

Министерство образования и науки Российской Федерации

федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования

**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт ЭНИН
Направление подготовки 13.04.02 Электроэнергетика и электротехника
Кафедра ЭСиЭ

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
Оценка точности статических характеристик нагрузки, полученных экспериментальным путём

УДК 621.3.016.001.24

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5AM4Г	Копылов Игорь Евгеньевич		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Панкратов А.В.	К.Т.Н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Фигурко А.А.	К.Э.Н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Дашковский А.Г.	К.Т.Н.		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ЭСиЭ	Прохоров А.В.	К.Т.Н.		

Томск – 2016 г.

ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ПО ООП
13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника»

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)
Универсальные компетенции	
P1	<i>Совершенствовать</i> и развивать свой интеллектуальный и общекультурный уровень, добиваться нравственного и физического совершенствования своей личности, обучению новым методам исследования, к изменению научного и научно-производственного профиля своей профессиональной деятельности.
P2	<i>Свободно пользоваться русским и иностранным языками</i> как средством делового общения, способностью к активной социальной мобильности.
P3	<i>Использовать</i> на практике навыки и умения в организации научно-исследовательских и производственных работ, в управлении коллективом, использовать знания правовых и этических норм при оценке последствий своей профессиональной деятельности.
P4	<i>Использовать</i> представление о методологических основах научного познания и творчества, роли научной информации в развитии науки, готовностью вести работу с привлечением современных информационных технологий, синтезировать и критически резюмировать информацию.
Профессиональные компетенции	
P5	<i>Применять углубленные естественнонаучные, математические, социально-экономические и профессиональные знания</i> в междисциплинарном контексте в инновационной инженерной деятельности в области электроэнергетики и электротехники.
P6	Ставить и <i>решать инновационные задачи</i> инженерного анализа в области электроэнергетики и электротехники с использованием глубоких фундаментальных и специальных знаний, аналитических методов и сложных моделей в условиях неопределенности.
P7	Выполнять <i>инженерные проекты</i> с применением оригинальных методов проектирования для достижения новых результатов, обеспечивающих конкурентные преимущества электроэнергетического и электротехнического производства в условиях жестких экономических и экологических ограничений.
P8	Проводить инновационные <i>инженерные исследования</i> в области электроэнергетики и электротехники, включая критический анализ данных из мировых информационных ресурсов.
P9	Проводить <i>технико-экономическое обоснование</i> проектных решений; выполнять организационно-плановые расчеты по созданию или реорганизации производственных участков, планировать работу персонала и фондов оплаты труда; определять и обеспечивать эффективные режимы технологического процесса.
P10	Проводить <i>монтажные, регулировочные, испытательные, наладочные работы</i> электроэнергетического и электротехнического оборудования.
P11	<i>Осваивать новое</i> электроэнергетическое и электротехническое оборудование; проверять техническое состояние и остаточный ресурс оборудования и организовывать профилактический осмотр и текущий ремонт.
P12	Разрабатывать рабочую <i>проектную и научно-техническую документацию</i> в соответствии со стандартами, техническими условиями и другими нормативными документами; организовывать метрологическое обеспечение электроэнергетического и электротехнического оборудования; составлять <i>оперативную документацию</i> , предусмотренную правилами технической эксплуатации оборудования и организации работы.

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

Институт - ЭНИН

Направление подготовки (специальность) – 13.04.02 Электроэнергетика и электротехника

Кафедра - ЭСиЭ

УТВЕРЖДАЮ:

Зав. кафедрой

(Подпись) _____ (Дата) А.В. Прохоров
(Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ

на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Магистерской диссертации

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

Студенту:

Группа	ФИО
5AM4Г	Копылов Игорь Евгеньевич

Тема работы:

Оценка точности статических характеристик нагрузки, полученных экспериментальным путём	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	

Срок сдачи студентом выполненной работы:

--	--

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе

(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.).

Объект исследования: статические характеристики нагрузки.

Результаты измерений в процессе активного эксперимента на ЗАО «Сибкабель», г. Томск

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>	Аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений науки в направлении расчета статических характеристик нагрузки. Выявление закономерностей формирования погрешности статических характеристик нагрузки, полученных по экспериментальным данным Представление результатов в форме пригодной для практического применения Применение результатов на СХН по активной мощности на основе результатов активного эксперимента Анализ применения результатов исследования Исследование ресурсоэффективности и ресурсосбережения Решение задач социальной ответственности
Перечень графического материала <i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i>	
Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы	
Раздел	Консультант
«Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»	Фигурко Аркадий Альбертович
«Социальная ответственность»	Дашковский Анатолий Григорьевич

Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:
Введение; обзор литературы, общие подходы при определении точности статических характеристик, полученных экспериментальным путем, факторы, влияющие на точность идентификации статической характеристики нагрузки, формульная зависимость точности статической характеристики нагрузки, заключение

Реферат

Выпускная квалификационная работа содержит 101 страницу, 28 рисунков, 42 таблицы, 15 источников, 3 приложения.

Ключевые слова: напряжение, мощность, статическая характеристика нагрузки, регулирующий эффект нагрузки, вычислительный эксперимент, метод наименьших квадратов.

Объектом исследования является статическая характеристика нагрузки

Цель работы – создание методики оценки погрешности расчета статических характеристик нагрузки по напряжению по данным полученным экспериментальным путем.

Метод исследования: моделирование натурного эксперимента посредством вычислительного эксперимента в программе Mathcad.

Полученные результаты: создана методика оценки точности статических характеристик нагрузки по данным полученным экспериментальным путем

Научная новизна: предложен метод численной оценки верхней границы погрешностей расчета статических характеристик нагрузки полученных экспериментальным путем.

Прогнозные предположения о развитии объекта исследования: увеличение параметров определяющих точность расчета СХН, учет особенностей нагрузки.

ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ОБОЗНАЧЕНИЯ, СОКРАЩЕНИЯ, НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ

Статически характеристики нагрузки (СХН) – независимая от времени модель нагрузки, которая представляет информацию о зависимости нагрузки от параметров установившегося режима электрической сети.

Регулирующий эффект нагрузки электроэнергетической системы по напряжению (регулирующий эффект нагрузки по напряжению) – степень изменения нагрузки электроэнергетической системы при изменении напряжения [СТО 17330282.27.010.001-2008, п. 2.1.1257].

