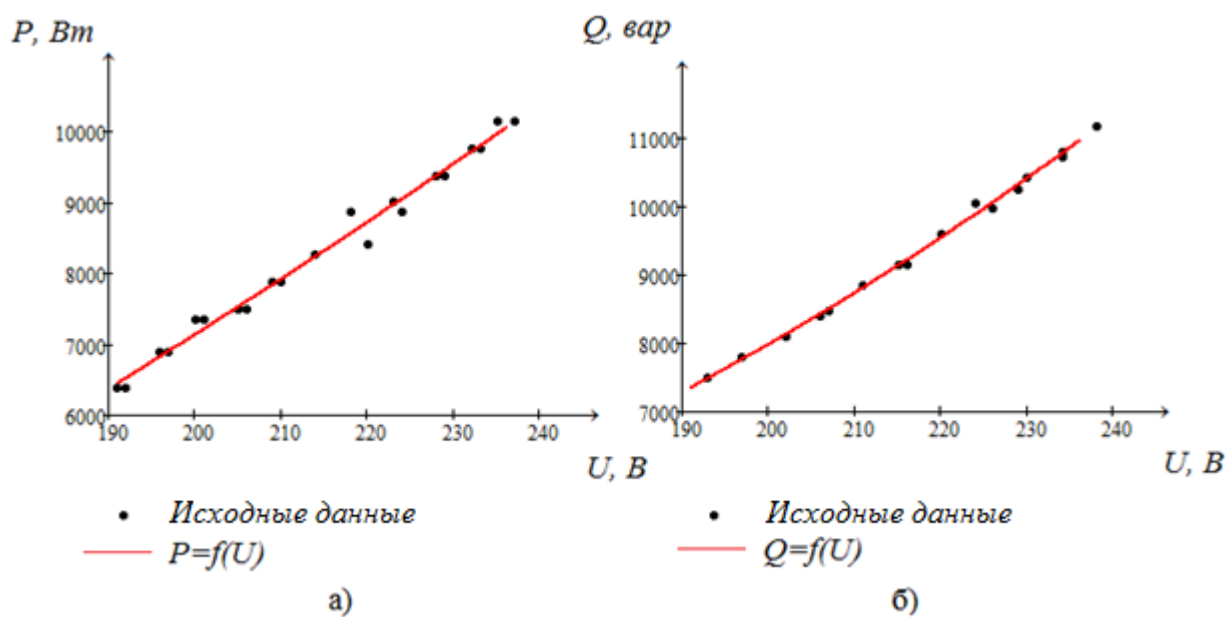


Рисунок 4.5 – Результаты аппроксимации полинома активной (а) и индуктивной (б) нагрузки

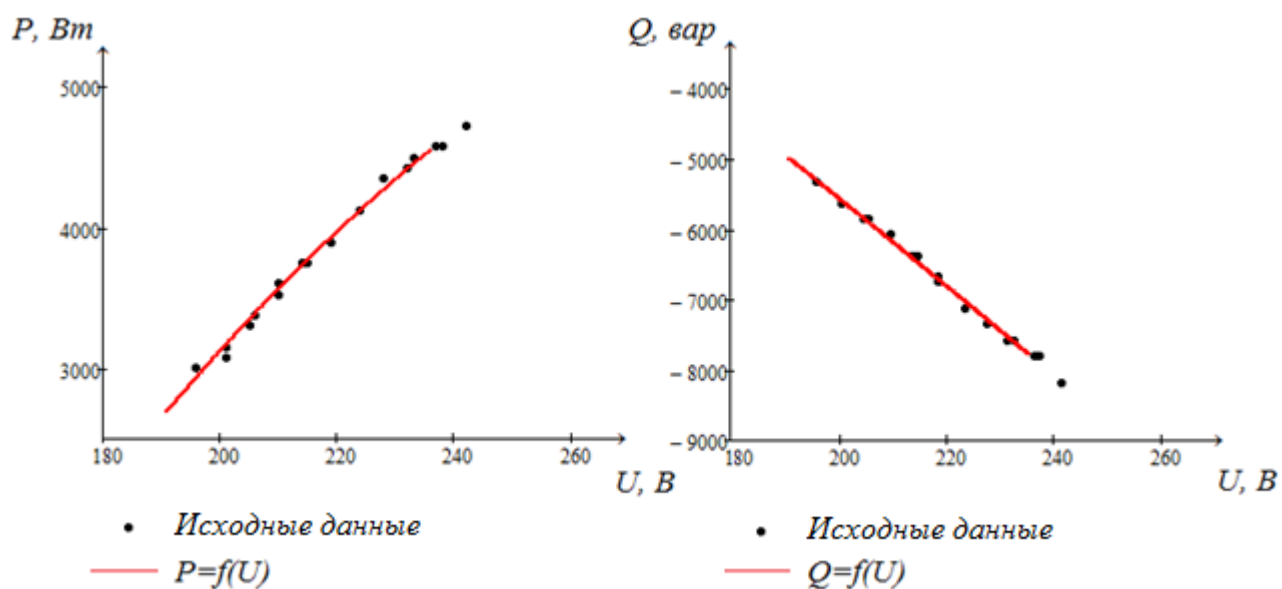


Рисунок 4.6 – Результаты аппроксимации полинома емкостной нагрузки

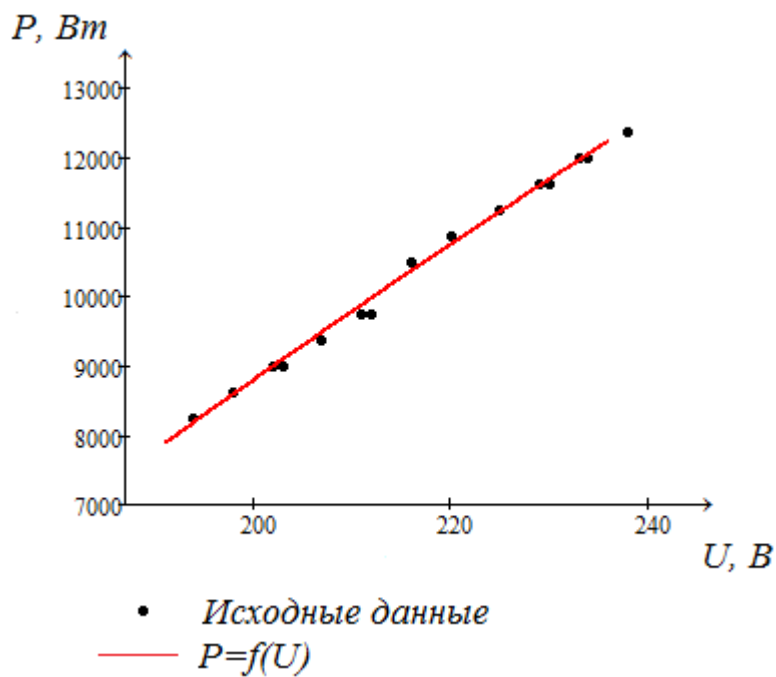


Рисунок 4.7 – Результаты аппроксимации полинома выпрямительной нагрузки

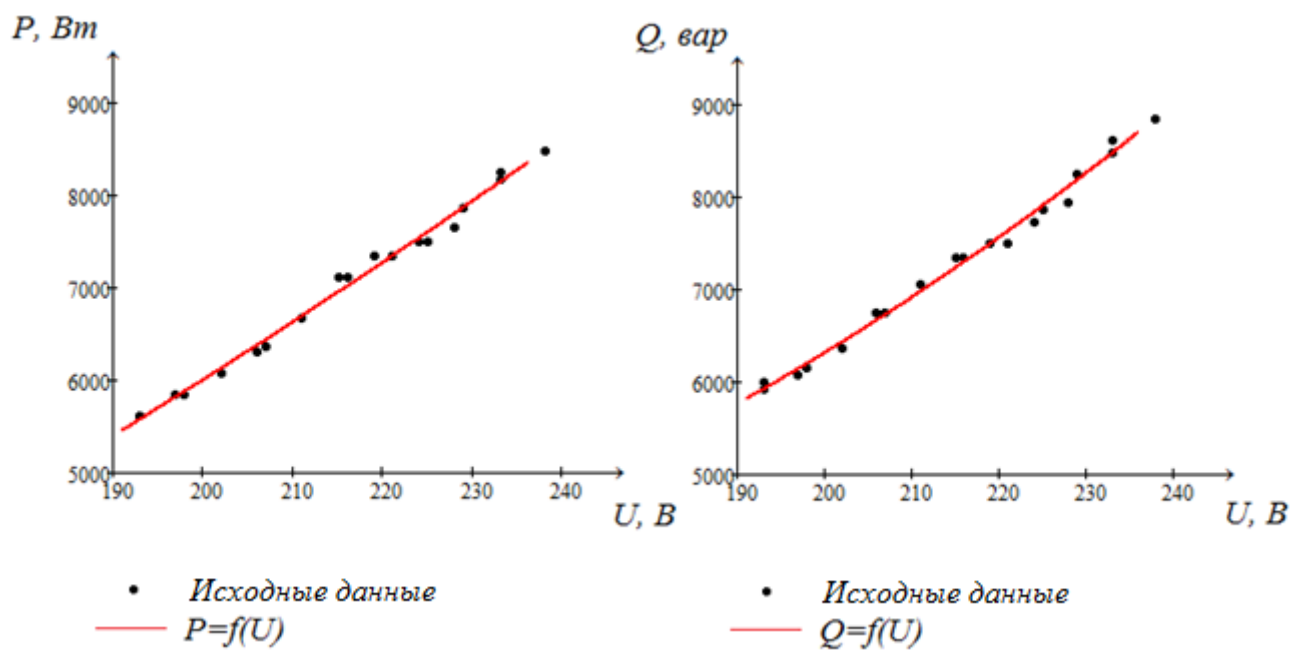


Рисунок 4.8 – Результаты аппроксимации полинома активно-индуктивной нагрузки

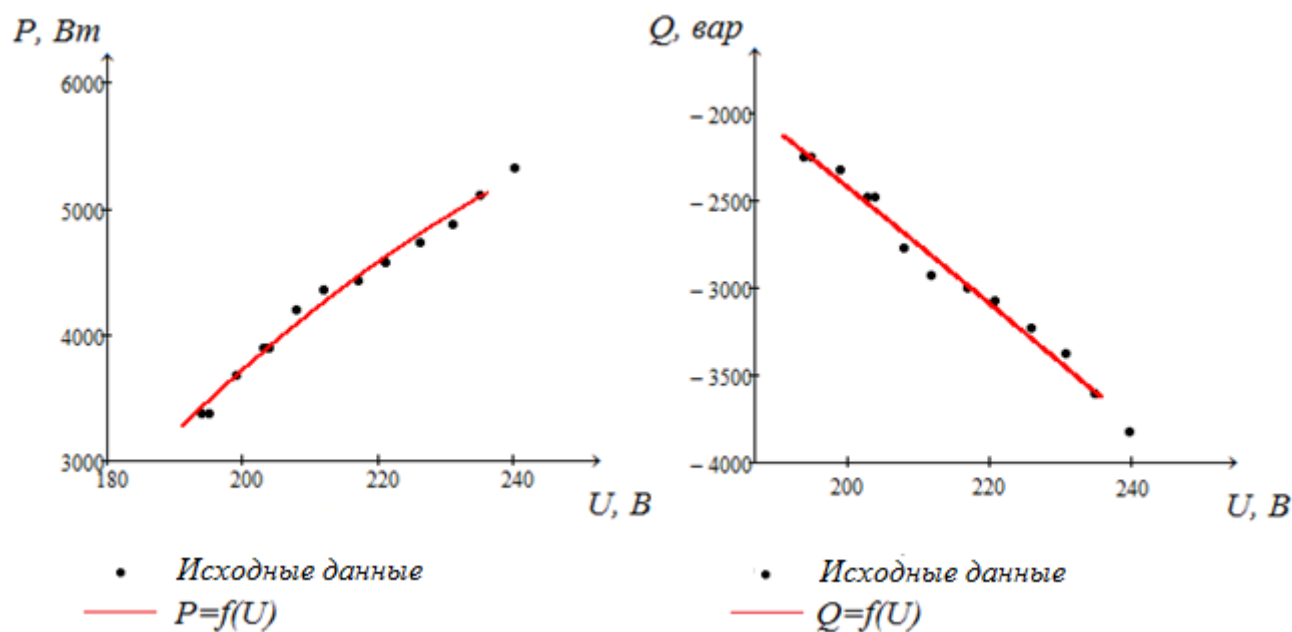


Рисунок 4.9 – Результаты аппроксимации полинома активно-емкостной нагрузки

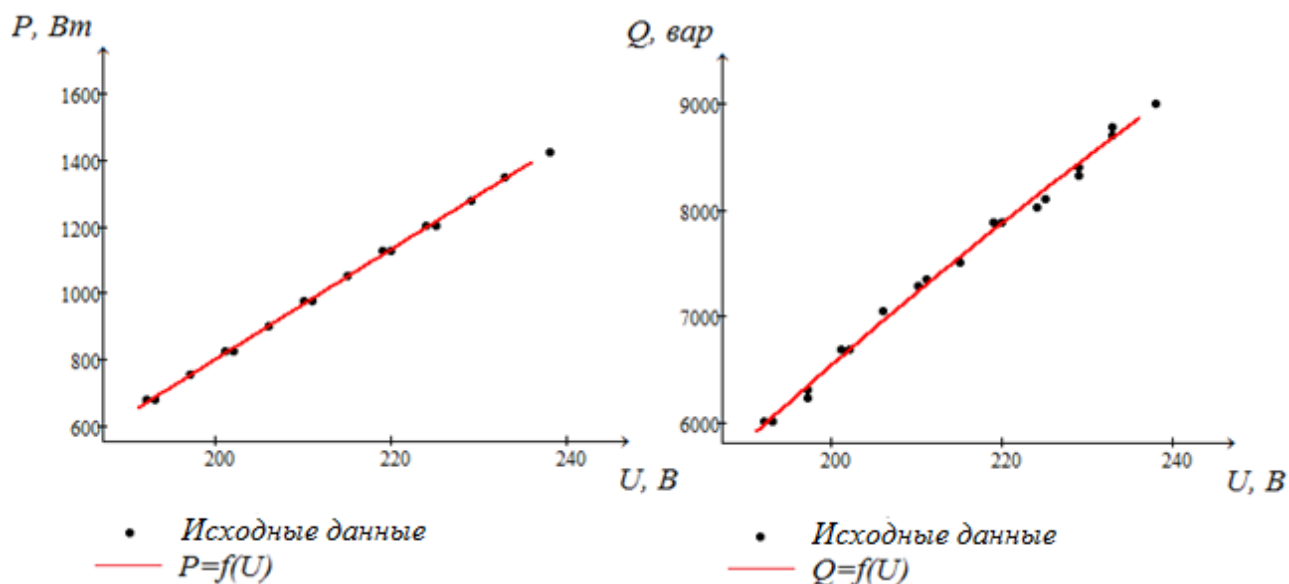


Рисунок 4.10 – Результаты аппроксимации полинома индуктивно-емкостной нагрузки

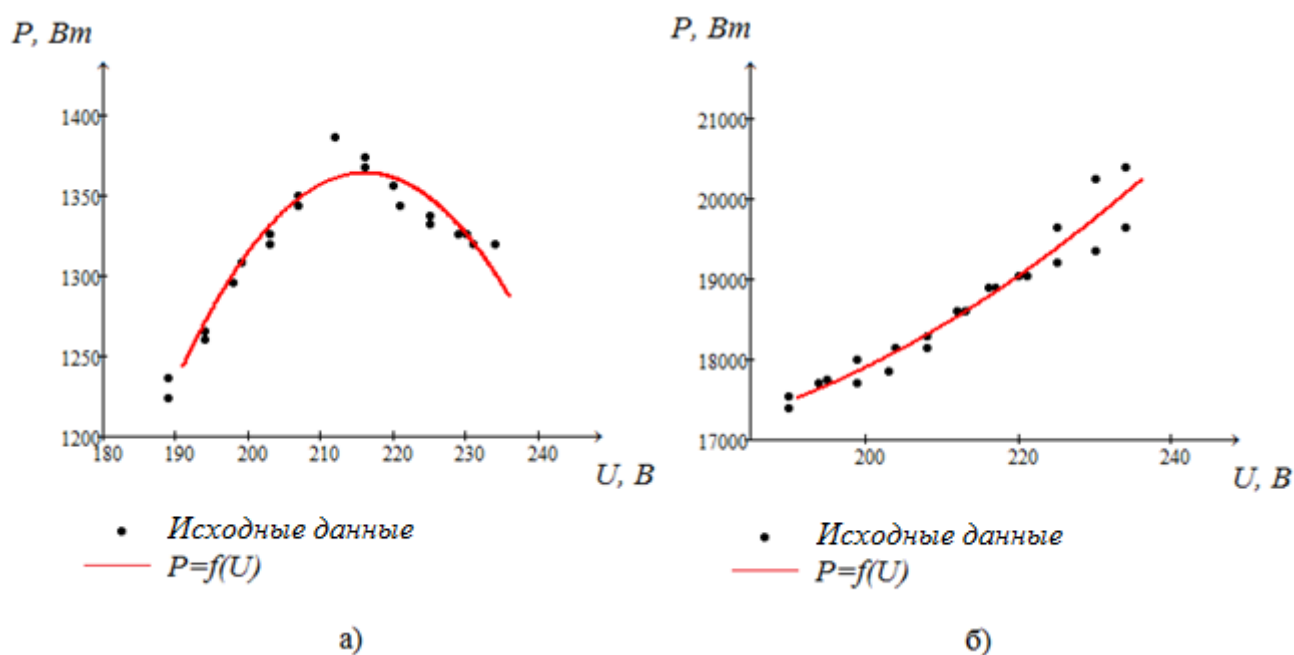


Рисунок 4.11 – Результаты аппроксимации полинома асинхронной (а) и синхронной (б) нагрузки

4.2.2 Пример получения коэффициентов полиномов по методу главных компонент

Рассмотрим получение коэффициентов полиномов СХН так же для осветительной нагрузки, воспользовавшись данными табл. 4.2.

Расчет коэффициентов производится по уравнениям:

$$k = \frac{\sum_{i=0}^{n-1} U_i \cdot \sum_{i=0}^{n-1} P_i - n \cdot \sum_{i=0}^{n-1} P_i \cdot U_i}{\left(\sum_{i=0}^{n-1} U_i \right)^2 - n \cdot \sum_{i=0}^{n-1} U_i^2}; b = \frac{1}{n} \cdot \left[\sum_{i=0}^{n-1} P_i - k \cdot \sum_{i=0}^{n-1} U_i \right]. \quad (4.25)$$

Где:

n – количество точек.

Таблица 4.5 – Коэффициенты первой главной компоненты

$P(U)$	Коэффициент k_1	Коэффициент b_2
$P = k_1 \cdot U + b_1$	19,943	$-1,805 \cdot 10^3$

Результат выделения первой главной компоненты представлен на рис. 4.12.