Устройства регулирования напряжения – устройства, обеспечивающие поддержание напряжения на шинах электростанций и подстанций на заданном уровне [СТО 17330282.27.010.001-2008, п. 2.1.1703].

Электроприёмник – электрическая машина, аппарат, агрегат или их комплекс, предназначенные для преобразования электрической энергии в иные виды энергии [СТО 17330282.27.010.001-2008, п. 2.1.1860].

Метод наименьших квадратов (МНК) — математический метод, применяемый для решения различных задач, основанный на минимизации суммы квадратов отклонений некоторых функций от искомым переменных.

РПН – регулировка под нагрузкой.

АРНТ – автоматическая регулировка напряжения трансформатора.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	8
1. Обзор и анализ литературы.....	10
1.1. Понятие статической характеристики нагрузки	10
1.2. Способы задания нагрузки при моделировании электроэнергетических систем.....	11
1.3. Экспериментальное определение статических характеристик нагрузки	16
2. Теоретические основы оценки точности статических характеристик нагрузки, полученных экспериментальным путем.....	22
2.1. Общие подходы при определении точности статических характеристик, полученных экспериментальным путем	22
2.2. Факторы, влияющие на точность идентификации статической характеристики нагрузки	28
2.3. Формульная зависимость точности статической характеристики нагрузки	34
2.4. Точность расчета зависимости регулирующего эффекта от напряжения	41
2.5. Влияние диапазона сравнения на величину погрешности.....	43
2.6. Влияние равенства диапазона сравнения диапазону изменения напряжения на погрешность.....	46
3. Практическое определение точности статических характеристик нагрузки	50
3.1. Оценка точности характеристики, полученной по результатам активного эксперимента	50
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.....	56
Социальная ответственность.....	75
Заключение	97
Список публикаций.....	99
Список используемых источников.....	100
Приложение А	102
Приложение Б.....	122
Приложение В.....	123

ВВЕДЕНИЕ

Характеристики нагрузки оказывают большое влияние на режимы работы энергосистем. В особенности влияние проявляется в аварийных режимах, при отклонении напряжения до величин близких к предельно допустимым. Учет характеристик повышает точность расчета установившихся режимов и определение устойчивости энергосистем.

Статические характеристики нагрузки узлов энергосистем отражают зависимость совокупной нагрузки потребителей электроэнергии от напряжения. С течением времени подключаются новые потребители, претерпевает изменения нагрузка из-за ввода в эксплуатацию нового оборудования.

Вследствие описанных процессов требуется периодическое уточнение статических характеристик нагрузки. На сегодняшний день данная проблема стоит как перед российской электроэнергетикой, так и перед электроэнергетикой других государств [1].

Полная информация о составе и параметрах электрооборудования как правило отсутствует. Как следствие, расчет статических характеристик нагрузки основывается на анализе экспериментальных данных. В процессе анализа активно используется в том или ином виде аппроксимация экспериментальных данных методом наименьших квадратов [1 – 7].

В процессе аппроксимации происходит отклонение от результатов, соответствующих фактической статической характеристике из-за особенностей экспериментальных данных, обусловленных флуктуациями величины нагрузки, ее характера, напряжения в узлах энергосистемы.

В качестве объекта исследования выступает процесс расчета статических характеристик нагрузки по напряжению по данным полученным экспериментальным путем. Предметом исследования является оценка точности расчета статической характеристики нагрузки по напряжению.

В диссертации предложена в простой форме методика оценки точности расчета статических характеристик нагрузки по параметрам эксперимента и измеренных данных.

Практическая значимость результатов магистерской диссертации заключается в возможности применения расчетной формулы для оценки верхней границы погрешности расчета статической характеристики нагрузки по экспериментальным данным.

1. ОБЗОР И АНАЛИЗ ЛИТЕРАТУРЫ

1.1. Понятие статической характеристики нагрузки

Статические характеристики нагрузки по напряжению $P_H(U)$, $Q_H(U)$ или по частоте $P_H(f)$, $Q_H(f)$ – зависимости активной и реактивной мощностей нагрузки от напряжения (частоты) при медленных изменениях параметров режима [8].

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

$$\begin{cases} P_H = F_1(U, \omega) \\ Q_H = F_2(U, \omega) \end{cases} \quad (1.1)$$

Расчеты статической устойчивости являются основной областью применения такой модели, поскольку статические характеристики отражают зависимости нагрузки от напряжения и частоты только 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.

Статические характеристики нагрузки обычно они выражаются в относительных единицах, но могут быть представлены и в именованных единицах. При представлении в относительных единицах за базисную принимаются номинальная частота, нормальное напряжение $U_{\text{норм}}$ и соответствующие этим значениям величины активной и реактивной мощности. На разных подстанциях в узлах нагрузки напряжения как правило различаются, поэтому характеристики пересчитывать к номинальному напряжению нецелесообразно [9].

1.2. Способы задания нагрузки при моделировании электроэнергетических систем

При моделировании нагрузка в зависимости от своих параметров может быть представлена в разнообразной форме [8]:

- постоянным по модулю и фазе током;
- постоянной по величине мощностью;
- постоянной проводимостью.

а) Нагрузка задается постоянным по модулю и фазе током

$$\underline{I}_H = I'_H + jI''_H = \text{const} \quad (1.2)$$

Данная форма представления нагрузки используется при моделировании распределительных сетей низкого напряжения $U < 1$ кВ. Также, как правило, задается нагрузка в промышленных, городских и сельских сетях с напряжением менее 35 кВ.

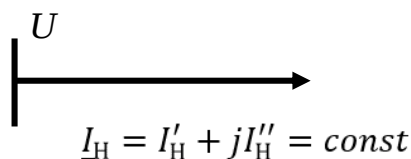


Рисунок 1.1 – Представление нагрузки неизменным током

Как правило предполагается что напряжение источника питания известно. При задании нагрузки в виде неизменного тока, установившийся режим описывается системой линейных алгебраических уравнений.

б) Нагрузка задается постоянной по величине мощностью

$$\underline{S}_H = P_H + jQ_H = \text{const} \quad (1.3)$$

Используется при расчетах установившихся режимов питающих, иногда распределительных сетей высокого напряжения. В питающих сетях $\underline{S}_H = \text{const}$ задается при неизвестном напряжении в узле. Это значит, что в узле задан нелинейный источник тока, зависящий по величине от напряжения в узле [8].

$$\underline{I}_H = \frac{\underline{S}_H^*}{\sqrt{3} \cdot \underline{U}^*} = \frac{P_H - jQ_H}{\sqrt{3} \cdot \underline{U}^*} = var \quad (1.4)$$

Использование формул (1.3) и (1.4) делает уравнения установившегося режима для питающей сети нелинейными. Этот способ задания нагрузки является достаточно точным для электрических систем, полностью обеспеченных устройствами регулирования напряжения.

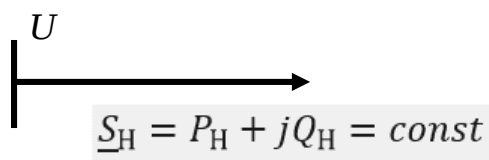


Рисунок 1.2 – Представление нагрузки постоянной мощностью

В таких системах в узлах электрической нагрузки вследствие широкого использования трансформаторов и автотрансформаторов с регулированием напряжения под нагрузкой, а также путем оснащения нерегулируемых трансформаторов на существующих подстанциях линейными регулировочными трансформаторами поддерживается постоянное напряжение.

Также, широко используются средства регулирования напряжения, такие как управляемые батареи конденсаторов, синхронные двигатели. В этих условиях при изменениях режима напряжение на нагрузке практически не меняется, и полная мощность нагрузки остается постоянной.

Поддержание постоянного по модулю напряжения у потребителей не обеспечивается в действительности. По причине этого задание постоянной мощности нагрузки потребителей приводит к ошибкам при расчетах установившихся режимов питающих сетей в сравнении с учетом $P_H(U)$, $Q_H(U)$. Эта ошибка тем больше, чем больше отличаются напряжения потребителей от номинального.

в) Нагрузка задается постоянной проводимостью

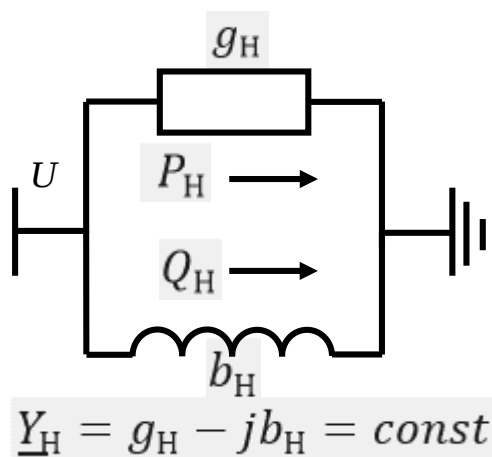


Рисунок 1.3 – Представление нагрузки проводимостью

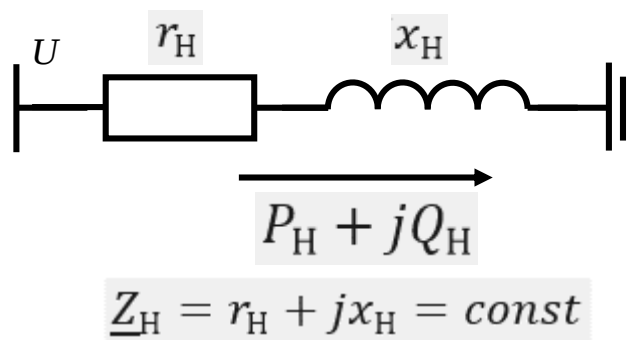


Рисунок 1.4 – Представление нагрузки сопротивлением

Зависимости мощности нагрузок от напряжения могут представляться постоянными проводимостями. Это осуществляется при расчётах режимов электрической сети с большими изменениями напряжения в узлах сети и необходимостью учёта нагрузки нелинейного характера. Значение проводимости выбирается таким образом, чтобы потери мощности в шунте соответствовали нагрузке потребителей.

$$\underline{Y}_H = g_H - jb_H = const \quad (1.5)$$

$$\underline{Z}_H = r_H + jx_H = const \quad (1.6)$$

Также задание постоянной проводимости нагрузки используется при расчете электромеханических переходных процессов.

Широкое распространение получило представление СХН в виде полиномов второй степени [1 – 7]. Большая доля нагрузки в ОЭС обусловлена

потреблением промышленных предприятий, одним из наиболее распространённых электроприемников которых являются асинхронные электродвигатели. Типовая СХН по напряжению асинхронного электродвигателя содержит ненулевые коэффициенты перед всеми членами полинома.

Для описания каждой из нелинейных СХН $P_H(U)$, $Q_H(U)$ нужно как минимум два независимых коэффициента. СХН $P_H(U)$, $Q_H(U)$ представленные формулами (1.7), (1.8) имеют три коэффициента.

$$P_H = P_{H.0} \left(A_0 + A_1 \left(\frac{U}{U_{\text{норм}}} \right) + A_2 \left(\frac{U}{U_{\text{норм}}} \right)^2 \right) \quad (1.7)$$

$$Q_H = Q_{H.0} \left(B_0 + B_1 \left(\frac{U}{U_{\text{норм}}} \right) + B_2 \left(\frac{U}{U_{\text{норм}}} \right)^2 \right) \quad (1.8)$$

В нормальном режиме $U = U_{\text{норм}}$, $P = P_{H.0}$, $Q = Q_{H.0}$. Поэтому должны выполняться условия:

$$A_0 + A_1 + A_2 = 1, \quad B_0 + B_1 + B_2 = 1 \quad (1.9)$$

Статические характеристики нагрузки по напряжению не сводятся в точности к квадратичным полиномам. Зависимости от напряжения значительно более сложные, и их математическое описание при представлении в полиномиальной форме должно содержать большое число коэффициентов. Форму представления СХН приходится упрощать. Главным образом, из-за того, что количественно можно определить только малое число коэффициентов, входящих в формулы, описывающие СХН. Коэффициенты старших степеней не имеют столь же стабильной основы как коэффициенты до второй степени включительно.