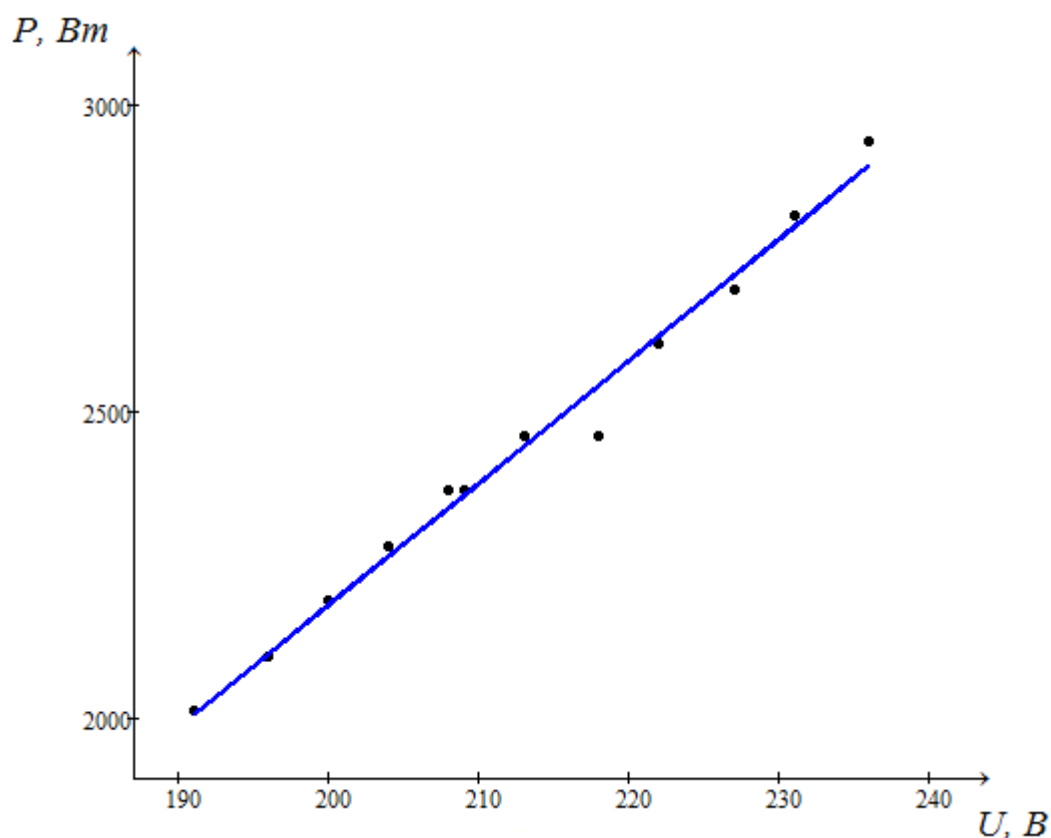


Рисунок 4.12 – Выделение первой главной компоненты

Значение U и P на первой главной компоненте находится по следующему матричному уравнению:

$$\begin{pmatrix} 1/2 & 1/2 \cdot 19,943 \\ 19,943/2 & 1/2 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} U_{нач} \\ P_{нач} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -(-1,805 \cdot 10^3)/2 \cdot 19,943 \\ -1,805 \cdot 10^3/2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U_{\text{гл.ком}} \\ P_{\text{гл.ком}} \end{pmatrix}$$

Остаток после исключения первой главной компоненты находим по формуле:

$$\begin{pmatrix} U_{ост} \\ P_{ост} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U_{нач} \\ P_{нач} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} U_{\text{гл.ком}} \\ P_{\text{гл.ком}} \end{pmatrix}$$

Таблица 4.6 – Остаточные значения напряжения и мощности

$U_{ост}$, В	$P_{ост}$, Вт
2.067	-41.231
0.307	-6.118
0.55	-10.976
-0.458	9.137
-0.967	19.279
-0.433	8.627
-0.176	3.514
-0.42	8.372
-0.163	3.259
0.093	-1.854
-0.151	3.004
2.067	-41.231
0.307	-6.118
0.55	-10.976
-0.458	9.137
-0.967	19.279
-0.433	8.627
-0.676	13.486
-0.42	8.372
-0.163	3.259
0.093	-1.854
-0.151	3.004

Расчет значений коэффициентов второй главной компоненты производится по уравнениям (4.25)

Результат выделения второй главной компоненты представлен на рис. 4.13. Коэффициенты уравнения второй главной компоненты приведены в табл.4.7.

Таблица 4.7 – Коэффициенты уравнения второй главной компоненты

$P(U)$	Коэффициент k_2	Коэффициент b_2
$P = k_2 \cdot U + b_2$	-19,943	$-1,904 \cdot 10^{-3}$

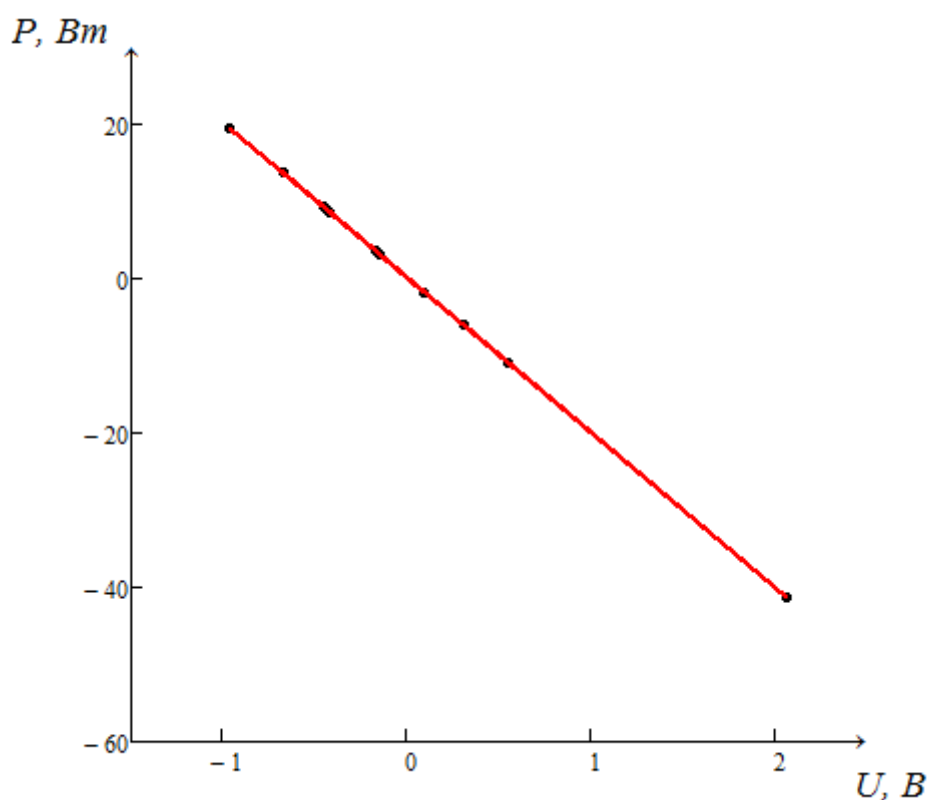


Рисунок 4.13 – Остаточные значения мощности и напряжения, красным выделена вторая главная компонента

Регулирующий эффект нагрузки для осветительной нагрузки равен $K = 19,993$.

Выделение главных компонент, определение значений коэффициентов и оценка регулирующего эффекта нагрузки для остальных видов нагрузок осуществляется аналогично.

В таблице 4.8 и 4.9 представлены результаты расчета для остальных экспериментов. Регулирующие эффекты нагрузки приведены в табл. 4.10. Значения F -распределения для линейной модели приведены в табл. 4.11.

Таблица 4.8 – Коэффициенты первой главной компоненты

Виды нагрузки	k^P_1	b^P_1	k^Q_1	b^Q_1
Активная	79,958	$-8,856 \cdot 10^3$	-	-
Индуктивная	-	-	81,344	$-8,29 \cdot 10^3$
Емкостная	39,379	$-4,728 \cdot 10^3$	$-62,507$	$6,909 \cdot 10^3$
Осветительная	19,943	$-1,805 \cdot 10^3$	-	-
Выпрямительная	96,104	$-1,042 \cdot 10^4$	-	-
Активно-индуктивная	64,593	$-6,915 \cdot 10^3$	64,913	$-6,674 \cdot 10^3$
Активно-емкостная	39,321	$-4,121 \cdot 10^3$	$-33,493$	$4,282 \cdot 10^3$
Индуктивно-емкостная	16,489	$-2,497 \cdot 10^3$	65,044	$-6,463 \cdot 10^3$
Асинхронная	1,859	929,809	-	-
Синхронная	59,144	$6,097 \cdot 10^3$	-	-

Таблица 4.9 – Коэффициенты второй главной компоненты

Виды нагрузки	k^P_2	b^P_2	k^Q_2	b^Q_2
Активная	$-79,901$	$4,604 \cdot 10^{-3}$	-	-
Индуктивная	-	-	$-81,349$	0,011
Емкостная	$-39,383$	$3,444 \cdot 10^{-3}$	62,26	0,141

Виды нагрузки	k^P_2	b^P_2	k^Q_2	b^Q_2
Осветительная	-19,943	$-1,904 \cdot 10^{-3}$	-	-
Выпрямительная	-96,105	0,035	-	-
Активно-индуктивная	-64,594	$-5,827 \cdot 10^{-3}$	-64,916	$-5,901 \cdot 10^{-3}$
Активно-емкостная	-39,325	$-6,449 \cdot 10^{-3}$	33,493	0,049
Индуктивно-емкостная	-16,496	0	-65,052	$-1,572 \cdot 10^{-3}$
Асинхронная	-1,859	$-1,299 \cdot 10^{-4}$	-	-
Синхронная	-59,145	$-4,545 \cdot 10^{-5}$	-	-

Таблица 4.10. – Регулирующие эффекты нагрузки

Виды нагрузки	Регулирующий эффект нагрузки	
	K_{PU}	K_{QU}
Активная	79,971	—
Индуктивная	—	81,356
Емкостная	39,404	-62,523
Осветительная	19,993	—
Выпрямительная	96,114	—
Активно-индуктивная	64,593	64,928
Активно-емкостная	39,346	-33,523
Индуктивно-емкостная	16,549	65,059
Асинхронная	2,327	—
Синхронная	59,161	—

Таблица 4.11 – Значения F – распределения

Виды нагрузки	Значения F при $P(U)$	Значения F при $P(U)$
Активная	72,106	-
Индуктивная	-	238,929
Емкостная	105,182	220,146
Осветительная	81,676	-
Выпрямительная	184,01	-
Активно-индуктивная	124,474	100,817
Активно-емкостная	46,385	55,253
Индуктивно-емкостная	1376	162,184
Асинхронная	1,481	-
Синхронная	13,592	-

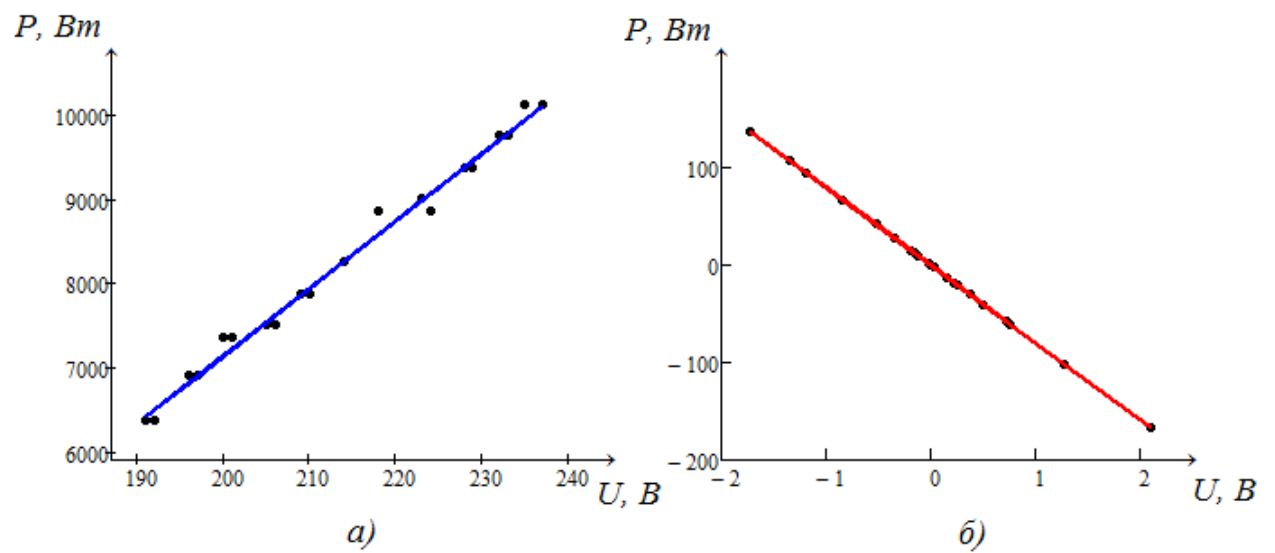


Рисунок 4.14 – Первая (а) и вторая (б) главные компоненты активной нагрузки

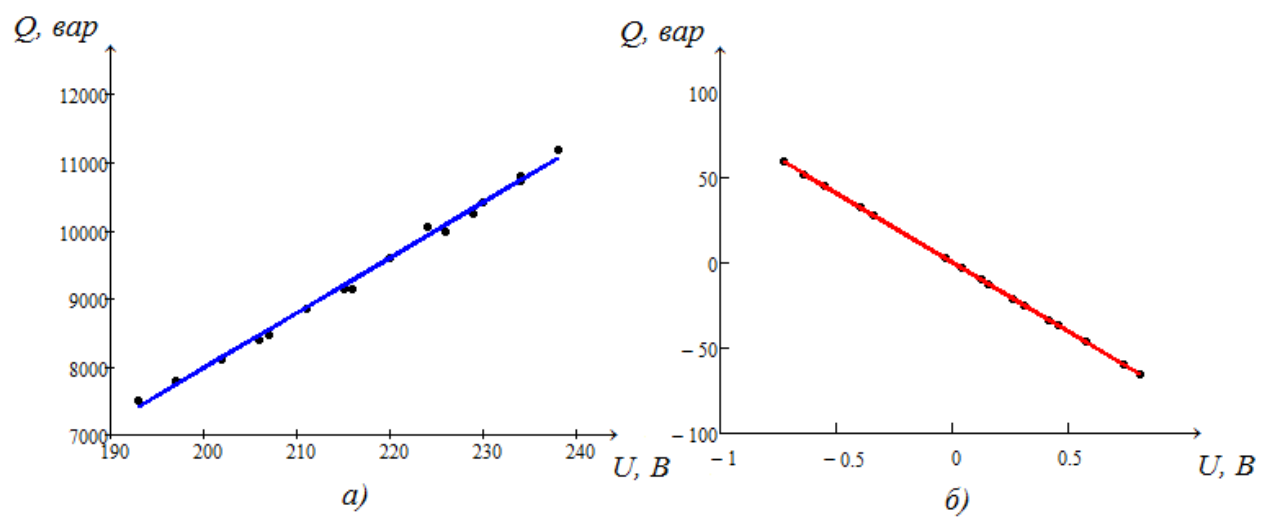


Рисунок 4.15 – Первая (а) и вторая (б) главные компоненты индуктивной нагрузки

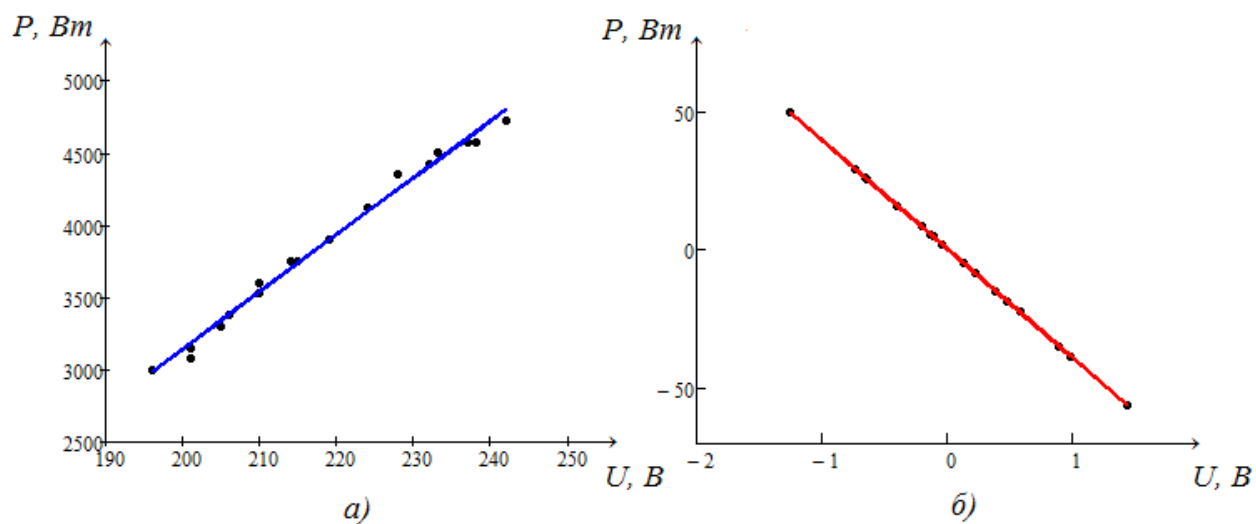


Рисунок 4.16 – Первая (а) и вторая (б) главные компоненты емкостной нагрузки при $P(U)$

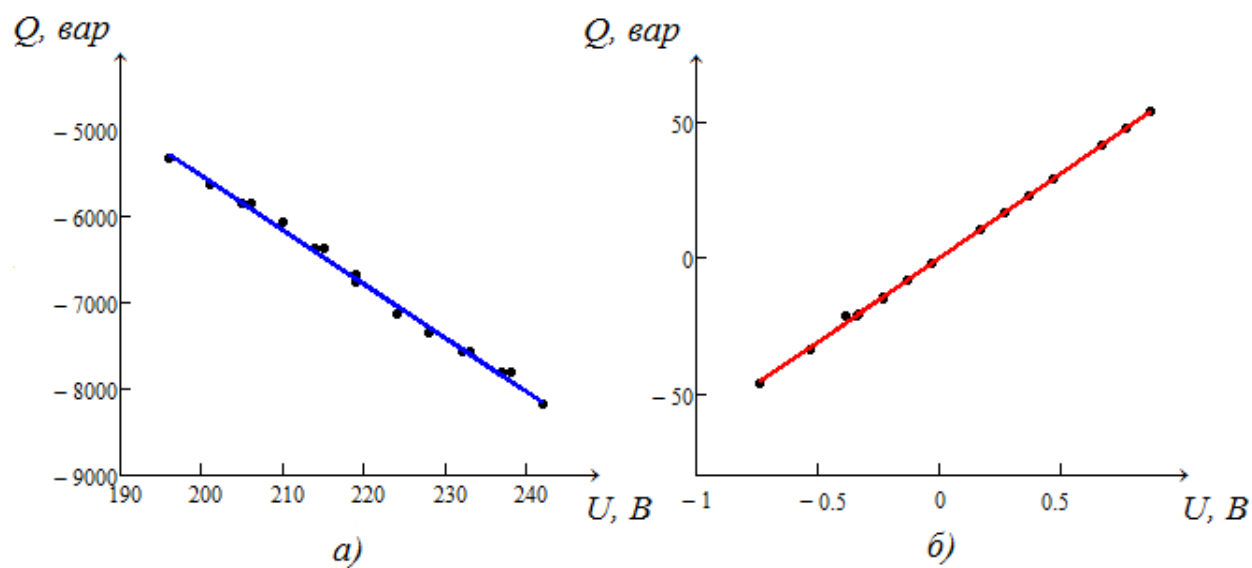


Рисунок 4.17 – Первая (а) и вторая (б) главные компоненты емкостной нагрузки при $Q(U)$

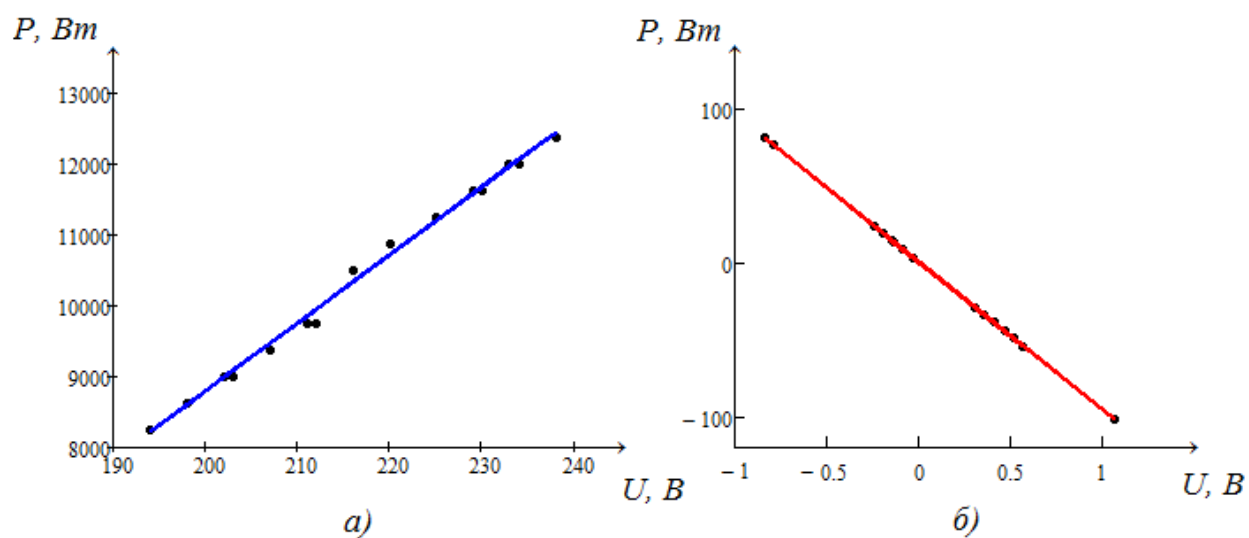


Рисунок 4.18 – Первая (а) и вторая (б) главные компоненты выпрямительной нагрузки