Представление в виде полинома второй степени позволяет учесть все типовые виды нагрузки. Коэффициент A_0 отображает составляющую нагрузки, которую можно заменить постоянной активной мощностью. Принимая в (1.7) $A_1 = 0$ и $A_2 = 0$, получим:

$$P^*(U^*) = A_0 = P = const. \quad (1.10)$$

Коэффициент A_1 отображает составляющую нагрузки, которую можно заменить неизменным током. Принимая в (1.7) $A_0 = 0$ и $A_2 = 0$, получим:

$$P^*(U^*) = A_1 U^*, \quad (1.11)$$

или

$$\frac{P^*(U^*)}{U^*} = A_1 = I = const. \quad (1.12)$$

Коэффициент A_2 отображает составляющую нагрузки, которую можно заменить постоянным шунтом. Принимая в (1.7) $A_0 = 0$ и $A_1 = 0$, получим:

$$P^*(U^*) = A_2 (U^*)^2, \quad (1.13)$$

или

$$\frac{P^*(U^*)}{(U^*)^2} = A_2 = Y = const. \quad (1.14)$$

С учетом (1.8), для идентификации СХН, задавшись базисными активной, реактивной мощностью и напряжением, достаточно определение двух коэффициентов уравнения для СХН по активной мощности от напряжения (1.7) и СХН по реактивной мощности от напряжения (1.8). СХН в относительных единицах может быть полностью охарактеризована зависимостью регулирующего эффекта от напряжения, аппроксимированного прямой как для активной мощности (1.15), так и для реактивной (1.16):

$$\frac{dP}{dU} = P_{н.0} \left(A_1 + \frac{2A_2}{U_{баз}^2} \cdot U \right) \quad (1.15)$$

$$\frac{dQ}{dU} = Q_{н.0} \left(B_1 + \frac{2B_2}{U_{баз}^2} \cdot U \right) \quad (1.16)$$

Таким образом, определение СХН в относительных единицах может быть осуществлено посредством расчета зависимости регулирующего эффекта от напряжения.

1.3. Экспериментальное определение статических характеристик нагрузки

Методы экспериментального определения характеристик нагрузки делятся на два класса: метод активного эксперимента и метод пассивного эксперимента. Активный эксперимент подразумевает под собой принудительное изменение напряжения в узле энергосистемы. Это может быть использование РПН, форсировка возбуждения на генераторах, управление мощностью устройств компенсации реактивной мощности.

Важнейшим требованием к объекту измерений является то, что питание измеряемой нагрузки должно быть односторонним [9] .

1.3.1. Активный эксперимент

Активный эксперимент используется для определения статических характеристик нагрузки 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.

Изменение напряжения в достаточно узком диапазоне (до $\pm 10\%$) практически не опасно для потребителей и, если это технически выполнимо, может быть допущено для любого узла нагрузки. Снижение напряжения в более широких пределах, до $(0,8 - 0,7) U_{\text{ном}}$ 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.

Можно осуществлять изменение напряжения в узле нагрузки двумя способами для снятия статических характеристик по напряжению:

а) переключением под нагрузкой ответвлений обмоток понижающих трансформаторов в нормальной схеме энергосистемы. На стороне низшего

напряжения (6—10 кВ) трансформаторов напряжение изменяется в диапазоне 15—20%;

б) в испытуемом узле нагрузки, выделенном от остальной части энергосистемы регулированием возбуждения выделенных генераторов. При этом напряжение может изменяться в широких пределах как в сторону повышения, так и понижения. Обеспечивается резерв по располагаемой активной и реактивной мощности в выделенном районе (обычно 20—30%). При испытании частота поддерживается неизменной.

У нагрузок, питающихся через снабженные устройствами автоматического регулирования напряжения (АРНТ) трансформаторы, почти неизменным поддерживается напряжение на шинах электроприемников, пока не исчерпан диапазон регулирования АРНТ. Наличие АРНТ делает целесообразность выполнения замеров дважды после каждого изменения питающего напряжения:

а) сразу после изменения напряжения, до срабатывания автоматики регулировки напряжения трансформатора. При этом определяются статические характеристики нагрузки и ее регулирующие эффекты по напряжению без учета действия АРНТ;

б) через промежуток времени, больший выдержки времени АРНТ. При этом выявляются характеристики и регулирующие эффекты нагрузки с учетом действия АРНТ.

Опыты по определению статических характеристик по напряжению и частоте проводятся в периоды постоянной величины нагрузок, к примеру, в утренний и вечерний максимумы и в ночной минимум нагрузок.

Поддержание напряжения на шинах потребителей в пределах регулировочного диапазона, достаточного для компенсации отклонений напряжения позволяет считать постоянными активную и реактивную мощности нагрузки. Если регулировочный диапазон исчерпан, при дальнейшем отклонении напряжения нагрузка изменяется по естественным

СХН. Такой процесс изменения, например, реактивной мощности нагрузки можно описать при помощи СХН следующего вида

$$Q_{\text{нг}} = \begin{cases} Q_{\text{нг.н}} \left(B_0 + B_1 \left(\frac{U - \Delta U_+}{U_{\text{норм}}} \right) + B_2 \left(\frac{U - \Delta U_+}{U_{\text{норм}}} \right)^2 \right), & \text{если } U > (U_{\text{нг.н}} + \Delta U_+) \\ Q_{\text{нг.н}}, & \text{если } (U_{\text{нг.н}} - \Delta U_-) \leq U \leq (U_{\text{нг.н}} + \Delta U_+) \\ Q_{\text{нг.н}} \left(B_0 + B_1 \left(\frac{U + \Delta U_-}{U_{\text{норм}}} \right) + B_2 \left(\frac{U + \Delta U_-}{U_{\text{норм}}} \right)^2 \right), & \text{если } U < (U_{\text{нг.н}} - \Delta U_-) \end{cases} \quad (1.17)$$

где ΔU_- – компенсируемое АРНТ и/или действиями оперативного персонала отклонение в сторону уменьшения напряжения от номинального значения;

ΔU_+ – компенсируемое АРНТ и/или действиями оперативного персонала отклонение в сторону увеличения напряжения от номинального значения.

Допустимо использовать естественные характеристики если автоматическое и оперативное регулирование напряжения распространяется не более чем на 20 – 30% потребителей [12].

1.3.2. Пассивный эксперимент

Суть пассивного эксперимента состоит в использовании всегда имеющихся в энергосистеме вариаций частоты и напряжения. Зарегистрировав эти вариации и соответствующую реакцию на них активной и реактивной нагрузки, в результате статистической обработки можно определить линии регрессии (ЛР) P_H на U и Q_H на U , характеризующие усредненные зависимости $P_H(U)$ и $Q_H(U)$.

При пассивном эксперименте в узле измеряемой нагрузки должны быть достаточно большие вариации напряжения, обусловленные другими нагрузками.

Если, например, выбрать объект измерений, как показано на рисунке 1.5, а, то сразу будет охвачена большая нагрузка, но вариации внешних нагрузок могут оказаться незначительными по сравнению с вариациями ΔP_H

измеряемой нагрузки, поэтому погрешности измерения СХН могут быть велики (как на рисунке 1.5, б).

Другой крайний случай для того же участка сети представлен на рисунке 1.5, а. Здесь значения ΔP_H каждой из измеряемых нагрузок значительно меньше, соответственно значительно меньше и погрешности, но объем работы больше, так как нужно обработать данные не одного пассивного эксперимента, а пяти. Ориентировочную оценку ожидаемых погрешностей можно получить, если выполнить эквивалентирование соответствующей части схемы, разнеся все ее нагрузки по правилу моментов в генерирующие узлы и в узел измеряемой нагрузки. Если отношение суммарной активной мощности всех внешних нагрузок (т.е. всех нагрузок, кроме измеряемой), приведенных к рассматриваемому узлу, превышает активную мощность измеряемой нагрузки более чем в 5 раз, то ожидаемые погрешности невелики. Если указанное соотношение меньше 2, то эксперимент почти наверняка не даст удовлетворительных результатов [13].

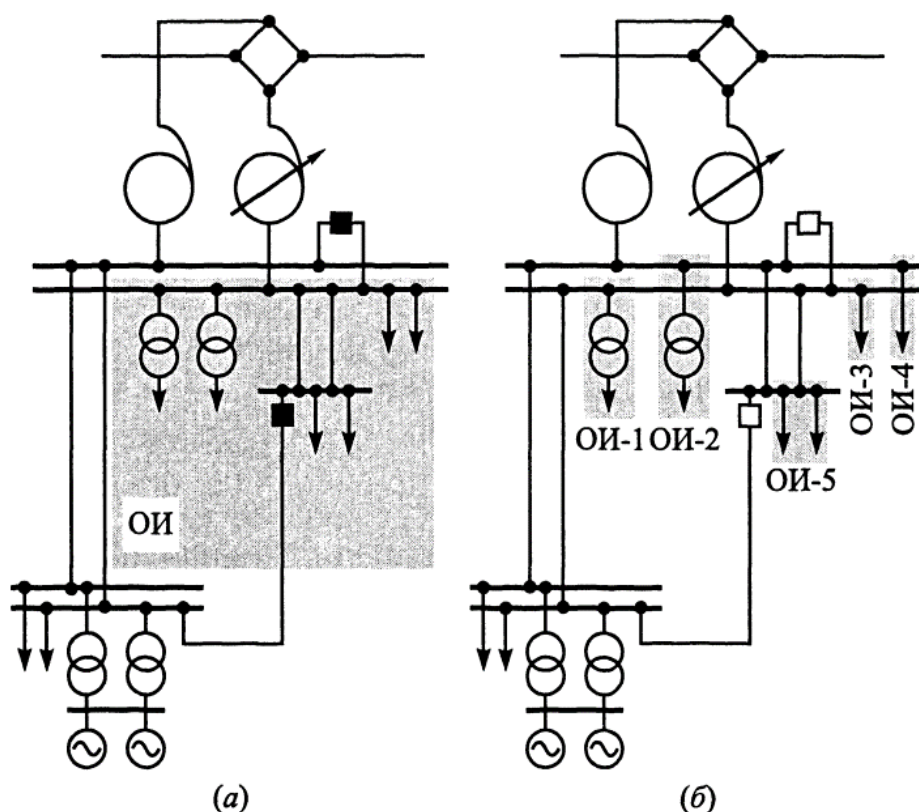


Рисунок 1.5 – Выбор объекта измерения (ОИ) в пассивном эксперименте.

а.) погрешности максимальны; б.) погрешности минимальны

Зависимость $P_H(U)$ представлена линией А-В на рисунке 1.6. Если количество электроприемников неизменно, а напряжение в сети изменяется, то точки $P_H(U)$ будут располагаться подобно тому, как это изображено черными кружками на рисунке 1.6, а. Статистическая обработка таких данных приведет к получению линии регрессии, совпадающей с А-В, даст искомую СХН по напряжению.

Если в каком-нибудь режиме (k_1 на рисунке 1.6, а), при неизменных условиях электроснабжения количество электроприемников увеличится или возрастет потребляемая ими мощность, то вместо точки k_1 будет получена точка k_2 . Напряжение в точке k_2 ниже, чем в k_1 , так как увеличиваются потери напряжения в питающей сети.

Если бы условия электроснабжения оставались строго неизменными, а в измеряемой нагрузке менялось число или мощность электроприемников, то регистрируемые замеры выстроились бы в линию, параллельную $k_1 - k_2$ и обозначенную на рисунке 1.6, б как С-Д. Она наклонена к вертикальной оси тем сильнее, чем больше сопротивление питающей сети.

На рисунке 1.6 представлена модель пассивного эксперимента при (а) изменяются только внешние условия электроснабжения измеряемой нагрузки, ее мощность изменяется при отклонениях напряжения соответственно своей СХН, (б) условия электроснабжения неизменны, изменяется число и мощность электроприемников.