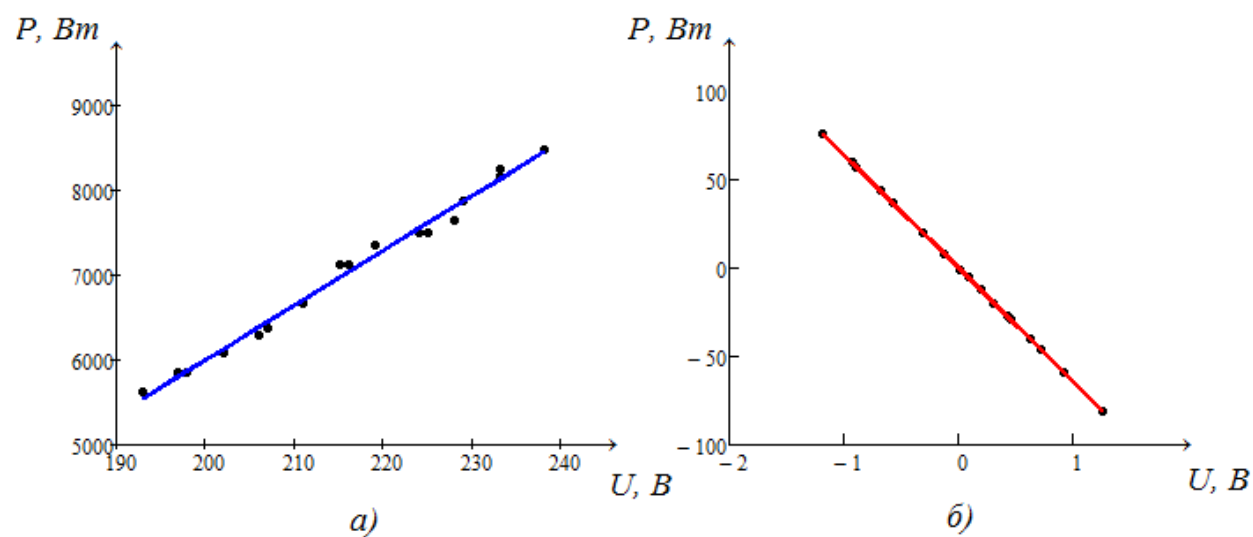


Рисунок 4.19 – Первая (а) и вторая (б) главные компоненты активно-индуктивной нагрузки при $P(U)$

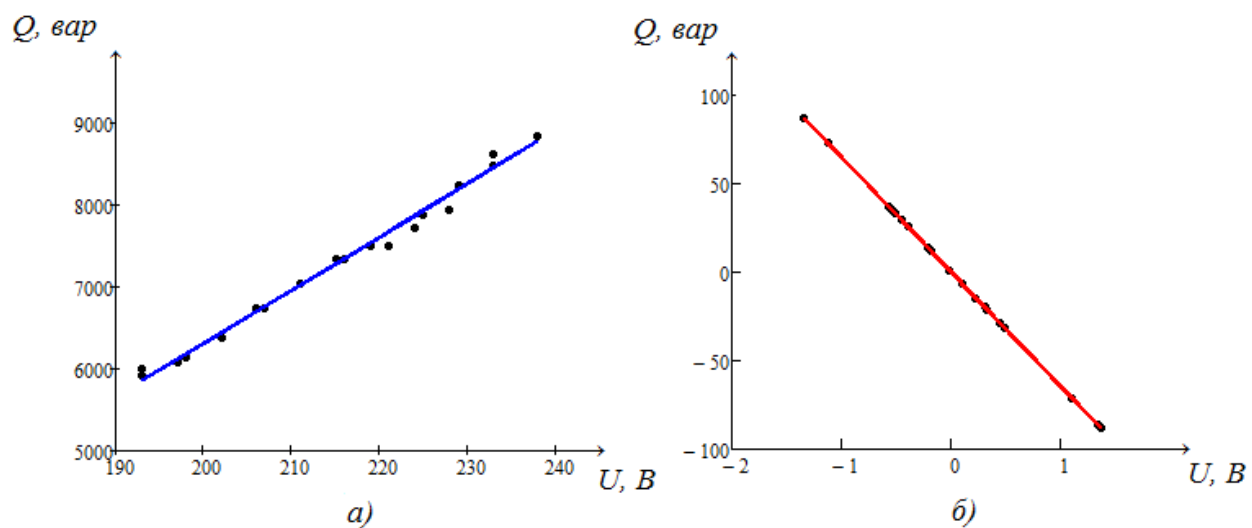


Рисунок 4.20 – Первая (а) и вторая (б) главные компоненты активно-индуктивной нагрузки при $Q(U)$

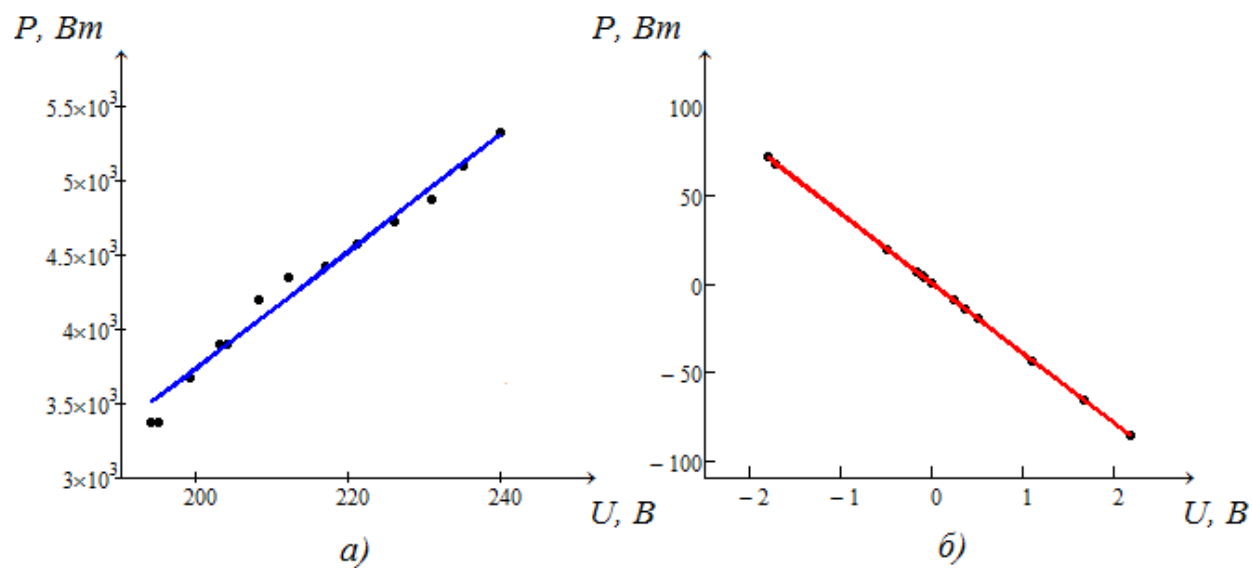


Рисунок 4.21 – Первая (а) и вторая (б) главные компоненты активно-емкостной нагрузки при $P(U)$

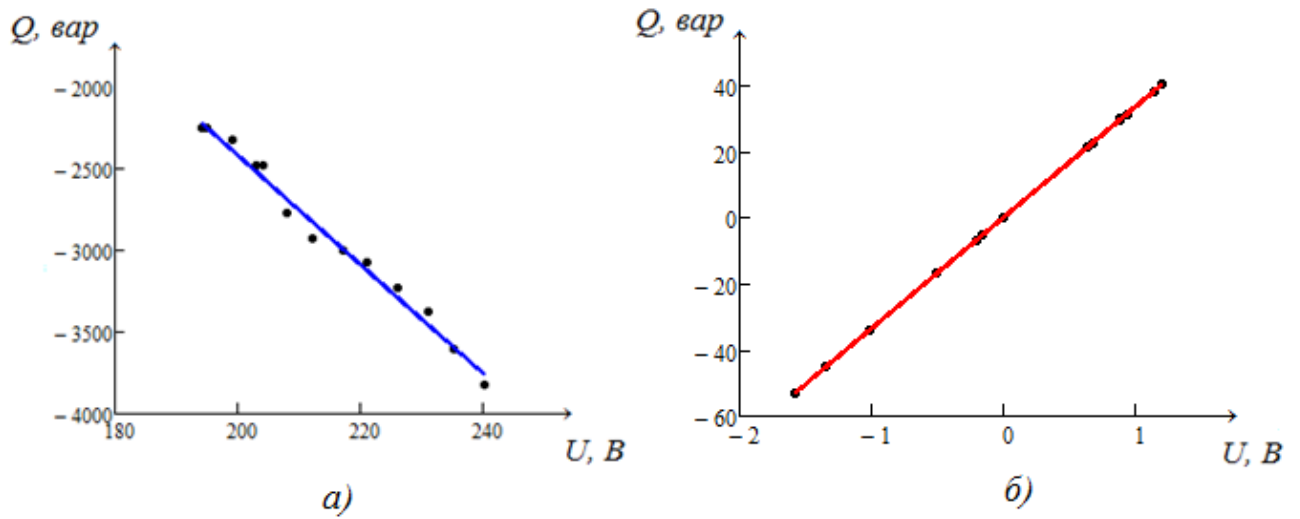


Рисунок 4.22 – Первая (а) и вторая (б) главные компоненты активно-емкостной нагрузки при $Q(U)$

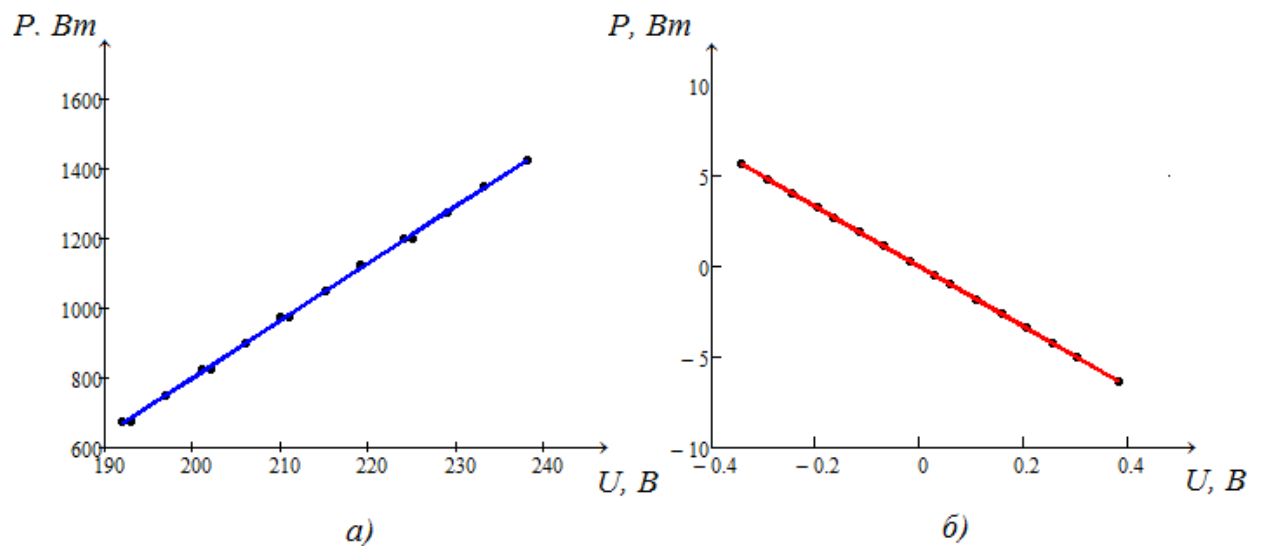


Рисунок 4.23 – Первая (а) и вторая (б) главные компоненты индуктивно-емкостной нагрузки при $P(U)$

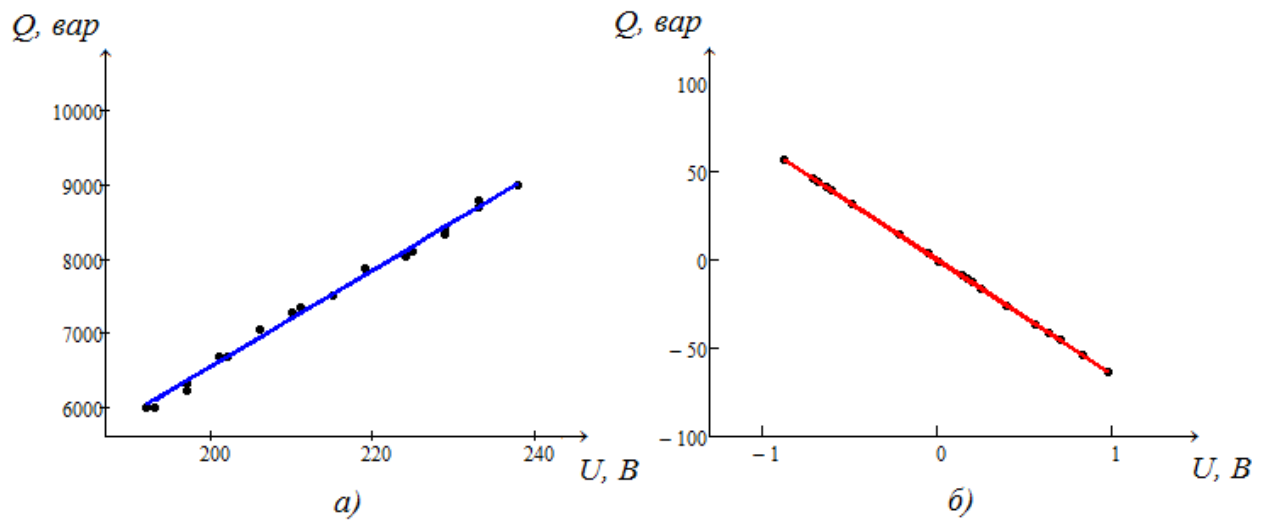


Рисунок 4.24 – Первая (а) и вторая (б) главные компоненты индуктивно-емкостной нагрузки при $Q(U)$

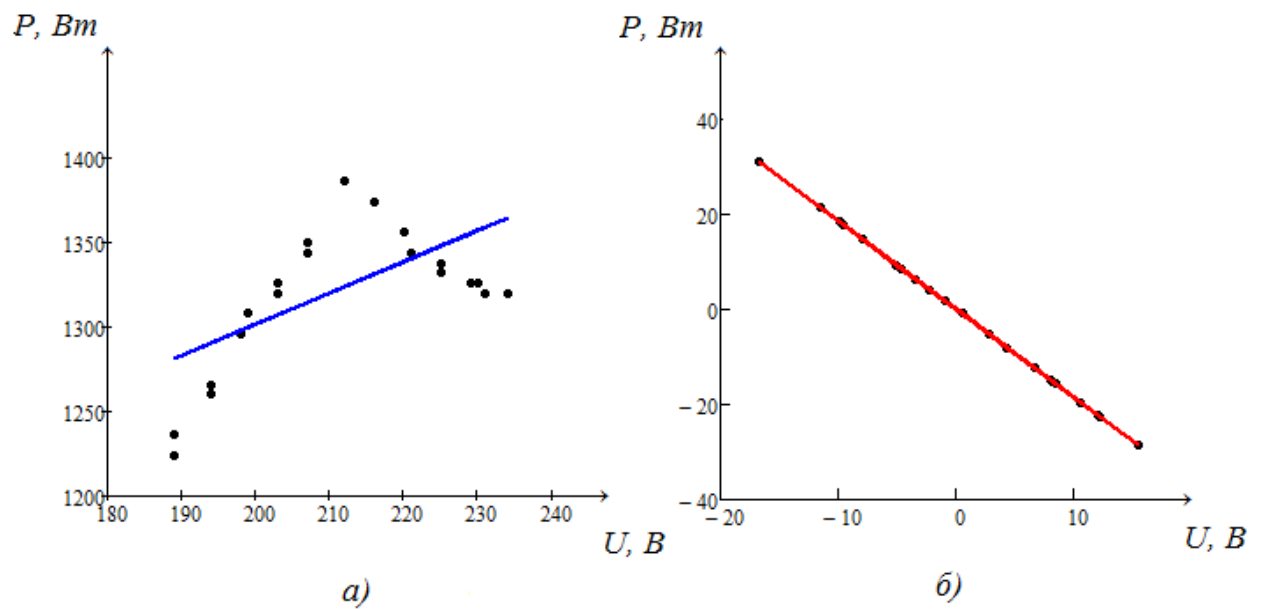


Рисунок 4.25 – Первая (а) и вторая (б) главные компоненты асинхронной нагрузки

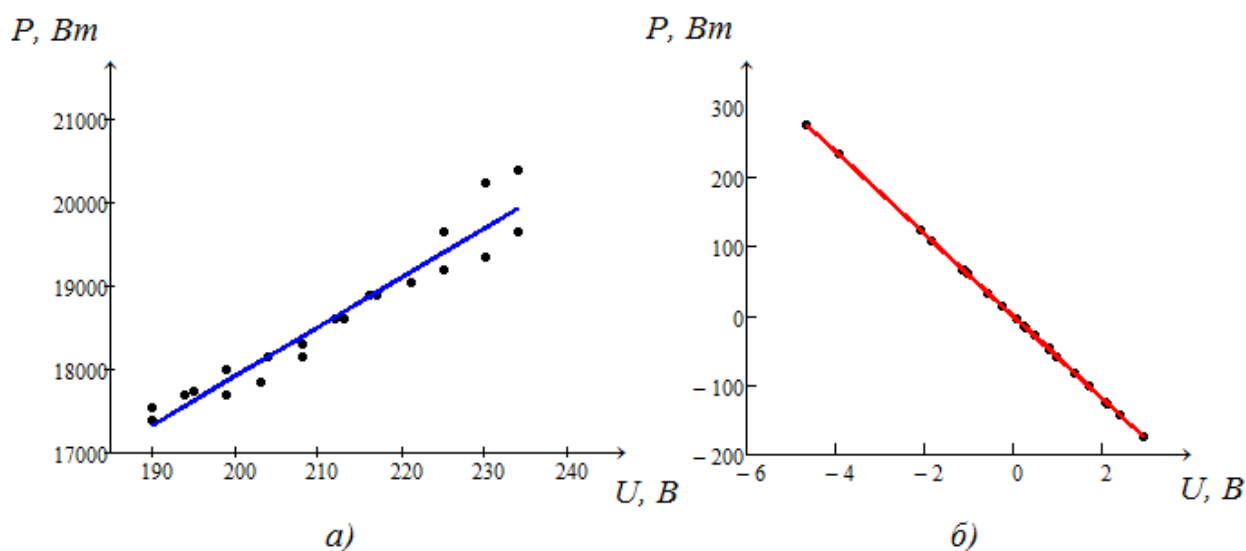


Рисунок 4.26 – Первая (а) и вторая (б) главные компоненты синхронной нагрузки

4.3 Заключение по разделу

В настоящем разделе для получения коэффициентов полиномов статических характеристик по напряжению были рассмотрены два математических метода: метод наименьших квадратов и метод главных компонент.

Метод наименьших квадратов предполагает нахождение функциональных зависимостей, или моделей, аппроксимирующих экспериментальные данные с наилучшим приближением. В МНК экспериментальные данные были аппроксимированы квадратичными полиномами. Производная квадратичного полинома по напряжению $K = \frac{dP(U)}{dU}$

позволила оценить регулирующий эффект нагрузки по напряжению.

Полученные по методу наименьших квадратов коэффициенты полиномов статических характеристик по напряжению и регулирующие эффекты нагрузки по напряжению представлены в табл. 4.3.

В отличие от метода наименьших квадратов метод главных компонент решает задачу оценки коэффициентов не полиномиальной, а линейной моделью. Обработка массивов данных измерительной информации методом

главных компонент представляет возможность нахождения только двух коэффициентов, а также оценку регулирующего эффекта нагрузки.

Полученные по методу главных компонент коэффициенты первой и второй главных компонент представлены соответственно в табл.4.8 и табл.4.9, а регулирующие эффекты нагрузки – в табл.4.10.

Разница между регулирующими эффектами нагрузки, определенными с помощью МНК и МГК представлена в табл. 4.11.

Таблица 4.11 – Разница между регулирующими эффектами

Виды нагрузки	Разница между регулирующими эффектами определенными по МНК и МГК	
	K_{PU}	K_{QU}
Активная	1,701	–
Индуктивная	–	1,766
Емкостная	0,856	-1,339
Осветительная	0,39	–
Выпрямительная	2,156	–
Активно-индуктивная	1,46	1,486
Активно-емкостная	0,936	-0,689
Индуктивно-емкостная	0,299	1,457
Асинхронная	-0,54	–
Синхронная	1,279	–

Определенные с помощью МНК и МГК регулирующие эффекты нагрузки имеют практически одинаковые значения. Что говорит о работоспособности обоих методов.

РАЗДЕЛ 5. ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ И РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ

5.1 Календарный график выполнения диссертации

Линейный график выполнения магистерской диссертации, с разбиением на этапы представлен в таблице 5.1

Таблица 5.1 - Календарный план проекта

Код работы	Название	Дл-сть, дни	Дата начала работ	Дата окончания работ
1	Поиск и изучение литературы по теме диссертации	45	15.12.14	29.01.15
2	Подготовка теоретического материала по предмету исследования	60	30.01.15	31.03.15
3	Изучение и подготовка лабораторного оборудования для проведения исследований	30	01.04.15	30.04.15
4	Описание оборудования физической модели	5	01.05.15	05.05.15
5	Составление схем электрических соединений для проведения экспериментов	4	06.05.15	10.05.15
6	Проведение экспериментов на физической модели	60	10.09.15	08.11.15
7	Обработка и анализ полученных экспериментальных данных	14	09.11.15	22.11.15
8	Формирование выводов по результатам исследований	7	23.11.15	30.11.15
9	Оформление диссертации	35	15.03.16	18.04.16

Вся процедура написания магистерской диссертации была разбита на девять этапов, с указанием примерной даты начала и окончания выполнения работы по каждому из них.