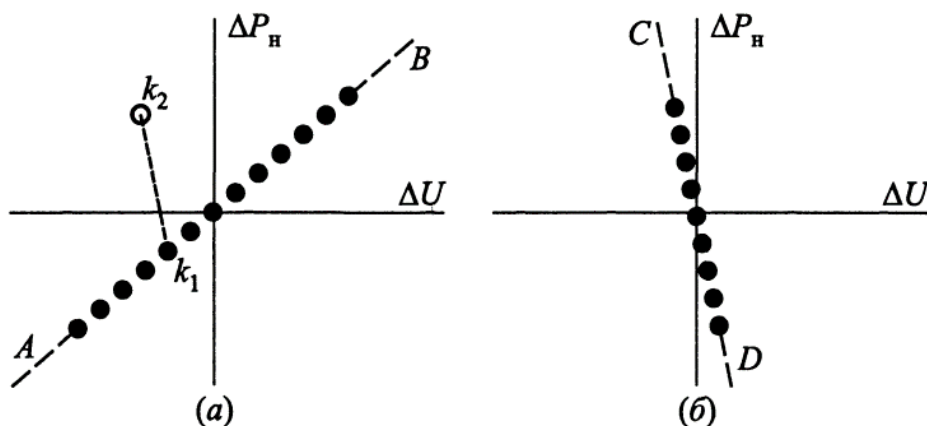


Рисунок 1.6 – Пассивный эксперимент при изменении:
внешних условий электроснабжения (а), параметров электроприемников (б)

Пассивный эксперимент для определения СХН возможен только в периоды стационарности нагрузки (к примеру суточный максимум или минимум). В это время флуктуации нагрузки в разных узлах не коррелированы. Если изменения условий электроснабжения и изменения параметров электроприемников в измеряемой нагрузке не коррелированы, то при совместном действии обоих этих факторов (рисунок 1.7) данные замеров в координатах $P_H(U)$ образуют некоторое пятно. Если эти изменения подчиняются нормальному закону распределения, то пятно образует эллипс. В первом из этих случаев определение ЛР дает результат, близкий к линии А-В, соответствующей СХН измеряемой нагрузки, но во втором случае результат ЛР никак не отвечает СХН. Изменениям нагрузки при различных, но каждый раз неизменных условиях электроснабжения соответствуют параллельные линии C-D, C'-D', C''-D''.

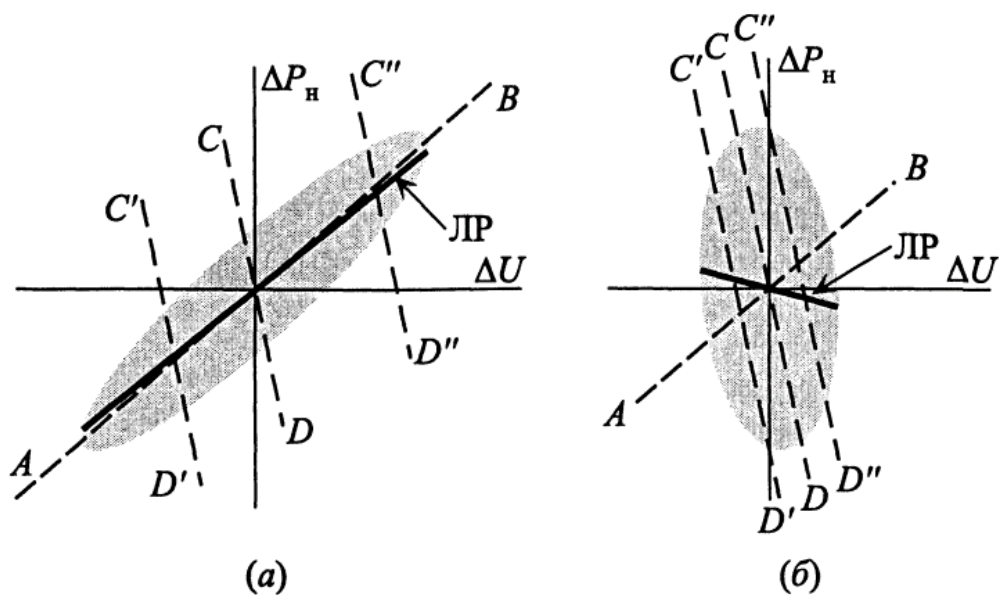


Рисунок 1.7 – Пассивный эксперимент: (а) сильно изменяются условия электроснабжения, слабо изменяется нагрузка; (б) слабо изменяются условия электроснабжения, сильно изменяется нагрузка.

При достаточно большом изменении напряжения, посредством регрессионного анализа СХН может быть представлена в виде параболы. Проблема получения экспериментальных данных в виде пятна остается актуальной и обуславливает появление неточности при расчете СХН.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОЦЕНКИ ТОЧНОСТИ СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК НАГРУЗКИ, ПОЛУЧЕННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМ ПУТЕМ

В результате расчета СХН по данным, полученных экспериментальным данным, расчетная характеристика не может точно отражать фактическую СХН, без каких либо погрешностей.

Отличия в расчетной и фактической характеристиках обусловлены не только тем, что фактическая характеристика не может быть в точности описана параболой. Вследствие наличия нерегулярных колебаний мощности в энергосистеме полученные результаты измерения напряжения и потребляемой в узле нагрузки мощности не лежат в точности на кривой фактической СХН. Поверх этого накладываются погрешности тракта измерения – передача – представление измерений.

С течением времени происходит изменение потребляемой мощности, вызванное не нерегулярными колебаниями, а утренними, вечерними максимумами потребления электроэнергии, а также особенностями технологических процессов промышленных потребителей электроэнергии. С целью учета этого процесса, производится определение тренда изменения потребляемой мощности. При этом изменяется базовая потребляемая активная мощность $P_{н.0}$, не зависящая от уровня напряжения на нагрузке. При этом пересчет величины $P_{н.0}$ несет в свою очередь дополнительные погрешности.

2.1. Общие подходы при определении точности статических характеристик, полученных экспериментальным путем

В основе определения точности лежит сравнение расчетной статической характеристики и фактической. Трудность оценки точности СХН, полученных экспериментальным путем, состоит в отсутствии эталонной характеристики, с которой можно было бы сравнивать полученные

результаты, так как фактически невозможно определить точную статическую характеристику узла ЭЭС, содержащего разнотипную нагрузку. Кроме того, сама характеристика нагрузки не является постоянной, изменяясь с течением времени.

В рамках данной работы было принято решение использовать для оценки точности СХН не физические, а вычислительные эксперименты. В процессе вычислительного эксперимента на начальном этапе задается исходная, эталонная СХН полиномом второй степени, с которой потом можно сравнивать полученные результаты.

2.1.1. Эталонная статическая характеристика нагрузки

В ОЭС принято использовать СХН в форме полинома второй степени. Как показано в главе 1, данный вид СХН позволяет представить все типы нагрузок, совокупность которых создает СХН узла ЭС. Поэтому, в качестве эталонной СХН принят полином второй степени.

При отсутствии достоверной информации об СХН узла ЭС, используются обобщенные типовые коэффициенты, различающиеся в зависимости от класса напряжения и характера моделируемой нагрузки: активная или реактивная. Как в отечественной литературе, так и в отчетах о НИР описывающие комплексную нагрузку коэффициенты принимают сильно отличающиеся величины [10]. В таблице 2.1 представлены обобщенные типовые коэффициенты для активной (A_i) и реактивной (B_i) нагрузки.

Таблица 2.1 – Обобщенные типовые значения коэффициентов СХН

Вид характеристики	A_0	A_1	A_2	B_0	B_1	B_2
Типовая на ступени 35 кВ и ниже	0,83	-0,3	0,47	4,9	-10,1	6,2
Типовая на ступени 110-220 кВ	0,83	-0,3	0,47	3,7	-7,0	4,3
Постоянная мощность	1	0	0	1	0	0
Постоянный задающий ток	0	1	0	0	1	0
Постоянная проводимость	0	0	1	0	0	1

Обобщенные типовые коэффициенты СХН имеют различные значения для реактивной мощности, в зависимости от класса напряжения, и одинаковые для активной. В качестве эталонной принята СХН по активной мощности.

$$P_{\text{эт}} = P_{\text{н.0}} \left(A'_0 + A'_1 \left(\frac{U}{U_{\text{норм}}} \right) + A'_2 \left(\frac{U}{U_{\text{норм}}} \right)^2 \right) \quad (2.1)$$

где A'_0, A'_1, A'_2 – известные коэффициенты, представляющие эталонную СХН.

В соответствии с таблицей 2.1, в качестве коэффициентов эталонной СХН приняты типовые обобщенные коэффициенты, а именно $A'_0 = 0,83, A'_1 = -0,3, A'_2 = 0,47$.

В ходе моделирования натурального эксперимента вычислительным был принят ряд допущений:

1. Эталонная СХН заменяет собой реальную нагрузку. В процессе эксперимента происходит изменение мощности нагрузки по двум причинам. Нагрузка реагирует на изменение напряжения питания. Также имеют место случайные колебания мощности, вызванные технологическим процессом работы оборудования, изменениями условий его работы, включением-отключением отдельных электроприемников и т.п. Спрогнозировать такие случайные колебания невозможно, и для их описания используют вероятностные характеристики.

2. Принято, что случайные колебания мощности и случайные погрешности измерений в совокупности образуют случайную величину, которую можно описать нормальным законом распределения.

Погрешность, с которой производятся измерения мощности имеет две составляющие: систематическую и случайную. Систематическая погрешность измерений не оказывает большого влияния на точность получаемой статической характеристик нагрузки, так как полученные результаты впоследствии переводят в относительные единицы.

3. Базисная потребляемая активная мощность в ходе эксперимента не изменялась.

Пассивный эксперимент позволяет использовать большое количество измеряемых данных напряжения и потребляемой мощности. За счет этого может быть получен большой массив данных. Эквивалентирование скоплений точек одной точкой позволяет получить случайное распределение на оси напряжения, без явных скоплений.

Предварительный эксперимент показал, что в результате случайного распределения напряжения по оси напряжения погрешность идентификации СХН отличается от равномерного распределения по оси напряжения слабо.

Вместе с тем, в среде Mathcad задание напряжения массивом случайных чисел на интервале, из-за многократности повторения эксперимента и, достижения параметром N , количества точек данных, большого значения, сопряжено с большим увеличением трудоемкости процесса получения результатов.

4. Принято решение об оптимизации процесса вычислительного эксперимента использованием равномерного распределения данных напряжения.

5. Напряжение в процессе эксперимента отклонялось на максимальные одинаковые величины как в большую, так и в меньшую сторону относительно нормального.

6. Случайные изменения напряжения в узле нагрузки и случайные изменения базисной мощности приняты некоррелированными.

2.1.2. Вычислительный эксперимент

Трудность оценки точности статических характеристик нагрузки заключается в отсутствии эталона, с которым полученный в эксперименте результат можно было бы сравнить. Учитывая данное обстоятельство, принято решение для оценки точности определения статической характеристики нагрузки использовать не натурный, а вычислительный эксперимент.

Вычислительный эксперимент полностью не может собой заменить натурный эксперимент. Наиболее существенные стороны натурального моделируются при осуществлении вычислительного эксперимента.

Так как в основе моделирования измеряемых данных лежат случайные величины, то для получения достоверных, повторяемых результатов необходимо проведение серии экспериментов. Необходимое количество экспериментов выбрано по следующим критериям: количество экспериментов должно быть достаточным, чтоб заполнялся весь возможный диапазон изменения результатов эксперимента, но при этом не должно быть избыточным. Проведение недостаточного количества экспериментов не позволяет достичь повторяемости результатов. Избыточность не вносит отрицательного влияния на качество полученных результатов, но увеличивает ресурсоемкость процесса по вычислительной мощности и, как следствие, время получения результатов.

В качестве необходимого и достаточного числа экспериментов, принято 1000 экспериментов с одинаковыми параметрами эксперимента.

Задание напряжения производилось по следующей формуле:

$$U_{(i)} = 1 - \frac{\Delta U_{\%}}{2 \cdot 100\%} + i \frac{\Delta U_{\%}}{N \cdot 100\%} \quad (2.2)$$

где N – количество точек данных, используемых для идентификации СХН;

$\Delta U_{\%}$ – диапазон изменения напряжения в процессе эксперимента в процентах от базисного напряжения.

Напряжение и активная мощность задается в относительных единицах. Таким образом, выражение (2.1) может быть представлено в следующем виде:

$$P_{ORIG}(U) = A'_0 + A'_1 U + A'_2 U^2 \quad (2.3)$$

Функциональная зависимость $P_{ORIG}(U)$ представляет собой СХН по активной мощности. Величина мощности, согласно СХН, представляет собой потребляемую активную мощность при постоянной нагрузке.