Для иллюстрации последовательности проводимых работ используется диаграмма Ганта. Диаграмма Ганта – это тип столбчатых диаграмм, который используется для иллюстрации календарного плана проекта, на котором работы по теме представляются протяженными во времени отрезками, характеризующимися датами начала и окончания выполнения данных работ.

График строится с разбивкой по месяцам за период времени выполнения научного проекта. При этом работы на графике следует выделить различной штриховкой в зависимости от исполнителей, ответственных за ту или иную работу.

Диаграмма Ганта для нашего случая представлена на рисунке 5.1. Код работы соответствует отдельным видам работы из таблицы 5.1.

№	Т, дн.	Продолжительность выполнения работы												
		2015 г.											2016 г.	
		Декабрь	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	...	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	...	Март	Апрель
1	45													
2	60													
3	30													
4	5													
5	4													
6	60													
7	14													
8	7													
9	35													

Рисунок 5.1 – Диаграмма Ганта

5.2 Диаграмма Исикавы

Диаграмма причины-следствия Исикавы (Cause-and-Effect-Diagram) - это графический метод анализа и формирования причинно-следственных связей, инструментальное средство для систематического определения причин проблемы и последующего графического представления [11].



Рисунок 5.1 – Диаграмма Исикава

5.3 Бюджет работ

Особым видом ресурсов являются денежные средства. Планирование затрат должно осуществляться таким образом, чтобы они могли удовлетворить потребности в финансовых ресурсах в течение всего времени работы над диссертацией. Для этого считается бюджет работ.

В бюджет работ будут включены затраты на расходные материалы, лабораторное оборудование и электроэнергию, также, включим в бюджет возможность командировки и сформируем статьи затрат:

1. Расходные материалы. В данную статью затрат мы включаем расходы на канцелярские товары, такие как ручки, тетради и бумага для печати. Затраты по данной статье составляют около 2500 рублей.

2. Специальное оборудование для научных работ. Так как практическая часть работ выполнялась на физической модели, которая представляет собой электрический стенд со сменными блоками, в данную статью затрат войдет стоимость данной установки. Таким образом затраты по данной статье составят 454 480 рублей (с учетом 15% на транспортировку и установку).

3. Расходы на электроэнергию. В данную статью затрат отнесем расходы на электроэнергию при работе за компьютером и в лаборатории.

Работа за компьютером согласно календарному плану проводилась в течение 120 дней. При этом в среднем за компьютером проводилась работа около 2 часов в день. Соответственно, потребленная электроэнергия за рабочим местом составляет $0,95 \cdot 2 \cdot 120 = 228 \text{ кВт}\cdot\text{час}$, где 0,95 кВт – мощность блока питания компьютера и настольной лампы.

Работа в лаборатории проводилась в течение 90 дней, в среднем по 0,5 часов в день. Тогда, потребленная электроэнергия составит $1 \cdot 0,5 \cdot 90 = 45 \text{ кВт}\cdot\text{час}$, где 1 кВт мощность электроустановки.

С учетом существующего тарифа 1,82 руб/кВт·час, затраты на электроэнергию составят: $(228 + 45) \cdot 1,82 = 497$ рублей.

5.4 Анализ и оценка научно-технического уровня проекта (НТУ)

Для оценки научной ценности, технической значимости и эффективности исследований необходимо: рассчитать коэффициент научно-технического уровня. Коэффициент НТУ рассчитывается при помощи метода балльных оценок, в котором каждому из признаков НТУ присваивается определенное число баллов по принятой шкале. Общую оценку приводят по сумме баллов по всем показателям с учетом весовых характеристик. Общая оценка рассчитывается по формуле:

$$НТУ = \sum_{i=1}^n k_i \cdot П_i \quad (5.1)$$

Где:

k_i – весовой коэффициент i – го признака; P_i – количественная оценка i – го признака.

Таблица 5.2 – Весовые коэффициенты НТУ

Признаки НТУ	Весовой коэффициент
Уровень новизны	0.9
Теоретический уровень	0.7
Возможность реализации	0.1

Таблица 5.3 – Баллы для оценки уровня новизны

Уровень новизны	Характеристика уровня новизны	Баллы
Принципиально новая	Новое направление в науке и технике, новые факты и закономерности, новая теория, вещество, способ	8 – 10
Новая	По-новому объясняются те же факты, закономерности, новые понятия дополняют ранее полученные результаты	5 – 7
Относительно новая	Систематизируются, обобщаются имеющиеся сведения, новые связи между известными факторами	2 – 4

Не обладает новизной	Результат, который ранее был известен	0
----------------------	---------------------------------------	---

Таблица 5.4 – Шкала оценки новизны

Баллы	Уровень
1-4	Низкий НТУ
5-7	Средний НТУ
8-10	Сравнительно высокий НТУ
11-14	Высокий НТУ

Таблица 5.5 – Значимость теоретических уровней.

Характеристика значимости теоретических уровней	Баллы
Установка законов, разработка новой теории	10
Глубокая разработка проблем, многосторонний анализ, взаимозависимость между факторами	8
Разработка способа (алгоритм, вещество, устройство, программы)	6
Элементарный анализ связей между факторами (наличие гипотезы, объяснение версий, практические рекомендации)	2
Описание отдельных факторов (вещества, свойств, опыта, результатов)	0.5

Таблица 5.6 - Возможность реализации по времени и масштабам

Время реализации:	Баллы
В течение первых лет	10
От 5 до 10 лет	4
Свыше 10 лет	2
Масштабы реализации:	Баллы
Одно или несколько предприятий	2
Отрасль	4
Народное хозяйство	10

$$HTY = 0,9 \cdot 4 + 0,7 \cdot 2 + 0,1 \cdot 10 + 0,1 \cdot 4 = 6,4$$

Таблица 5.7 – Сводная таблица оценки научно-технического уровня НИР

Фактор НТУ	Значимость	Уровень фактора	Выбранный балл
Уровень новизны	0,9	Систематизируются, обобщаются имеющиеся сведения, новые связи между известными факторами	4
Теоретический уровень	0,7	Элементарный анализ связей между факторами (наличие гипотезы, объяснение версий, практические рекомендации)	2
Время реализации	0,1	В течение первых лет	10
Масштабы реализации	0,1	Отрасль	4

Таким образом, полученный расчетный коэффициент НТУ составил 6,4, что соответствует среднему НТУ. По полученным результатам расчета коэффициента научно-технического уровня можно сделать вывод, что данное исследование имеет хорошие показатели новизны, значимость теоретического

уровня и при этом результаты исследования могут широко использоваться в стратегически важной отрасли.

5.5 Заключение по разделу

В данном разделе был составлен календарный график выполнения всех этапов работ над магистерской диссертацией, который был проиллюстрирован на диаграмме Ганта. Также была составлена причинно-следственная диаграмма Исикавы. В заключении, была произведена оценка бюджета работ над магистерской диссертацией, который приблизительно составил 457477 рублей. Коэффициент НТУ исследования равен 6,4, что соответствует среднему НТУ.

РАЗДЕЛ 6. СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ

В данной магистерской диссертации рассматривается анализ применения математических методов для получения коэффициентов полиномов статических характеристик нагрузки. Исследования проводились за персональным компьютером и лабораторным стендом, которые расположены в аудитории 251 Энергетического института. Исходя из этого, данный раздел будет посвящен анализу вредных и опасных факторов на рабочем месте.

Безопасность жизнедеятельности – это система законодательных актов и соответствующих им социально - экономических, технических, гигиенических, организационных мероприятий, обеспечивающих безопасность, сохранение здоровья и работоспособности человека в процессе труда. Техника безопасности предусматривает организационные и технические мероприятия, которые обеспечивают наиболее безопасные условия труда на производстве.

Для предприятий разработаны специальные правила безопасности с учетом требований правил устройства электроустановок, которые являются обязательными для всего обслуживающего персонала.

6.1 Описание рабочего места

Производственные условия на рабочем месте характеризуются наличием различных опасных и вредных производственных факторов.

Вредный производственный фактор при своем воздействии на человека способствует возникновению заболевания или снижению работоспособности. Воздействие на работника опасного производственного фактора может привести к травме или другому внезапному, резкому ухудшению здоровья.

6.2 Анализ выявленных вредных факторов проектируемой производственной среды

Электромагнитные излучения и электростатические поля. Главным источником таких полей на рабочем месте, где проводились работы над диссертацией, является монитор персонального компьютера Compaq CQ58. У работника, который длительное время находится в зоне электромагнитного и

электростатического полей, может резко ухудшиться самочувствие. Появляются слабость, раздражительность, быстрая утомляемость, ослабление памяти, нарушение сна.

Согласно [12] напряженность электромагнитного поля на расстоянии 0,5 м от монитора не должна превышать:

Напряженность электромагнитного поля	Диапазон частот
25В/м	5 Гц – 2 кГц
2,5 В/м	2 Гц - 400 кГц

Напряженность электростатического поля не должна превышать 15 кВ/м [13].

Чтобы избежать воздействия полей за работой с персональным компьютером, необходимо соблюдать следующие правила:

- экран дисплея должен находиться от пользователя на расстоянии не менее 500 мм;
- не следует размещать по бокам от монитора какое-либо оборудование (принтер, сканер);
- для старых мониторов следует применять защитные фильтры;
- рекомендуется организация перерывов на 10-15 минут через каждые 45-60 минут работы [14].

Шум и вибрации. Основным источником шума на рабочем месте является системный блок персонального компьютера (шум от работы вентиляторов для охлаждения блока питания и процессора). Кроме того, вентиляторы являются и источником вибрации. Воздействие данных факторов на человека, может вызвать раздражительность, головную боли, головокружение, повышенная утомляемость, ухудшение памяти. Допустимый уровень шума на рабочем месте не должен превышать 50 дБ [13].

Снизить уровень шума можно, используя для отделки помещений с персональным компьютером специальные звукопоглощающие материалы с

максимальными коэффициентами поглощения в области частот 63-8000 Гц [13].

Снизить вибрацию компонентов персонального компьютера можно с помощью прокладок и изолирующих монтажных шайб. Также необходимо проверять крепежные винты внутри системного блока, на предмет их крепкого соединения.

Микроклимат. Метеорологические условия в производственных помещениях, или их микроклимат, зависят от теплофизических особенностей технологического процесса, климата, сезона года, условий вентиляции и отопления. Микроклимат производственных помещений определяется следующими показателями: температура, относительная влажность, скорость движения воздуха. Оптимальные значения перечисленных параметров для работ с персональным компьютером приведены в таблице 6.1.

Таблица 6.1 - Оптимальные значения показателей микроклимата [13]

Период года	Температура воздуха, °С	Температура поверхностей, °С	Относительная влажность воздуха, %	Скорость движения воздуха, м/с
Холодный	22-24	19-26	40-60	0,1
Теплый	23-25	20-29	40-60	0,1

На рабочем месте для обеспечения оптимальных микроклиматических условий ведется постоянное регулирование этих значений. В холодное время года работает система центрального отопления. Также аудитория оснащена естественной (окна и двери) и принудительной вытяжной системами вентиляции.

Освещенность. Недостаточная освещенность рабочей зоны может вызывать у человека не только утомление органов зрения, но и всего организма в целом. Следствием этого является снижение производительности труда и качества работы.

Помещения для работы с персональным компьютером должны иметь естественное и искусственное освещение. Освещенность на поверхности стола в зоне размещения рабочего документа должна составлять 300-500 лк. Освещенность поверхности экрана не должна быть более 300 лк. Яркость бликов на экране монитора не должна превышать 40 кд/м² и яркость потолка не должна превышать 200 кд/м²[13].

Коэффициент естественной освещенности в помещениях с использованием персонального компьютера должен быть не меньше 1,2%.

Произведем расчет искусственного освещения исследуемого рабочего помещения, которое имеет следующие размеры: ширина – 4,5 м, длина - 5,5 м, высота - 3,5 м, площадь – 24,75 м², объем – 86,6 м³.

В аудитории предусмотрено общее равномерное освещение, для которого применяются люминесцентные лампы типа ЛБ, для которых используется светильник типа ОД–2-30 (длинной 933 мм, шириной 204 мм).

Размещение светильников в помещении определяется размерами:

- $H = 3,5\text{ м}$ - высота помещения;
- $h_n = 3,5\text{ м}$ – для ОД–2-30 – высота светильника над полом, высота подвеса;
- $h_c = H - h_n = 3,5 - 3,5 = 0(\text{м})$ - расстояние светильников от перекрытия (свес);
- $h_p = 1,5\text{ м}$ – высота рабочей поверхности над полом;
- $h = h_n - h_p = 3,5 - 1 = 2(\text{м})$ – расчетная высота, высота светильника над рабочей поверхностью;
- $\lambda = 1,4$ – для светильников ОД – интегральный критерий оптимальности расположения светильников;

- $L = \lambda \cdot h = 1,4 \cdot 2 = 2,8(\text{м})$, – расстояние между соседними светильниками;
- $l = L/3 = 3,5/3 = 0,93(\text{м})$ – расстояние от крайних светильников или рядов до стены [4].

На основании данных расчетов рекомендуется разместить светильники в 2 ряда, по 3 светильника в ряду рис.6.1. Общее количество ламп – 12 штук.

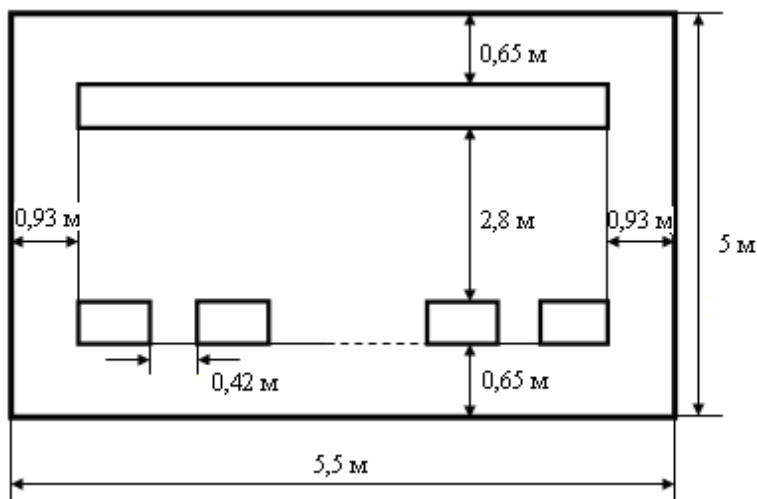


Рисунок 6.1 - План помещения и размещения светильников

Расчет общего равномерного освещения выполняется методом коэффициента светового потока, учитывающим световой поток, отраженный от потолка и стен.

$$\text{Находим индекс помещения: } i = \frac{S}{h \cdot (A + B)} = \frac{24,75}{2 \cdot (4,5 + 5,5)} = 1,23$$

Определяем по [15] значения коэффициентов отражения потолка и стен:

$\rho_n = 70\%$ – свежепобеленный потолок;

$\rho_c = 50\%$ – свежепобеленные стены с окнами без штор.

Согласно найденным коэффициентам находим значение коэффициента использования: для с $\rho_n = 70\%$ и $\rho_c = 50\%$ $\eta = 55\% = 0,55$

Определяем потребный световой поток ламп в каждом из рядов:

$$\Phi = \frac{E_n \cdot S \cdot K_z \cdot Z}{n \cdot \eta} = \frac{300 \cdot 24,75 \cdot 1,5 \cdot 1,1}{12 \cdot 0,55} = 1856(\text{Лм}),$$

Где:

$E_n = 300 \text{лк}$ – нормируемая минимальная освещенность [14];

$S = 24,75 \text{ м}^2$ – площадь освещаемого помещения;

$K_z = 1,5$ – коэффициент запаса, учитывающий загрязнение светильника, наличие в атмосфере цеха дыма и пыли;

$Z = 1,1$ – коэффициент неравномерности освещения;

$n = 12$ – число светильников;

$\eta = 0,55$ – коэффициент использования.

Выбираем ближайшую стандартную лампу – ЛХБ 30Вт с потоком 1940Лм [15].

Таким образом, в аудитории со свежепобеленными потолком и стенами, с окнами без штор в качестве искусственного освещения следует использовать 6 светильников типа ОД–2-30 с люминесцентными лампами ЛХБ мощностью 30 Вт с потоком 1940 Лм.

Психофизиологические факторы. К таким факторам относятся нервно-психические перегрузки: умственное перенапряжение, перенапряжение анализаторов, монотонность труда, эмоциональные перегрузки.

Для снижения степени влияния данного фактора на человека, работающего за компьютером, рекомендуется следующие параметры его рабочего пространства:

- ширина рабочей поверхности стола не менее 700 мм;
- высота рабочей поверхности стола над полом зависит от роста работающего - приблизительно 680 - 800 мм;
- оптимальные размеры столешницы - 1600 - 900 мм.

Подставка для ног должна быть регулируемой по высоте. Ширина должна быть не менее 300 мм, длина - не менее 400 мм. Кресло магистра должно обеспечивать опору для тела с учетом выполняемых действий, должно иметь возможность регулировки высоты и наклона спинки. Высота сиденья должна быть 420 - 550 мм, ширина и глубина сиденья - не менее 400 мм.

Клавиатура должна располагаться на расстоянии 100 - 300 мм от края стола, на высоте локтя работника.

Используемое рабочее место следует располагать боком по отношению к окну, что в свою очередь исключает попадание прямых солнечных лучей на монитор [16].

Кроме вышеперечисленных мероприятий также рекомендуется:

- проводить упражнения для глаз через каждые 20 - 25 минут работы;
- осуществляться физкультурные минутки;
- устанавливать рациональный режим труда и отдыха;
- организовывать небольшой отдых в процессе работы [13].

6.3 Анализ выявленных опасных факторов проектируемой производственной среды

К опасным производственным факторам можно отнести электрический ток. Степень опасного и вредного воздействия на человека электрического тока зависит от рода и величины напряжения и тока, частоты электрического тока, пути тока через тело человека, продолжительности его воздействия на организм человека, условий внешней среды [17].

Электрический ток, протекая через тело человека, производит термическое, механическое и световое воздействие (электролитическое разложение жидкости, в том числе и крови, судорожное сокращение мышц, разрыв тканей и поражение глаз).

При работе с персональным компьютером источниками тока могут быть практически все его составляющие, причем монитор и системный блок являются самыми опасными из них, так как потребляемое ими переменное напряжение 220 В с частотой 50 Гц является опасным для жизни человека.

Для обеспечения защиты от случайного прикосновения к токоведущим частям необходимо применять защитные оболочки, защитные ограждения, безопасное расположение и изоляцию токоведущих частей, изоляцию рабочего места, малое напряжение, защитное отключение, предупредительную сигнализацию, блокировку и знаки безопасности [17].

Для обеспечения защиты при прикосновении к металлическим нетоковедущим частям, которые могут оказаться под напряжением в результате

повреждения изоляции, применяют защитное заземление, зануление, выравнивание потенциала, систему защитных проводов, электрическое разделение сети и прочие способы.

Основные правила работы с персональным компьютером, направленные на предупреждение электротравматизма:

- запрещается пользоваться электрическими розетками без защитных изолирующих кожухов или с неисправными кожухами;
- запрещается включать в электросеть персональный компьютер с оголенными проводами и токоведущими частями электрических устройств;
- запрещается вытягивать вилку из розетки за шнур;
- запрещается работать на персональном компьютере со снятыми облицовочными частями;
- запрещается оставлять персональный компьютер включенным в сеть при длительном перерыве в работе и при пропадании напряжения в сети.

6.4 Охрана окружающей среды

В области работ, связанных с использованием персонального компьютера, возникает необходимость обеспечения безопасности окружающей среды, хотя с первого взгляда никаких негативных воздействий он на нее не оказывает.

Однако, разобравшись, можно выделить несколько отрицательных воздействий на окружающую среду:

- повышение электромагнитного и радиоактивного фона (в результате соответствующих излучений);
- повышение звукового фона (слышимый шум, инфразвуки и ультразвуки);
- образование твердых отходов (компьютерный лом, бумага и т.п.);
- неоправданное потребление электроэнергии, связано с использованием персонального компьютера не на полную мощность в течение всего его рабочего времени.

Чтобы предотвратить или снизить неблагоприятные воздействия на окружающую среду, необходимо выполнять следующие рекомендации:

- применять оборудование, соответствующее санитарным нормам и стандартам экологической безопасности;
- применять расходные материалы с высоким коэффициентом использования и возможностью их полной или частичной регенерации;
- отходы в виде компьютерного лома необходимо сдать в специальные пункты приема неисправной оргтехники, где их переработают;
- использовать экономные режимы работы оборудования и не допускать работы персонального компьютера во время перерывов в работе.

Высоковольтные линии электропередачи и подстанции являются основной причиной загрязнения окружающей среды электрическими и магнитными полями, которые негативно воздействуют на здоровье человека.

Все эти воздействия обуславливают тормозные процессы в центральной нервной системе, головную боль, вялость, быструю утомляемость. Наблюдаются изменения состава крови и давления, учащения пульса. Токи смещения в переменном электрическом поле или индуктированные токи в переменном магнитном поле при большой напряженности могут изменить процесс обмена веществ.

6.4.1 Нормирование уровней напряженности электрического поля

СанПиН установлены предельно допустимые уровни напряженности электрического поля промышленной частоты для персонала:

- $E > 25$ кВ/м – пребывание в ЭП без средств защиты не допускается;
- $20 < E < 25$ кВ/м – пребывание в ЭП не более 10 минут;
- $5 < E < 20$ кВ/м – допустимое время пребывания в ЭП вычисляют как

$$T = \frac{50}{E} - 2, ч$$

- $E < 5$ кВ/м - пребывание в ЭП допускается в течение полного рабочего дня.

Допустимое время пребывания в электрическом поле может быть реализовано одноразово или дробно в течение рабочего дня. В остальное рабочее время необходимо находиться вне зоны влияния электрического поля или применять средства защиты [18].

Электрические поля от линий электропередач также воздействуют на население. Существует определенная вероятность ошибок при проектировании и расположении питающих сетей в районах массовой застройки. Первый признак превышения норм по этому показателю - частые сбои при работе бытовой техники: помехи на экранах телевизоров, мониторов персональных компьютеров, радиопомехи. Для населения определены допустимые уровни воздействия электрического поля промышленной частоты табл. 6.2.

Предельно допустимые значения напряженности нормируются для электрического поля, не искаженного присутствием человека. Поэтому напряженность электрического поля определяется на высоте 1,8 м от уровня земли, а для помещений - от уровня пола.

Таблица 6.2 – Допустимые уровни напряженности электрического поля

Епду, кВ/м	Тип местности
0,5	Внутри жилых зданий
1	Территория зоны жилой застройки
5	Населенная местность вне зоны жилой застройки,
10	Участки пересечения ВЛ с автомобильными дорогами
15	Ненаселенная местность
20	Труднодоступная местность

6.4.2 Мероприятия по защите от электрических полей

В целях защиты населения от воздействия электрического поля устанавливаются санитарно-защитные зоны. Санитарно-защитной зоной является территория вдоль трассы воздушной линии, в которой напряженность электрического поля превышает 1 кВ/м. Для вновь проектируемых линий электропередачи, а также зданий и сооружений допускается принимать

границы санитарно-защитных зон вдоль трассы с горизонтальным расположением проводов и без средств снижения напряженности электрического поля по обе стороны от нее на следующих расстояниях от проекции на землю крайних фазных проводов в направлении, перпендикулярном к ВЛ: 20 м - для ВЛ напряжением 330 кВ; 30 м - 500 кВ; 40 м - 750 кВ; 55 м - 1150 кВ.

В пределах санитарно-защитной зоны запрещается:

- размещение жилых и общественных зданий и сооружений, площадок для стоянки и остановки всех видов транспорта, предприятий по обслуживанию автомобилей и складов нефти и нефтепродуктов;
- производство операций с горючим, выполнение ремонта машин и механизмов.

Для ограничения напряженности электрического поля под ЛЭП проводятся следующие мероприятия.

- установка заземленных тросов под проводами линий. Наведенные на заземленных тросах заряды частично компенсируют поле проводов линии и ограничивают напряженность поля;
- увеличение высоты подвеса проводов. Для обеспечения допустимых значений напряженности поля под ВЛ, в ПУЭ регламентируется минимальное расстояние от провода ВЛ до земли - габарит линии;
- использование растительного массива под линиями. Стволы и ветки деревьев, кустарников имеют высокую проводимость в течение всего года. Это обеспечивает полную экологическую безопасность людей и животных под линиями.

6.4.3 Нормирование уровней напряженности магнитного поля

Интенсивность воздействия магнитного поля определяется напряженностью или магнитной индукцией. Напряженность магнитного поля выражается в А/м (кратная величина кА/м); магнитная индукция в Тл.

Предельно допустимые уровни напряженности магнитного поля для персонала устанавливаются в зависимости от времени пребывания персонала

для условий общего (на все тело) и локального (на конечности) воздействия табл. 6.3.

Таблица 6.3 – Предельно допустимые уровни воздействия магнитного поля

Время пребывания (ч)	Допустимые уровни магнитного поля, Н (А/м)/В (мкТл) при воздействии поля	
	общем	локальном
< 1	1 600/2 000	6 400/8 000
2	800/1 000	3 200/4 000
4	400/500	1 600/2 000
8	80/100	800/1 000

Допустимая напряженность магнитного поля внутри временных интервалов определяется в соответствии с кривой интерполяции, приведенной на рис. 6.2.

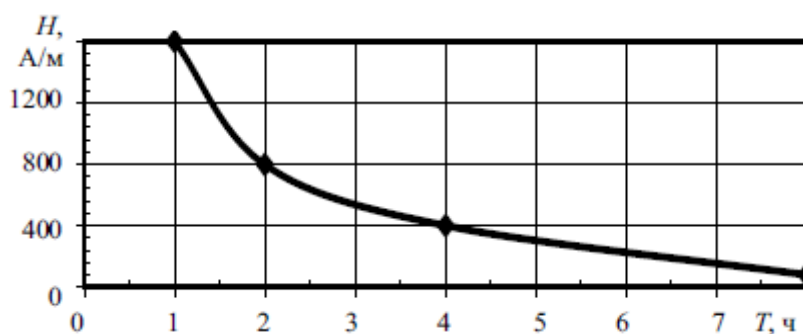


Рисунок 6.2 – Предельно допустимые уровни напряженности магнитного поля для персонала в условиях общего воздействия

При необходимости пребывания персонала в зонах с различной напряженностью (индукцией) магнитного поля общее время выполнения работ в этих зонах не должно превышать предельно допустимое для зоны с максимальной напряженностью. Допустимое время пребывания может быть реализовано одноразово или дробно в течение рабочего дня.

Для населения установлена предельно-допустимая гигиеническая норма: 10 мкТл внутри жилых помещений и 50 мкТл на территории зоны жилой застройки [20].

6.4.4 Мероприятия по защите от воздействия электромагнитных полей

Обеспечение защиты работающих от неблагоприятного влияния электромагнитных полей осуществляется путем проведения организационных, инженерно-технических и лечебно-профилактических мероприятий.

Организационные мероприятия при проектировании и эксплуатации оборудования, являющегося источником электромагнитных полей, или объектов, оснащенных источниками электромагнитных полей, включают:

- выбор рациональных режимов работы оборудования;
- выделение зон воздействия электромагнитных полей;
- расположение рабочих мест и маршрутов передвижения обслуживающего персонала на расстояниях от источников электромагнитных полей, обеспечивающих соблюдение предельно допустимых уровней;
- ремонт оборудования, являющегося источником электромагнитных полей;
- соблюдение правил безопасной эксплуатации источников электромагнитных полей.

Инженерно-технические мероприятия должны обеспечивать снижение уровней электромагнитных полей на рабочих местах путем внедрения новых технологий и применения средств коллективной и индивидуальной защиты.

Средствами защиты от воздействия электромагнитных полей частотой 50 Гц являются: стационарные экранирующие устройства в виде пассивных или активных экранов и экранирующие комплекты. Индивидуальные средства защиты (защитная одежда) должны изготавливаться из металлизированной (или любой другой ткани с высокой электропроводностью) и иметь санитарно-эпидемиологическое заключение.

6.5 Защита в чрезвычайных ситуациях

К чрезвычайным ситуациям, которые могут возникнуть на рабочем месте, можно отнести угрозу возникновения пожара, так как основная часть работы выполняется на персональном компьютере.

6.5.1 Пожарная безопасность

Пожарная безопасность представляет собой единый комплекс организационных, технических, режимных и эксплуатационных мероприятий по предупреждению пожаров.

Пожарная опасность производственных зданий и помещений определяется особенностями выполняемого в них технологического процесса, свойствами применяемых веществ и материалов, а также условиями их обработки. В зависимости от этого, согласно [19], помещения по пожарной и взрывной опасности подразделяют на категории А, Б, В, Г, Д. В частности, аудитория, где проводилась работа над диссертацией, относится к категории В, поскольку она характеризуется наличием твердых пожароопасных горючих и трудногорючих веществ и материалов (в том числе пыли и волокна), веществ и материалов, способных при взаимодействии с кислородом воздуха или друг с другом только гореть, при условии, что помещения, в которых они имеются в наличии или обращаются, не относятся к категориям А или Б.

Весьма распространенными причинами возникновения пожара является: несоблюдение правил пожарной безопасности, например, курение в неположенном месте; несоблюдение техники безопасности; правил по защите от поражения электрическим током. Кроме того, причинами могут послужить неисправность токоведущих частей оборудования, либо короткое замыкание в проводке или в оборудовании.

Для устранения причин пожаров проводятся следующие мероприятия:

1. Организационные: к ним относятся обучение рабочих и служащих правилам пожарной безопасности, разработка и реализация норм и правил пожарной безопасности, инструкций правильной эксплуатации рабочего оборудования, разработка планов эвакуации людей и т.д.

2. Технические: к ним относятся выбор и использование современных автоматических средств сигнализации, автоматических стационарных систем тушения пожаров, первичных средств пожаротушения, разработка методов и применение устройств ограничения распространения огня и т.п.

В качестве первичных средств пожаротушения в аудитории используются огнетушители ОПС-6. В качестве источника воды при пожаре могут служить пожарные гидранты, расположенные на каждом этаже учебного корпуса.

6.6 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

6.6.1 Специальные правовые нормы трудового законодательства

Организацией и управлением охраной труда занимается руководитель предприятия. Для организации работы по охране труда руководитель создает службу охраны труда. Служба охраны труда подчиняется непосредственно руководителю предприятия или по поручению одному из его заместителей. Служба охраны труда, как правило, существует в форме самостоятельного структурного подразделения предприятия, состоящего из штата специалистов по охране труда во главе с руководителем службы, и работает во взаимодействии с другими подразделениями предприятия, комиссией по охране труда, уполномоченными лицами по охране труда профессиональных союзов, службой охраны труда вышестоящей организации, а также с федеральными органами исполнительной власти соответствующего субъекта Российской Федерации в области охраны труда, органами государственного надзора и контроля за соблюдением требований охраны труда и органами общественного контроля.

Работники службы охраны труда в своей деятельности руководствуются законами и иными нормативными актами об охране труда Российской Федерации и соответствующего субъекта России, соглашениями (генеральным, региональным, отраслевым), коллективным договором, соглашением по охране

труда, другими локальными нормативными правовыми актами предприятия. В задачи службы охраны труда входят:

1. Организация работы по обеспечению выполнения работниками требований охраны труда;
2. Контроль за соблюдением работниками законов и иных нормативных правовых актов по охране труда, коллективного договора, соглашения по охране труда, других локальных нормативных правовых актов предприятия;
3. Организация профилактической работы по предупреждению производственного травматизма, профессиональных заболеваний и заболеваний, обусловленных производственными факторами, а также работы по улучшению условий труда;
4. Информирование и консультирование работников предприятия, в том числе его руководителя, по вопросам охраны труда;
5. Изучение и распространение передового опыта по охране труда, пропаганда вопросов охраны труда [21].

6.6.2 Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны

Рабочие места с персональными компьютерами по отношению к световым проемам должны располагаться так, чтобы естественный свет падал сбоку, желательно слева.

Схемы размещения рабочих мест с персональными компьютерами должны учитывать расстояния между рабочими столами с мониторами: расстояние между боковыми поверхностями мониторов не менее 1,2 м, а расстояние между экраном монитора и тыльной частью другого монитора не менее 2,0 м.

Рабочий стол может быть любой конструкции, отвечающей современным требованиям эргономики и позволяющей удобно разместить на рабочей поверхности оборудование с учетом его количества, размеров и характера выполняемой работы. Целесообразно применение столов, имеющих отдельную от основной столешницы специальную рабочую поверхность для

размещения клавиатуры. Используются рабочие столы с регулируемой и нерегулируемой высотой рабочей поверхности. При отсутствии регулировки высота стола должна быть в пределах от 680 до 800 мм.

Глубина рабочей поверхности стола должна составлять 800 мм (допускаемая не менее 600 мм), ширина — соответственно 1 600 мм и 1 200 мм.

Рабочая поверхность стола не должна иметь острых углов и краев, иметь матовую или полуматовую фактуру. Рабочий стол должен иметь пространство для ног высотой не менее 600 мм, шириной — не менее 500 мм, глубиной на уровне колен — не менее 450 мм и на уровне вытянутых ног — не менее 650 мм. Быстрое и точное считывание информации обеспечивается при расположении плоскости экрана ниже уровня глаз пользователя, предпочтительно перпендикулярно к нормальной линии взгляда (нормальная линия взгляда 15 градусов вниз от горизонтали).

Клавиатура должна располагаться на поверхности стола на расстоянии 100-300 мм от края, обращенного к пользователю.

Для удобства считывания информации с документов применяются подвижные подставки (пюпитры), размеры которых по длине и ширине соответствуют размерам устанавливаемых на них документов. Пюпитр размещается в одной плоскости и на одной высоте с экраном.

Для обеспечения физиологически рациональной рабочей позы, создания условий для ее изменения в течение рабочего дня применяются подъемно-поворотные рабочие стулья с сиденьем и спинкой, регулируемые по высоте и углам наклона, а также расстоянию спинки от переднего края сидения.

Конструкция стула должна обеспечивать:

- ширину и глубину поверхности сиденья не менее 400 мм;
- поверхность сиденья с закругленным передним краем;
- регулировку высоты поверхности сиденья в пределах 400-550 мм и углом наклона вперед до 15 градусов и назад до 5 градусов.;

- высоту опорной поверхности спинки 300 ± 20 мм, ширину — не менее 380 мм и радиус кривизны горизонтальной плоскости 400 мм;
- угол наклона спинки в вертикальной плоскости в пределах 0 ± 30 градусов;
- регулировку расстояния спинки от переднего края сидения в пределах 260-400 мм;
- стационарные или съемные подлокотники длиной не менее 250 мм и шириной 50-70 мм;
- регулировку подлокотников по высоте над сиденьем в пределах 230 ± 30 мм и внутреннего расстояния между подлокотниками в пределах 350-500 мм;
- поверхность сиденья, спинки и подлокотников должна быть полумягкой, с нескользящим не электризующимся, воздухопроницаемым покрытием, легко очищаемым от загрязнения.

Рабочее место должно быть оборудовано подставкой для ног, имеющей ширину не менее 300 мм, глубину не менее 400 мм, регулировку по высоте в пределах до 150 мм и по углу наклона опорной поверхности подставки до 20 градусов. Поверхность подставки должна быть рифленой и иметь по переднему краю бортик высотой 10 мм [22].

6.7 Заключение по разделу

В данной главе были представлена оценка рабочего места, на котором проводилась работа над магистерской диссертацией. Были описаны все возможные вредные и опасные факторы производственной среды и мероприятия по устранению и предотвращению данных факторов. Рассмотрено влияние энергосистемы на окружающую среду и мероприятия по охране окружающей среды. Можно сделать вывод, что рабочее место, находящееся в аудитории 251 полностью удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к рабочему месту.

Заключение

В первом разделе даны теоретические сведения о статических характеристиках нагрузки по напряжению. Рассмотрены такие понятия как модели нагрузки в расчетах режимов энергосистем, обобщенные характеристики. Приведены сведения о возможности уточнения обобщенных характеристик нагрузки, обоснована задача повторного исследования СХН.

Второй раздел содержит теоретическое описание методов получения статических характеристик нагрузки. Для получения статических характеристик нагрузки можно провести активные и пассивные эксперименты.

Активный эксперимент используется для определения статических и динамических характеристик нагрузки по напряжению и частоте при принудительном изменении в широком диапазоне напряжения на нагрузке или частоты.

Пассивный эксперимент состоит в использовании для получения регулирующих эффектов нагрузки по напряжению тех малых случайных колебаний напряжения, которые всегда имеют место в электрической сети.

Статические характеристики можно получить расчетным методом. Расчетный метод заключается в определении статических характеристик узла нагрузки на основе данных о статических характеристиках мощности электроприемников.

Третий раздел посвящен описанию физической модели, на которой будут проводиться активные эксперименты для получения статических характеристик нагрузки.

С помощью лабораторного оборудования были подготовлены электрические схемы соединения для проведения экспериментов.

Кроме того, в главе описана процедура планирования экспериментов.

В результате проведения экспериментов были получены массивы значений напряжений, активных и реактивных мощностей U , P , Q .

В четвертом разделе для получения коэффициентов полиномов статических характеристик по напряжению были рассмотрены два

математических метода: метод наименьших квадратов и метод главных компонент.

Полученные по методу наименьших квадратов коэффициенты полиномов статических характеристик по напряжению и регулирующие эффекты нагрузки по напряжению представлены в табл. 4.3.

В отличие от метода наименьших квадратов метод главных компонент решает задачу оценки коэффициентов не полиномиальной, а линейной моделью. Обработка массивов данных измерительной информации методом главных компонент представляет возможность нахождения только двух коэффициентов, а также оценку регулирующего эффекта нагрузки.

Определенные с помощью МНК и МГК регулирующие эффекты нагрузки имеют практический одинаковые значения, что говорит о работоспособности обоих методов.

В пятом разделе составлен календарный график выполнения всех этапов работ над магистерской диссертацией, произведена оценка бюджета работ над магистерской диссертацией.

В последнем разделе была произведена оценка рабочего места на предмет вредных и опасных факторов производственной среды. Описано влияние объекта исследования на окружающую среду и предложены мероприятия их уменьшению.

Все запланированные задачи были выполнены в полном объеме.

Список литературы

1. Гуревич Ю.Е. и др. Устойчивость нагрузки электрических систем / Ю.Е. Гуревич, Л.Е. Либова, Э.А. Хачатрян. – М.: Энергоиздат, 1981. – 208 с.
2. Электрические системы. Электрические сети: Учеб. для электроэнерг. спец. вузов / В.А. Веников, А.А. Глазунов, Л.А. Жуков и др.: Под ред. В.А. Веникова, В.А. Строева. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1998. – 511 с.
3. Jovica V. Milanović, Convenor (GB), Julija Matevosiyani, Secretary (US), Anish Gaikwad, Web Officer (US); Members: Alberto Borghetti (IT), Saša Ž. Djokić (GB), Zhao Yang Dong (AU), Andrew Halley (AU), Lidija M. Korunović (RS), Sergio Martinez Villanueva (ES), Jin Ma (CN), Pouyan Pourbeik (US), Fernanda Resende (PT), Stefan Sterpu (FR), Fortunato Villella (BE), Koji Yamashita (JP); Corresponding Members: Odin Auer (AR), Karim Karoui (BE), Dimitry Kosterev (US), Shu Kwan Leung (AU), Dumisani Mtollo (ZA), Samila Mat Zali (MY); Contributors: Adam Collin (GB), Yizheng Xu (GB); Reviewers: Hans Abildgaard (DK), Jose Conto (US), Marian Piekutowski (AU), Walter Sattinger (CH), Toshio Inoue (JP), William Hung (GB). Modeling and aggregation of loads in flexible power networks // Electric power industry. – 2014 p 3-4.
4. Горбунова Л.М. и др. Экспериментальные исследования режимов энергосистем / Л.М. Горбунова, М.Г. Портной, Р.С. Рабинович. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 448 с.
5. Гуревич Ю.Е. и др. Устойчивость нагрузки электрических систем / Ю.Е. Гуревич, Л.Е. Либова, Э.А. Хачатрян. – М.: Энергоиздат, 1981. – 208 с.
6. С.В. Балдов, О.А. Бушуева, Д.Н. Кормилицын, А.И. Кулешов, Ю.С. Мешкова, А.Ю. Мурзин, А.А. Шульпин. Определение статических характеристик нагрузки по напряжению в электрических сетях с комплексной нагрузкой // Электроэнергетика. – 2014. с 2-3.
7. Основы теории инженерно-физического эксперимента: учебное пособие / В.А. Архипов, А.П. Березиков. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2008. – 206 с.
8. Сенигов П.Н.. Системы электроснабжения. Руководство по выполнению базовых экспериментов. СЭС.001 РБЭ (939) - Челябинск: ИПЦ «Учебная техника», 2007. - 35 с.
9. О. П. Мальцева, Н. В. Кояин, Л. С. Удут Численные методы в электротехнике. Компьютерный лабораторный практикум. Часть 2.
10. Метод главных компонент и его применение в электроэнергетике. Курсовая работа. Студент: Шорикова Мария Егоровна. Руководитель: д.т.н., профессор Обоскалов Владислав Петрович.
11. Г123 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение: учебно-методическое пособие / Н.А. Гаврикова, Л.Р. Тухватули-на, И.Г. Видяев, Г.Н. Серикова, Н.В. Шаповалова; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. – 73 с.

12. СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 «Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы». - М.: Минюст России, 2003.
13. СанПиН 2.2.2/2.4.2732-10 Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы «Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы». - М.: Минюст России, 2010.
14. Расчет искусственного освещения. Методические указания к выполнению индивидуальных заданий для студентов дневного и заочного обучения всех специальностей. - Томск: Изд. ТПУ, 2004. - 15 с.
15. ГОСТ 12.2.032-78. «ССБТ. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования». - М.: Госстандарт России, 1987.
16. ГОСТ 12.1.019-79 «ССБТ. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты». - М.: Госстандарт России, 1985.
17. НПБ 105-95 «Определение категорий помещений и зданий по взрывопожарной и пожарной безопасности», ГУГПС МВД РФ, 1995.
18. Сенигов П.Н.. Системы электроснабжения. Руководство по выполнению базовых экспериментов. СЭС.001 РБЭ (939) - Челябинск: ИПЦ «Учебная техника», 2007. - 35 с.
19. СанПиН 2.2.4.1191-03. "Электромагнитные поля в производственных условиях". М.: Минздрав России, 2003.
20. Электромагнитная совместимость высоковольтной техники: учебное пособие / Д.В. Жгун. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2008. – 150с.
21. <http://ohrana-bgd.narod.ru/ohselh8.html>
22. <http://www.grandars.ru/shkola/bezopasnost-zhiznedeyatelnosti/organizaciya-raboty-za-kompyuterom.html>
23. Модели развития электроэнергетических систем / С.С. Ананичева, А.Л. Мызин. Екатеринбург, ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2005. 80 с.
24. Теория вероятностей и математическая статистика / В.Е. Гмурман. М.: Высшая школа, 1997. 479 с.
25. <http://www.exponenta.ru/educat/class/courses/tv/theme0/3.asp>
26. Pearson, K. On lines and planes of closest fit to systems of points in space. Philosophical Magazine, 2, 1901. 559-572 с.

Приложение А
(справочное)

Раздел III
Experimental research

Студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5АМ4Г	Жумагазин Галымжан Бейимбетулы		

Консультант кафедры: ЭСиЭ

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Бацева Наталья Ленмировна	к.т.н., доцент		

Консультант – лингвист кафедры: ИЯЭИ :

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Низкодубов Гавриил Анатольевич	к.п.н., доцент		

PART 3 EXPERIMENTAL RESEARCHES

Physical modeling is an experimental research method. At the same time, the real object is associated with a copy of its material physical model, allowing for study in the laboratory.

Despite significant progress in the development of methods of mathematical modeling, they will not replace the physical or natural experiment, because experiment is always the basis of the study, so experimental studies are very important for the study of physical processes and phenomena.

Measured in the experiment, carried out on the real object, the experimental data are needed for the following tasks:

1. understanding of the physical phenomena and building adequate physical and mathematical models of the process on the basis of experimental data;
2. obtaining database required for the settlement of this mathematical model of the process;
3. confirmation of the adequacy of the mathematical modeling by comparing the calculated and experimental data and refinement of physical and mathematical models.

Experimental Design is a complex of measures, aimed at the effective formulation of the experiments. Effectiveness of the experiment will be greatly reduced without experimental plan, for example, duplication of measurement of some parameters can be observed, whereas other parameters are not accurately assessed.

Experimental Design includes a number of stages:

1. production purpose of the experiment and its form (attributive, control, comparative, research);
2. specification of conditions of the experiment: existing or available equipment, the timing of the work, financial resources, the number of workers and staff composition;
3. identification and selection of input and output parameters based on the collection and analysis of the preliminary information. The input parameters can be recorded and controlled (depend on the observer), and random, i.e. registrable but

uncontrollable. Along with it, the status of the object of interest may be affected by unrecorded and uncontrollable parameters that make systematic or random errors in the measurement results, such as instrumentation errors, changes in the properties of the investigated object in the period of the experiment, for example, due to material aging, or depreciation, staff exposure;

4. establishment of the required accuracy of measurement results: output parameters, the field of possible changes in the input parameters, specification types of impacts. The type of samples or of the objects is selected, given the degree of their compliance with the actual products on the state apparatus, the shape, size and other characteristics. The accuracy of experimental data essentially depends on the volume of the test. Reliability of the results is higher with the increase of the experiments number under the same conditions;

5. planning and experiment conduction: experiments amount and conduction procedure, method of collection, storage and data documentation. The order of experiment conduction is important, if the input parameters (factors) for the study of the same object within one experiment take different values;

6. statistical processing of the experimental results, the construction of a mathematical model of the behavior of the studied characteristics. The need for treatment is caused by the selective analysis of individual data, out of touch with the rest of the results, or incorrect treatment, they can not only reduce the value of practical recommendations, but also lead to wrong conclusions;

7. explaining of obtained results and formulation of recommendations for their use, refinement of experiment conduction technique.

3.1 The elements of the physical model used in the experiments

A physical model is a power supply system.

Fig. 3.1 - 3.6 are diagrams for experiments on removal of static load voltage characteristics.

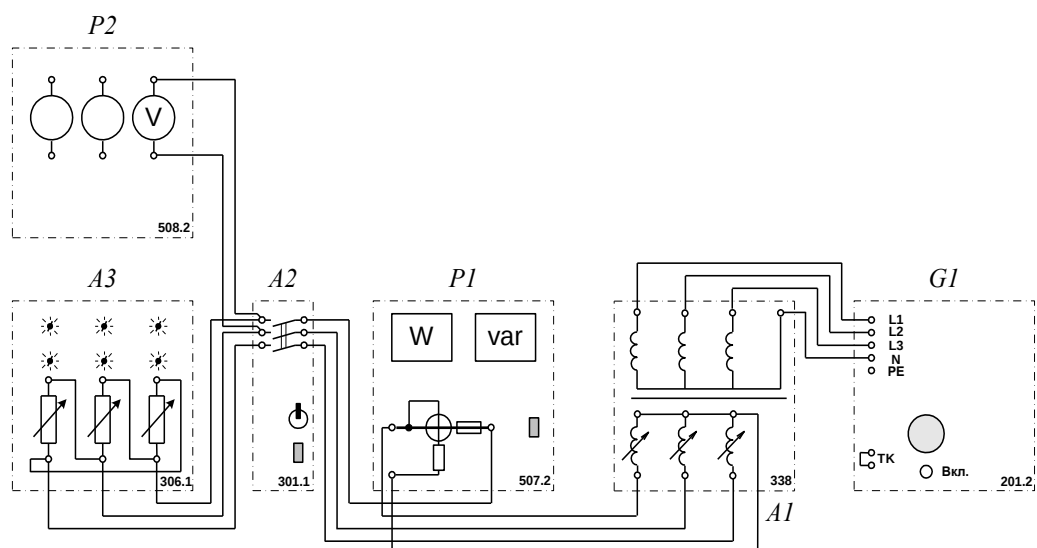


Figure 3.1 – Scheme for removing static characteristics resistive load

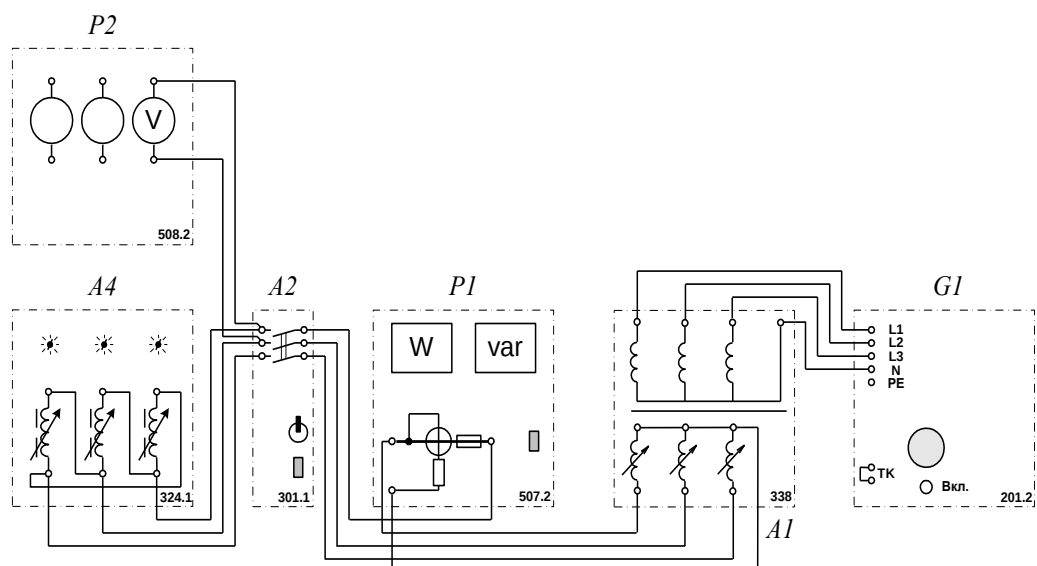


Figure 3.2 – Scheme for removing static characteristics of inductive load

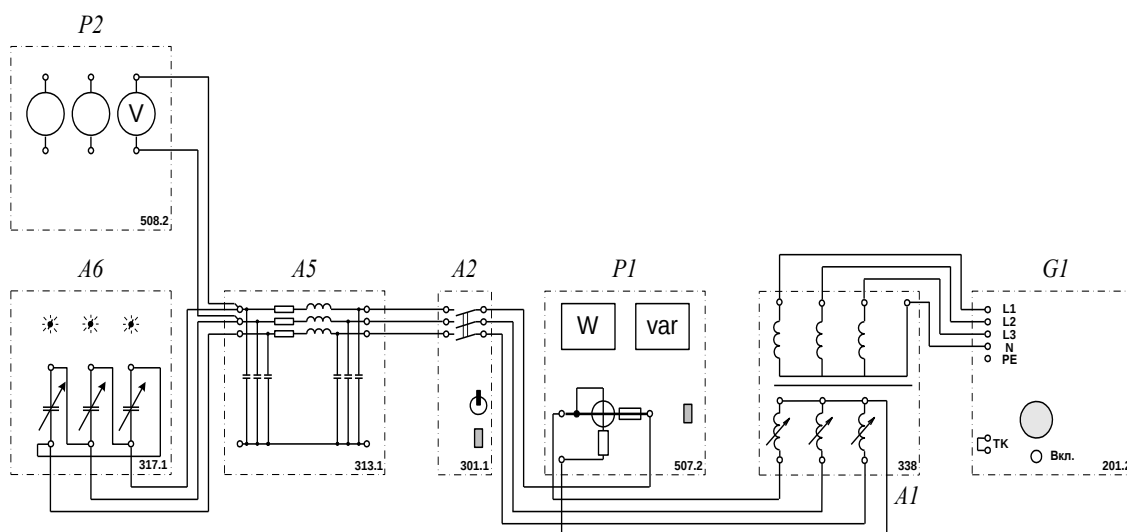


Figure 3.3 – Scheme for removing static characteristics capacitive load

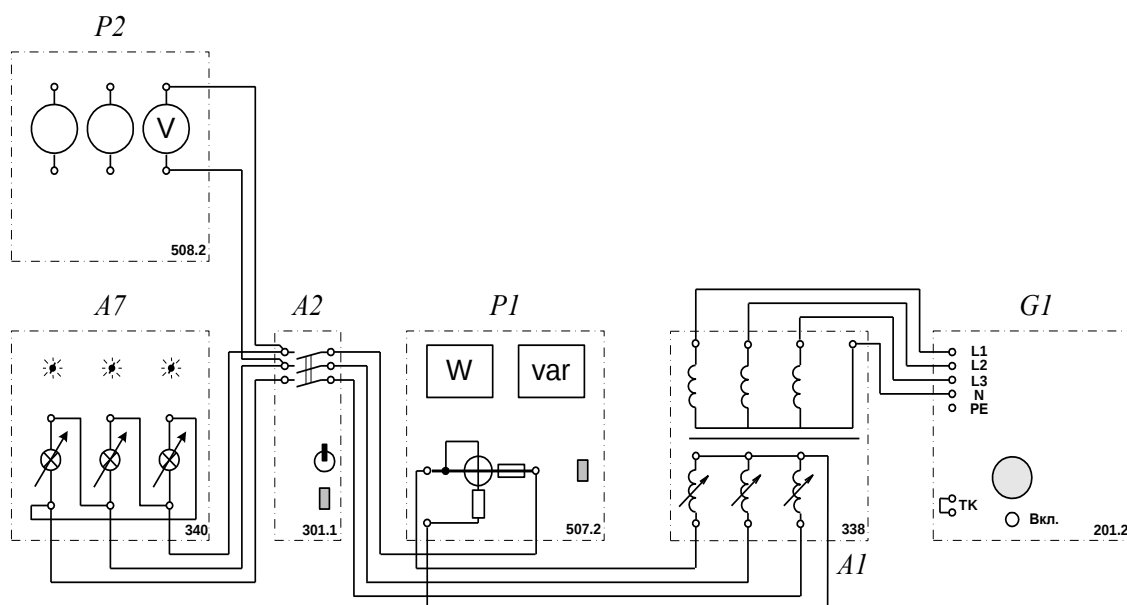


Figure 3.4 – Scheme for removing static characteristics light load

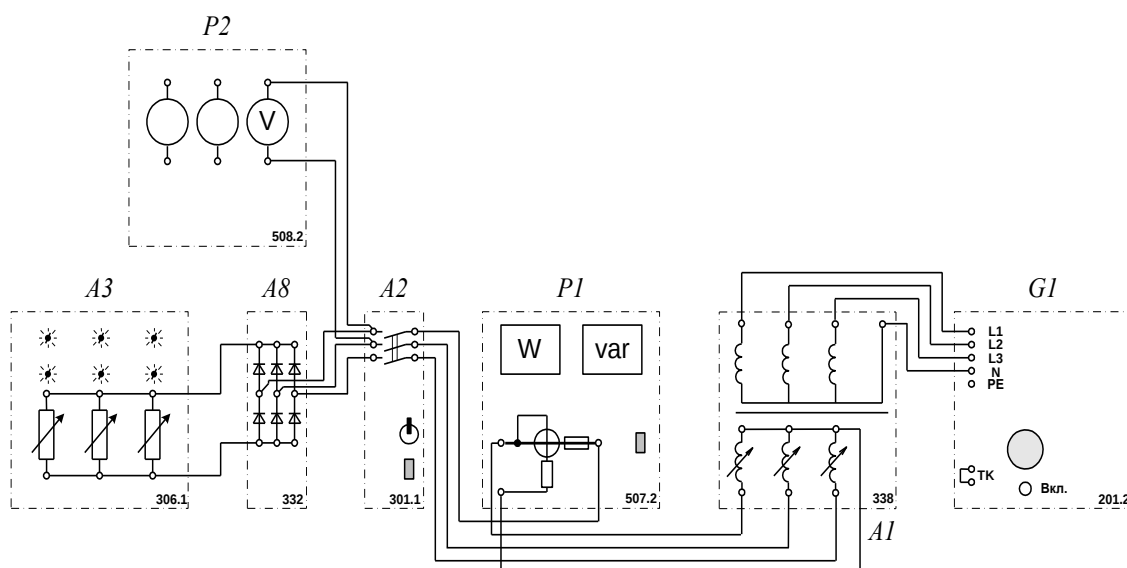


Figure 3.5 – Scheme for removing static characteristics rectifier load

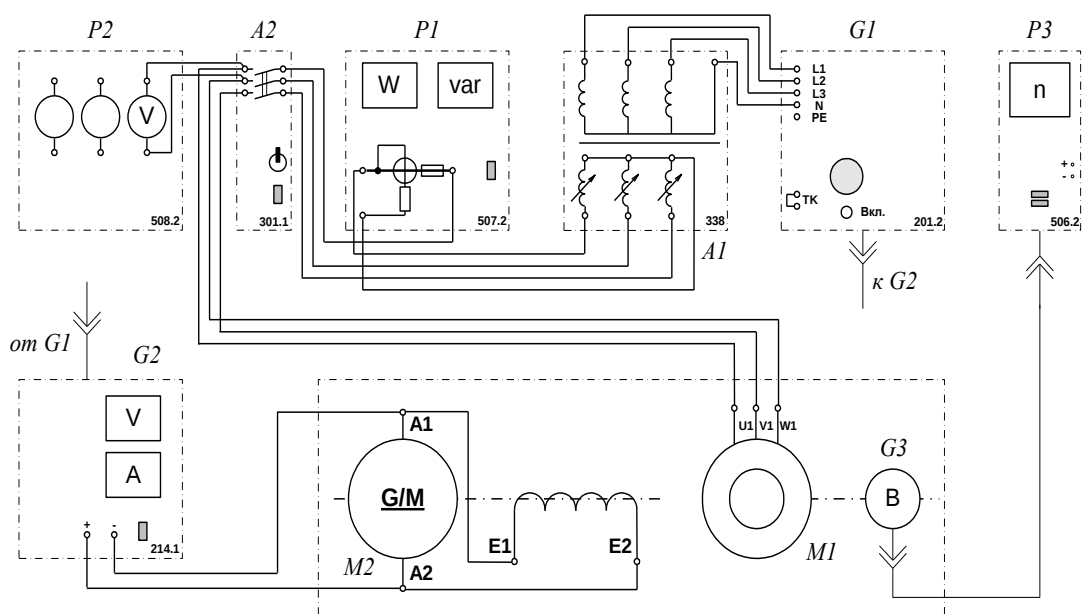


Figure 3.6 – Scheme for removing static characteristics asynchronous load

Active experiments were carried out according to the plan using circuits shown in Figures 3.1-3.6.

The adjustment range and the voltage change, when switching from one transformer control stage to another, should be considered during planning. The experiment is divided into four stages. In the first stage of the experiment by switching the tap changer of the transformer voltage is set equal to the nominal value U_{nom} . The voltage sequentially rises from U_{nom} to U_{max} in the second stage with steps

of 2.3% of the nominal voltage U_{nom} . The voltage consistently reduces in the third stage from the maximum voltage U_{max} to the minimum voltage U_{min} with steps 2.3% of the nominal voltage U_{nom} by switching on-load-tap-changer of the transformer. The voltage consistently raises from the minimum voltage U_{min} to the nominal voltage U_{nom} with steps of 2.3% of the nominal voltage U_{nom} in the fourth step.

The process of changing the voltage is conventionally illustrated in Figure 3.7

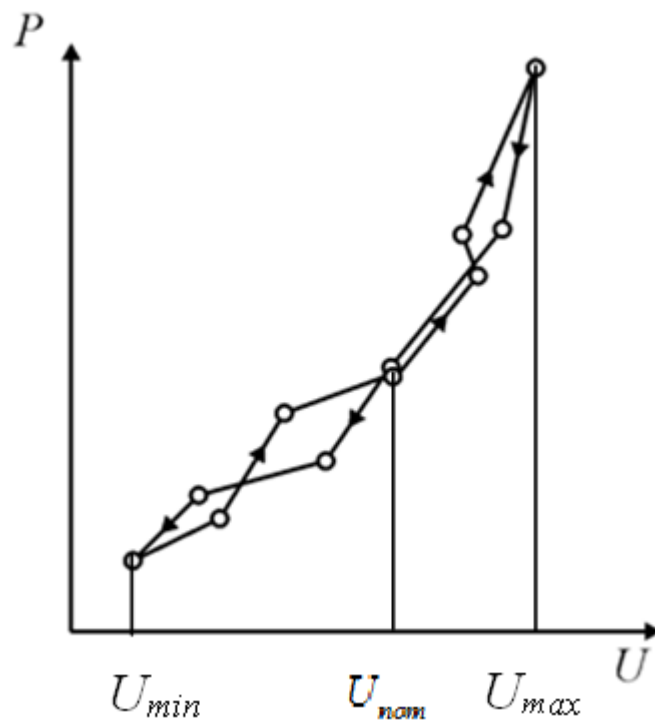


Figure 3.7 – The process of changing the voltage

Fixed voltage, three-phase active P and reactive power Q , are recorded in each stage for the same steps when the voltage changes according to the scheme:

$$U_{nom} \rightarrow U_{max} \rightarrow U_{min} \rightarrow U_{nom}.$$

The duration of each stage with constant voltage must be at least 2 minutes.

Circuit measurement must be designed to ensure registration of the voltage at the supply point and resultant values of three-phase active P and reactive power Q .

3.2 Technical characteristics of the elements of the physical model

List of equipment required for the experiments is given in Table. 3.1

Table 3.1 - List of equipment

Designation	Name	A type	Parameters
A1	Regulating transformer	338	250VA 3x220/3x90...140V
A2	Three-pole breaker	301.1	400 V~;10A
A3	Resistive load	306.1	3x0...50W; 220/380V
A4	Inductive load	324.2	220/380 V; 50 Hz; 3x50 VAR
A5	Transmission line model	313.2	400 V; 50 Hz; 3x0,3 A inductance/active phase resistance 0...1,5 ГН/ 0...250 ohm, capacitance between phase and earth 0...0,45 microF
A6	Capacitive load	317.2	220/380 V; 50 Hz; 3x50 VAR
A7	Light load	340	3x0...45 W 220 V 220/380 V; 50 Hz; 3x50 VAR
A8	Diode's block	332	2 A;600 V
P1	Power meter	507.2	0...600 VA 0...1 A 0...600 V
P2	Mustimeter's block	508.2	3 multimeters 0...10 A; 0...1000 V;

Designation	Name	A type	Parameters
			0...20 Mohm
P3	Speed indicator	506.2	2000...0...2000 min ⁻¹
G1	Three-phase power source	201.2	400 V ~; 16 A
G2	Motor Power Source DC	206.1	Anchor chain 0...250 V-; 3 A Field circuit 200 V-; 1 A
G3	Angular movement transducer	104	6 output channels / 2500 pulses per revolution
M1	Induction motor	103.1	120 W; 220/380 V; cosφ=0,7; 1360 min ⁻¹ ₁
M2	DC machine	101.2	90 W / 220 V / 0,56 A (anchor) / 2×110 V / 0,25 A (excitation)

3.3 Experimental results

The results are shown in Table. 3.2 – 3.11

Table 3.2 - Experiment with resistive load

Voltage, V	Power	
	<i>P</i> , W	<i>Q</i> , VAR
220	8400	900
224	8850	1050
229	9375	1500
233	9750	1500
237	10125	1500
214	8250	1500
210	7875	1500
206	7500	1500
201	7350	1350
197	6900	1350
192	6375	1350

Voltage, V	Power	
218	8850	1425
223	9000	1500
228	9375	1500
232	9750	1500
235	10125	1500
214	8250	1500
209	7875	1350
205	7500	1350
200	7350	1350
196	6900	1350
191	6375	1350

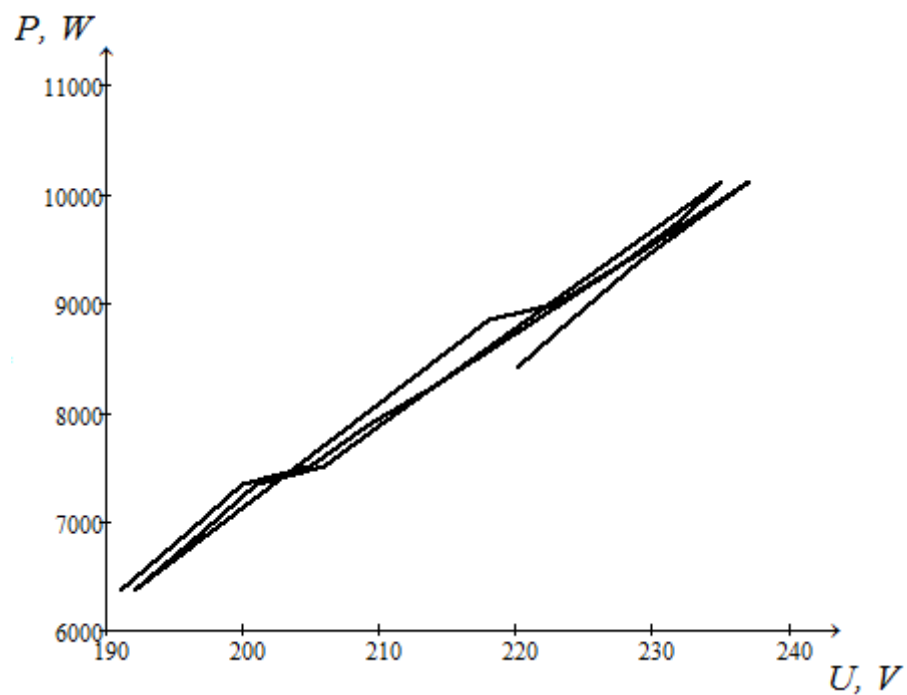


Figure 3.8 - Static characteristics $P(U)$ of resistive load

Table 3.3 - Experiment with inductive load

Voltage, V	Power	
	P, W	Q, VAR
220	0	9600
226	0	9975
230	0	10425
234	0	10725
238	0	11175
216	0	9150
211	0	8850

Voltage, V	Power	
207	0	8475
202	0	8100
197	0	7800
193	0	7500
220	0	9600
224	0	10050
229	0	10245
234	0	10800
238	0	11175
215	0	9150
211	0	8850
206	0	8400
202	0	8100
197	0	7800
193	0	7500

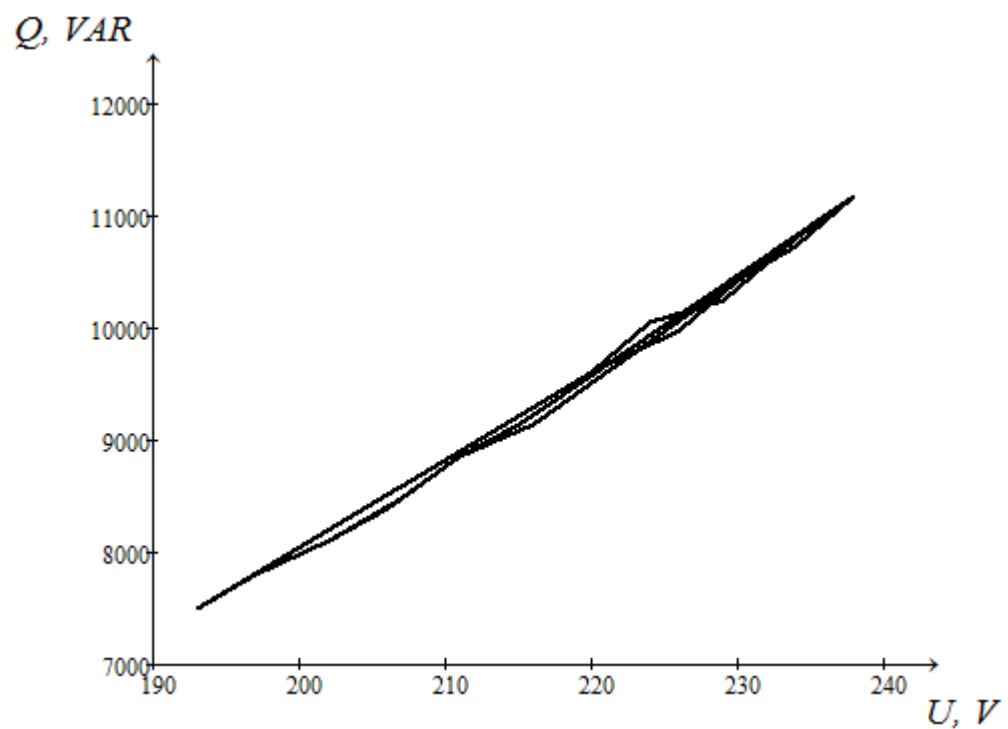


Figure 3.9 - Static characteristics $Q(U)$ of inductive load

Table 3.4 - Experiment with capacitive load

Voltage, V	Power	
	P, W	Q, VAR
224	4125	-7125
228	4350	-7350
233	4500	-7575

Voltage, V	Power	
238	4575	-7800
242	4725	-8175
219	3900	-6750
215	3750	-6375
210	3600	-6075
206	3375	-5850
201	3150	-5625
196	3000	-5325
224	4125	-7125
228	4350	-7350
232	4425	-7575
237	4575	-7800
242	4725	-8175
219	3900	-6675
214	3750	-6375
210	3525	-6075
205	3300	-5850
201	3075	-5625
196	3000	-5325

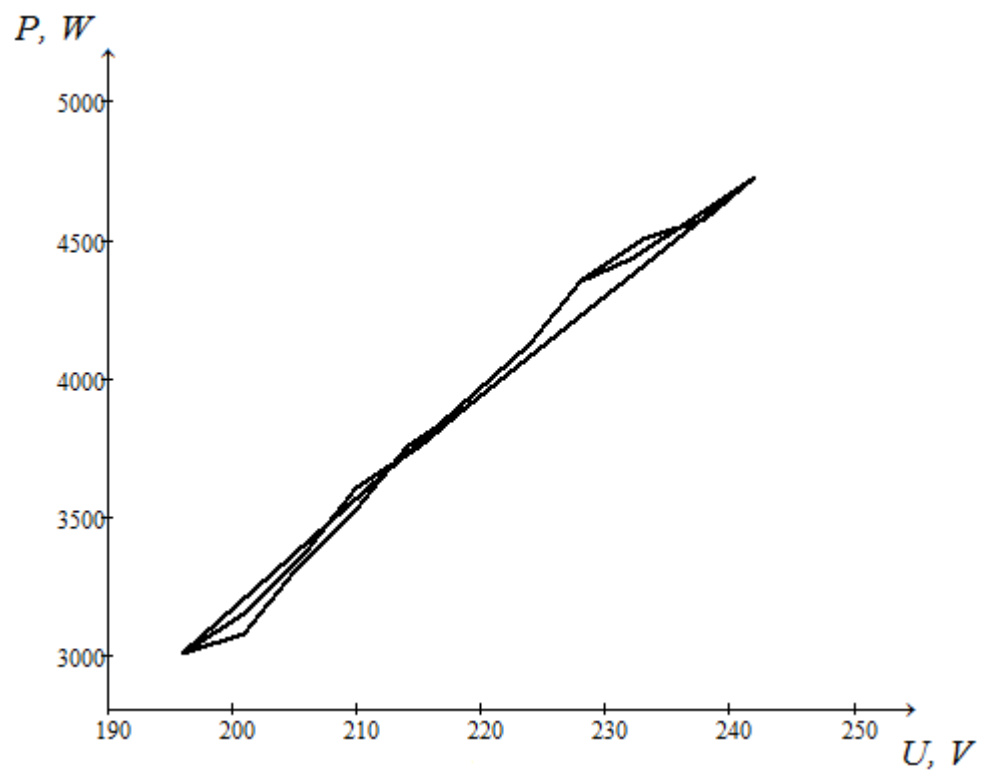


Figure 3.10 - Static characteristics $P(U)$ of capacitive load

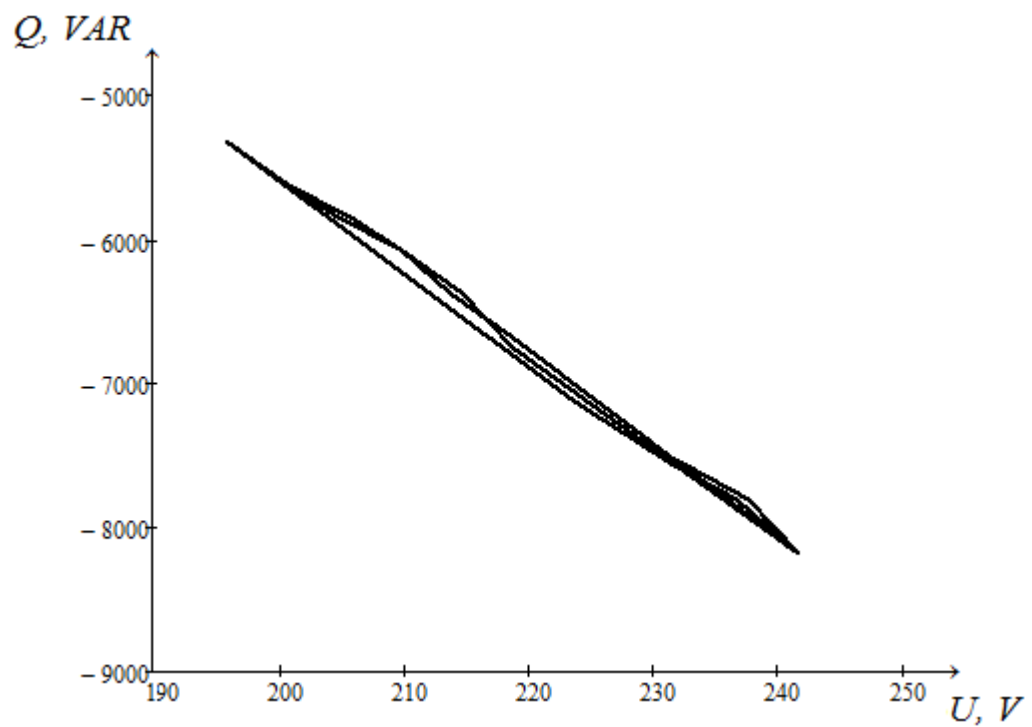


Figure 3.11 - Static characteristics $Q(U)$ of capacitive load

Table 3.5 - Experiment with the lighting load

Voltage, V	Power	
	P, W	Q, VAR
218	2460	0
222	2610	0
227	2700	0
231	2820	0
236	2940	0
213	2460	0
209	2370	0
204	2280	0
200	2190	0
196	2100	0
191	2010	0
218	2460	0
222	2610	0
227	2700	0
231	2820	0
236	2940	0
213	2460	0
208	2370	0
204	2280	0
200	2190	0
196	2100	0

Voltage, V	Power	
191	2010	0

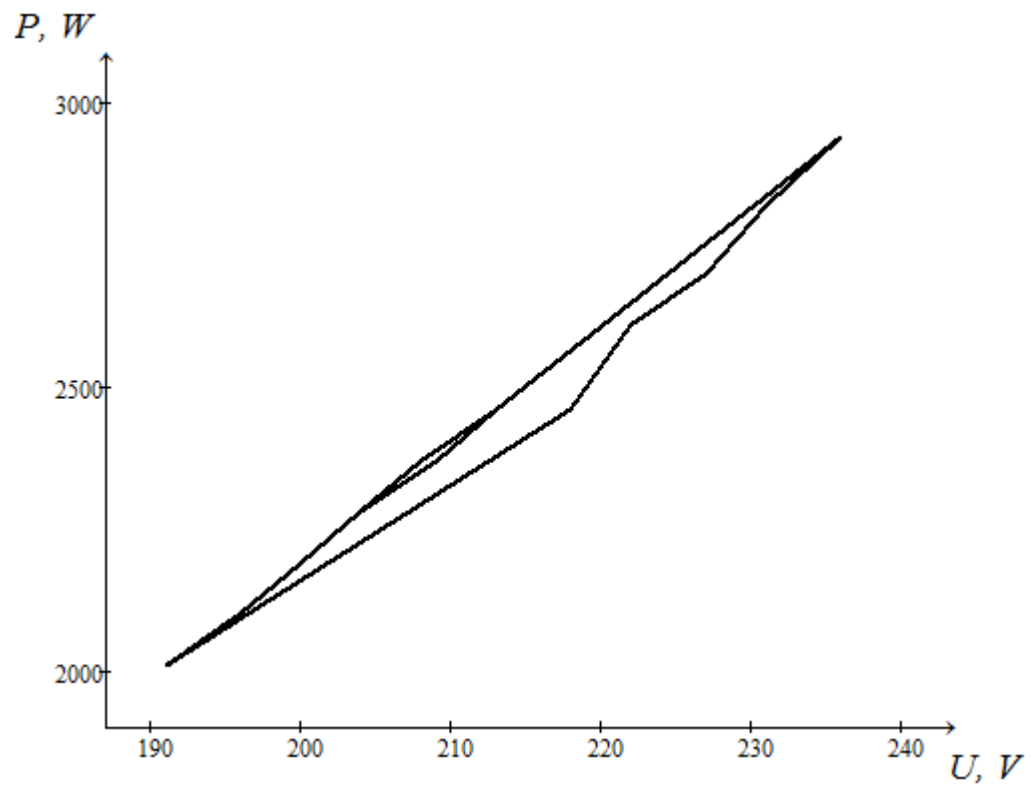


Figure 3.12 - Static characteristics $P(U)$ of lighting load

Table 3.6 - Experiment with rectifier load

Voltage, V	Power	
	P, W	Q, VAR
220	10875	375
225	11250	375
229	11625	375
233	12000	375
238	12375	375
216	10500	375
211	9750	375
207	9375	375
202	9000	375
198	8625	375
194	8250	375
220	10875	375
225	11250	375
230	11625	375
234	12000	375

Voltage, V	Power	
238	12375	375
216	10500	375
212	9750	375
207	9375	375
203	9000	375
198	8625	375
194	8250	375

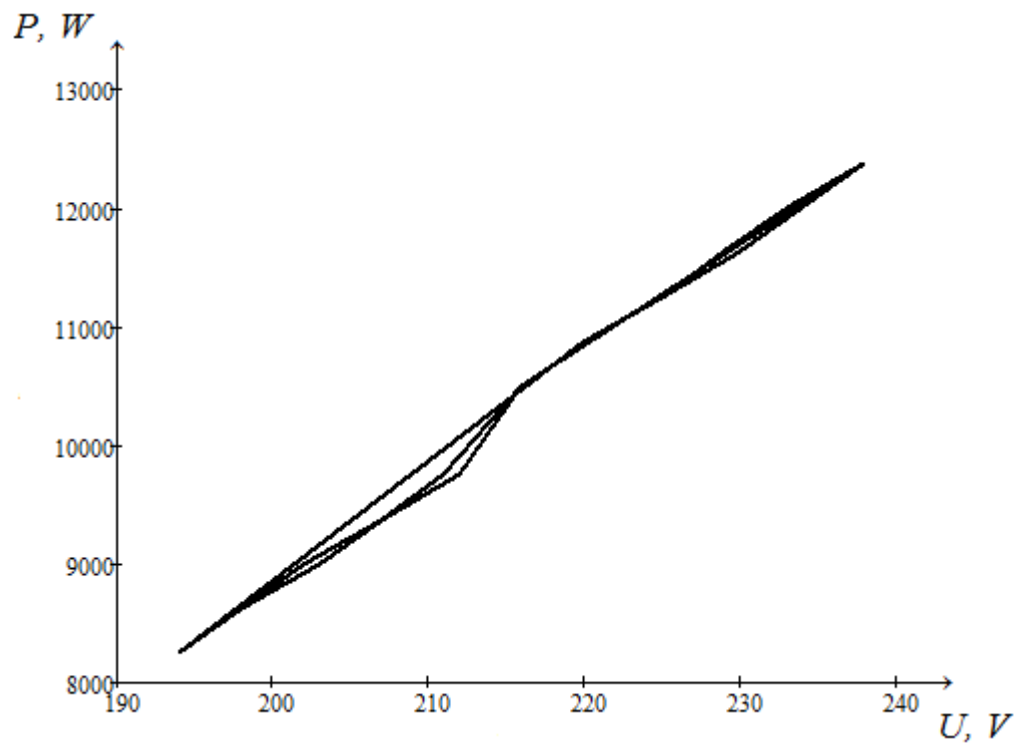


Figure 3.13 - Static characteristics $P(U)$ of rectifier load

Table 3.7 - Experiment with active-inductive load

Voltage, V	Power	
	P, W	Q, VAR
221	7350	7500
225	7500	7875
229	7875	8250
233	8250	8625
238	8475	8850
216	7125	7350
211	6675	7050
206	6300	6750
202	6075	6375
197	5850	6075
193	5625	5925

Voltage, V	Power	
219	7350	7500
224	7500	7725
228	7650	7950
233	8175	8475
238	8475	8850
215	7125	7350
211	6675	7050
207	6375	6750
202	6075	6375
198	5850	6150
193	5625	6000

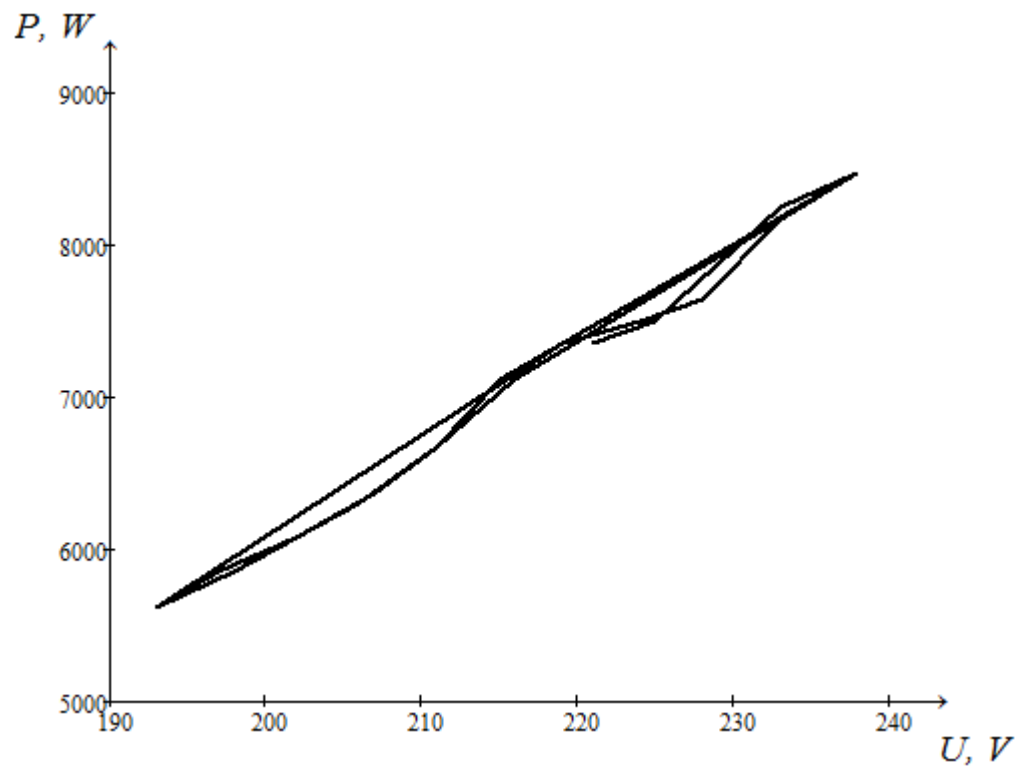


Figure 3.14 - Static characteristics $P(U)$ of active-inductive load

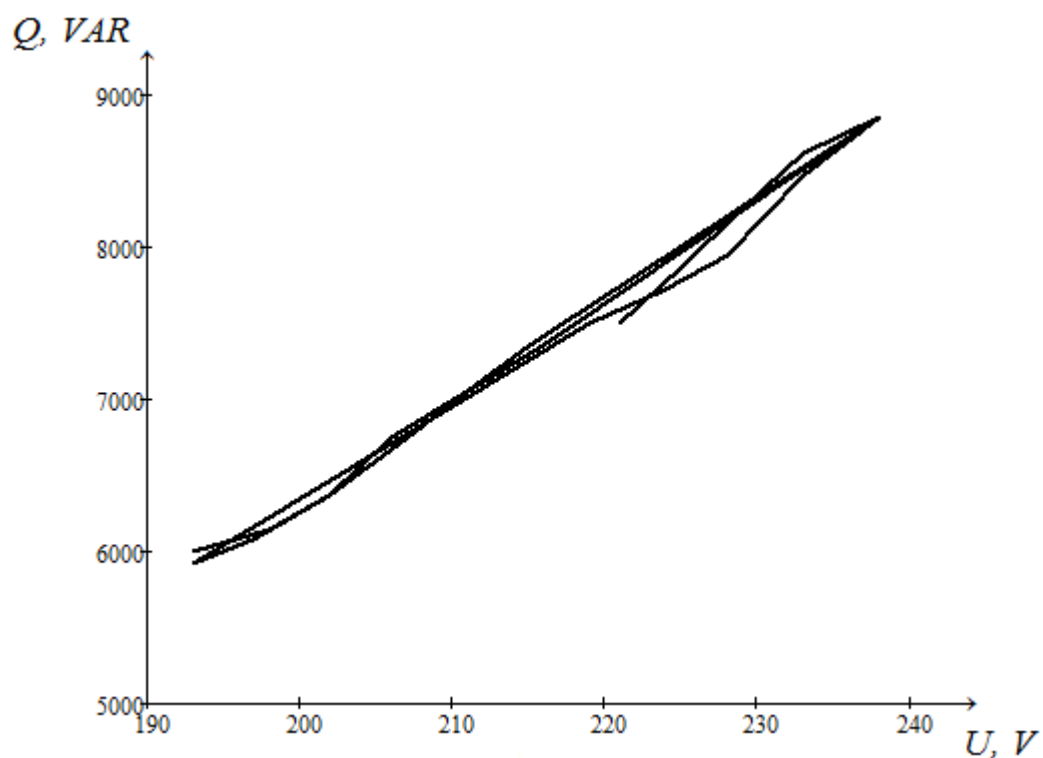


Figure 3.15 - Static characteristics $Q(U)$ of active-inductive load

Table 3.8 - Experiment with active-capacitive load

Voltage, V	Power	
	P, W	Q, VAR
221	4575	-3075
226	4725	-3225
231	4875	-3375
235	5100	-3600
240	5325	-3825
217	4425	-3000
212	4350	-2925
208	4200	-2775
203	3900	-2475
199	3675	-2325
195	3375	-2250
221	4575	-3075
226	4725	-3225
231	4875	-3375
235	5100	-3600
240	5325	-3825
217	4425	-3000
212	4350	-2925
208	4200	-2775
204	3900	-2475

Voltage, V	Power	
199	3675	-2325
194	3375	-2250

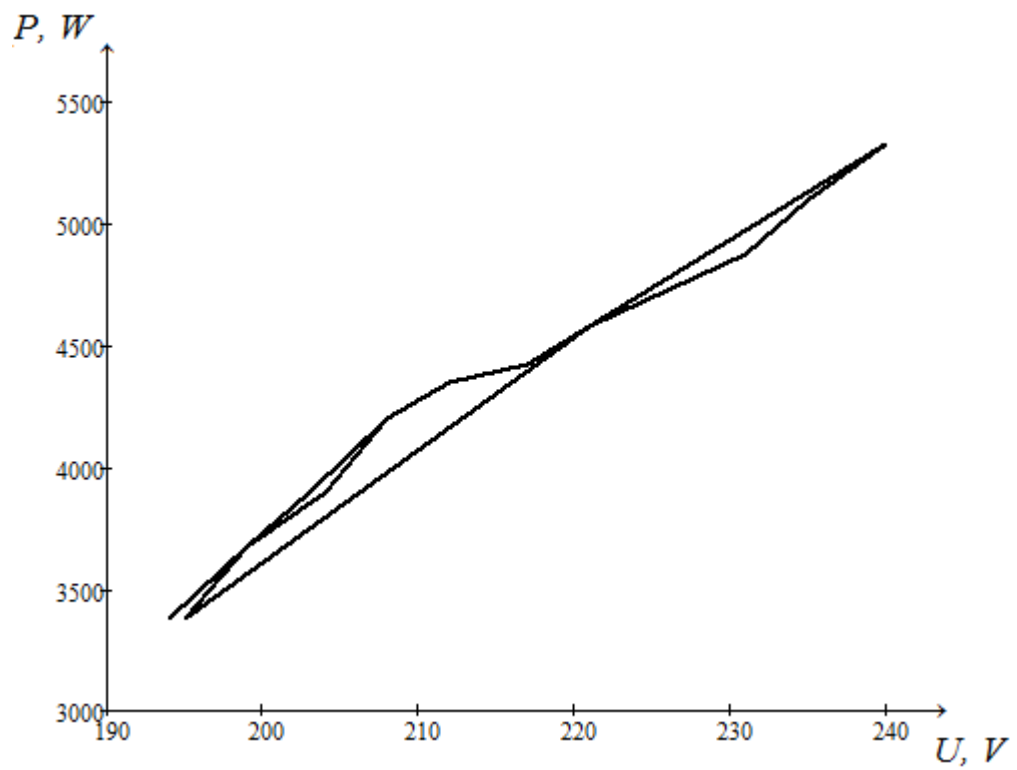


Figure 3.16 - Static characteristics $P(U)$ of active-capacitive load

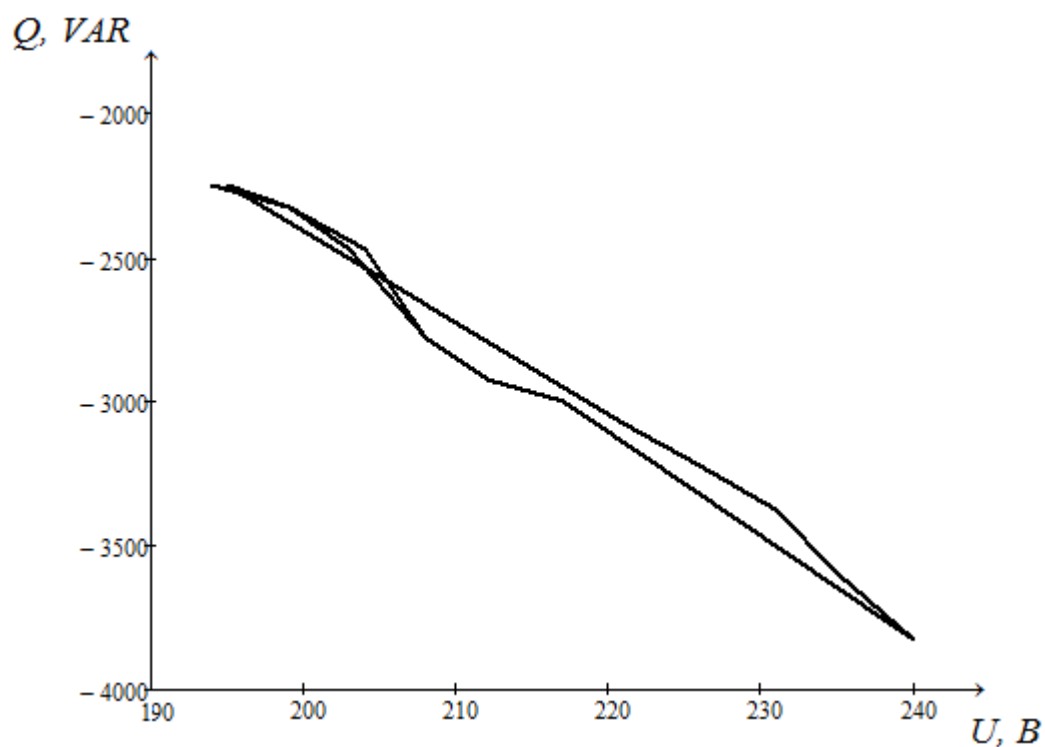


Figure 3.17 - Static characteristics $Q(U)$ of active-capacitive load

Table 3.9 - Experiment with inductive-capacitive load

Voltage, V	Power	
	P, W	Q, VAR
220	1125	7875
225	1200	8100
229	1275	8400
233	1350	8700
238	1425	9000
215	1050	7500
210	975	7275
206	900	7050
201	825	6675
197	750	6225
192	675	6000
219	1125	7875
224	1200	8025
229	1275	8325
233	1350	8775
238	1425	9000
215	1050	7500
211	975	7350
206	900	7050
202	825	6675

Voltage, V	Power	
197	750	6300
193	675	6000

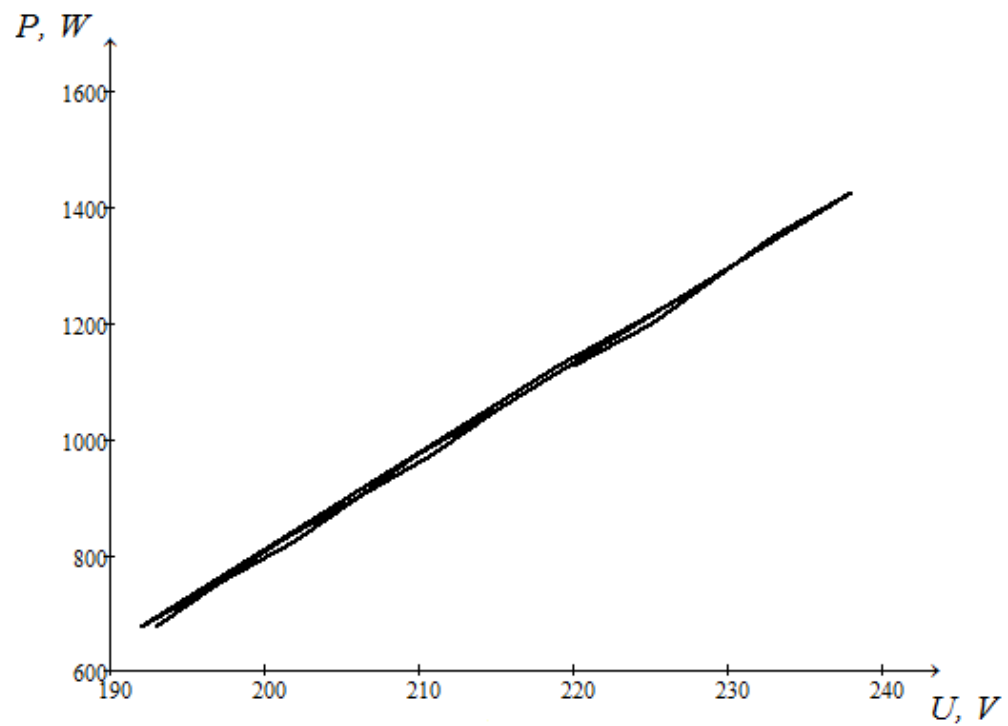


Figure 3.18 - Static characteristics $P(U)$ of inductive-capacitive load

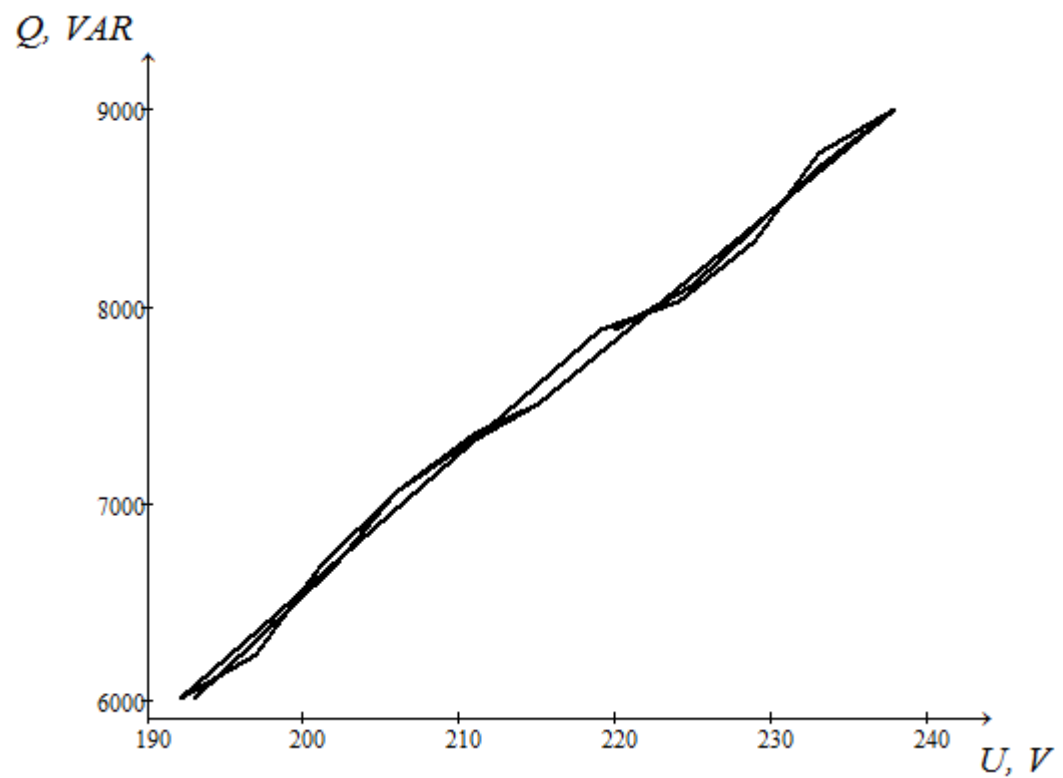


Figure 3.19 - Static characteristics $Q(U)$ of inductive-capacitive load

Table 3.10 - Experiment with synchronous motor

Voltage, V	Power	
	P, W	Q, VAR
220	19050	0
225	19200	0
230	19350	0
234	19650	0
216	18900	0
213	18600	0
208	18300	0
204	18150	0
199	18000	0
194	17700	0
190	17550	0
221	19050	0
225	19650	0
230	20250	0
234	20400	0
217	18900	0
212	18600	0
208	18150	0
203	17850	0
199	17700	0
195	17750	0
190	17400	0

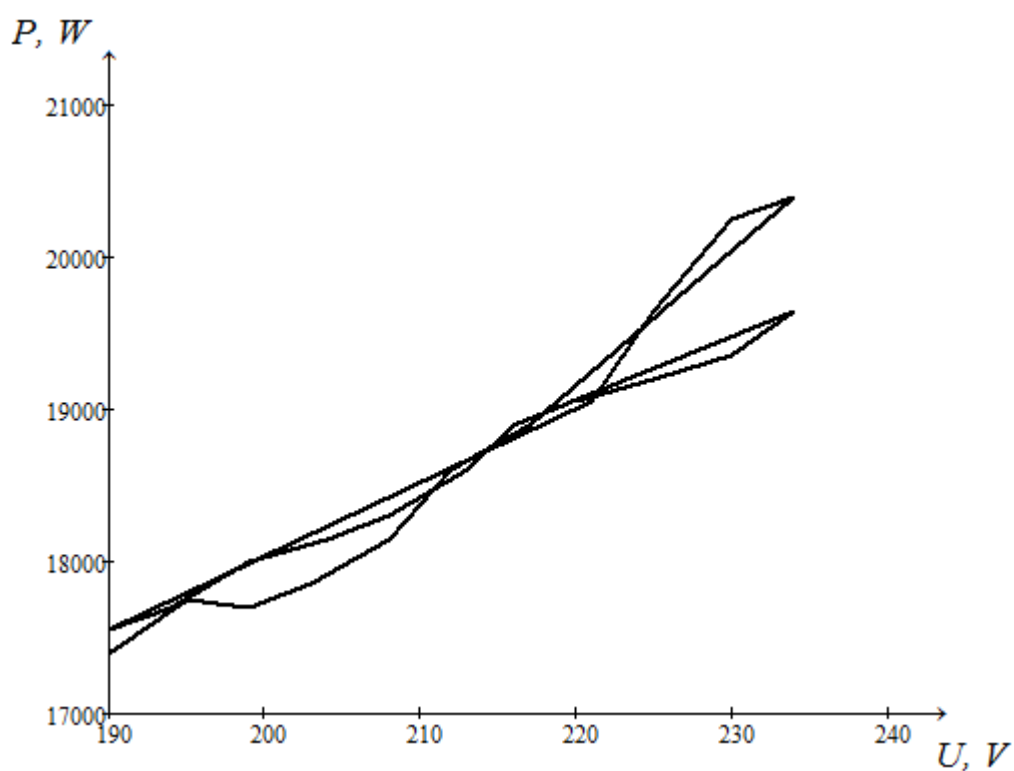


Figure 3.20 - Static characteristics $P(U)$ of synchronous load

Table 3.11 - Experiment with asynchronous motor

Voltage, V	Power	
	P, W	Q, VAR
216	1368	0
221	1344	0
225	1332	0
229	1326	0
231	1320	0
212	1386	0
207	1350	0
203	1326	0
199	1308	0
194	1266	0
189	1236	0
216	1374	0
220	1356	0
225	1338	0
230	1326	0
234	1320	0
212	1386	0
207	1344	0
203	1320	0

Voltage, V	Power	
198	1296	0
194	1260	0
189	1224	0

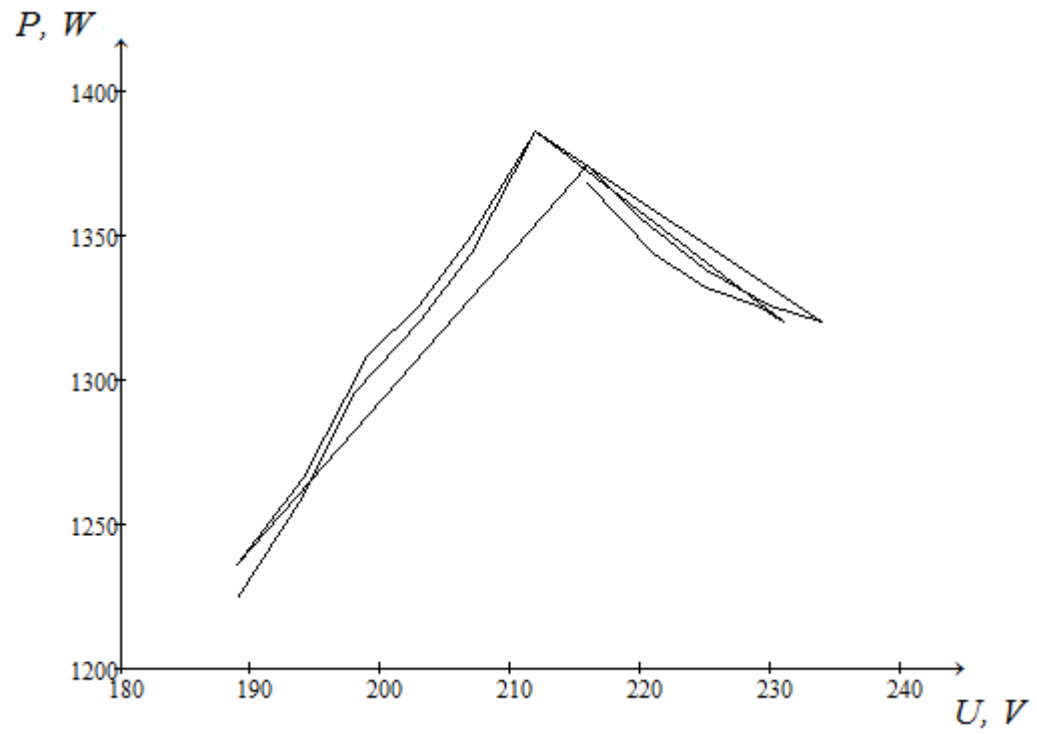


Figure 3.21 - Static characteristics $P(U)$ of asynchronous load