Постоянность нагрузки может быть выражена постоянной величиной механического момента на валах электродвигателей, одинаковый состав осветительной нагрузки и прочих потребителей электроэнергии.

В действительности постоянность нагрузки не обеспечивается. Отличие фактической нагрузки от некой усредненной, может быть обозначена отклонениями, включена в состав погрешностей.

2.1.3. Моделирование погрешности

Влияние случайной погрешности измерений и случайных колебаний мощности нагрузки на точность получаемой СХН обобщены с помощью учета случайной величины, распределенной по нормальному закону со среднеквадратическим отклонением $\sigma_{P\%}$.

В каждом эксперименте генерировался массив случайных величин *error*, распределенных по нормальному закону распределения. По формуле (2.4) была задана потребляемая активная мощность.

$$P_i(U) = (A'_0 + A'_1 U_i + A'_2 U_i^2) \cdot error_i(\sigma_{P\%}) \quad (2.4)$$

2.1.4. Сравнение экспериментальной и эталонной характеристик

В результате расчета СХН по активной мощности посредством МНК, получается СХН с коэффициентами, отличающимися от эталонных. Для определения погрешности расчета требуется сравнить эталонную и расчетную СХН, которая представляется в виде полинома второй степени посредством аппроксимации:

$$P_{TEST}(U) = A_0 + A_1 U + A_2 U^2 \quad (2.5)$$

Сравнивать можно как коэффициенты СХН, так и сами характеристики. Непосредственную ценность при анализе точности определения СХН имеет та величина, на которую расчетная активная потребляемая мощность отличается от фактической.

Использование СХН имеет место при анализе устойчивости. При этом погрешность прогноза потребляемой мощности приводит к неточности определения перетоков мощности по слабым связям и, как следствие, к неточности определения коэффициентов запаса по активной мощности. Численное значение погрешности СХН достигает максимальных величин при минимальном $0,8 \cdot U_{\text{БАЗ}}$, максимальном $1,2 \cdot U_{\text{БАЗ}}$, а также напряжении, рассчитываемом в относительных единицах по следующей формуле:

$$U = 0,5 \cdot \frac{A_1 - A'_1}{A_2 - A'_2} \quad (2.6)$$

Коэффициенты A_1, A_2 являются коэффициентами расчетной СХН, A'_1, A'_2 – коэффициенты эталонной СХН.

2.2. Факторы, влияющие на точность идентификации статической характеристики нагрузки

При осуществлении расчета СХН по экспериментальным данным может быть достигнут разный уровень точности.

Одним из наиболее распространенных методов расчета СХН по массивам полученных результатов является аппроксимация по методу наименьших квадратов (МНК). Для определения зависимости точности от особенностей эксперимента необходимо выявление факторов эксперимента, определяющих вид полученных результатов и, как следствие, точность расчета СХН.

Выявленные факторы необходимо отобразить величинами, изменяя значения которых можно пронаблюдать за влиянием фактора на точность расчета СХН.

2.2.1. Выбор основных факторов

Основополагающим фактором, влияющим на точность расчета СХН является величина нерегулярных колебаний мощности в процессе эксперимента. При отсутствии нерегулярных колебаний мощности СХН по

активной мощности повторяет эталонную СХН и погрешность определения СХН стремится к нулю.

Присутствие нерегулярных колебаний приводит к появлению неточности расчета СХН из-за невозможности учета в базисной мощности быстрых изменений величины нагрузки.

Увеличение количества точек данных позволяет увеличить статистическую достоверность за счет того, что величина нерегулярных колебаний мощности может быть описана нормальным законом распределения [14].

Сравнение расчетной СХН с эталонной с целью определения точности имеет смысл на всем возможном диапазоне изменения напряжения. За этот диапазон принято напряжение в относительных единицах от 0,8 до 1,2 базисного. Верхняя граница определяется по максимальному длительно допустимому напряжению, которое различно при переводе в относительные единицы в зависимости от класса напряжения. В среднем оно составляет приблизительно 1,2 от номинального. Нижняя граница обусловлена уровнем напряжения, снижение ниже которого сопряжено с опасностью возникновения лавина напряжения.

В качестве влияющих на точность расчета СХН приняты следующие факторы:

- величина нерегулярных колебаний, характеризуемая среднеквадратическим отклонением;
- количество точек данных;
- диапазон изменения напряжения в процессе эксперимента.

2.2.2. Выбор расчетных значений основных факторов

На этапе планирования эксперимента предположения об виде полученных результатов отсутствовали. Для анализа результатов требуется достаточность данных по всем варьируемым величинам, характеризующим влияние на точность расчета СХН.

Среднеквадратическое отклонение мощности соизмеримое с величиной мощности не позволяет получить результаты пригодные для применения. Поэтому за максимальный диапазон принято 20%. В качестве минимального значения принят 1%.

Количество точек экспериментальных данных может сильно отличаться. Построение СХН по нескольким точкам возможно, но предполагаемая точность будет мала. В то же время увеличение точек данных при их избыточности не приведет к росту точности.

Максимальное количество точек принято 100 000, минимальное количество 10.

Максимальный диапазон изменения напряжения принят 20%, от 0,9 до 1,1 базисного. Минимальный диапазон изменения напряжения может быть принят исходя из невозможности получения результатов, достаточно точных для практического применения, при малом диапазоне, стремящемся к нулю. В качестве минимального принят диапазон 1%.

2.2.3. Расчет значений погрешности в зависимости от основных факторов

Решение переопределенной системы уравнений (10) методом МНК дает решение в виде коэффициентов A_0, A_1, A_2 .

$$\begin{pmatrix} 1 & U_{(1)} & U_{(1)}^2 \\ 1 & U_{(2)} & U_{(2)}^2 \\ \dots & \dots & \dots \\ 1 & U_{(N)} & U_{(N)}^2 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} A_0 \\ A_1 \\ A_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} P_{(1)} \\ P_{(2)} \\ \dots \\ P_{(N)} \end{pmatrix} \quad (2.7)$$

По коэффициентам A_0, A_1, A_2 строится экспериментальная СХН. Она сравнивается с эталонной посредством вычитания. Производится сравнение $\Delta P(U)$ при трех напряжениях, описанных в пункте 2.1.5. В качестве расчетной погрешности СХН принимается наибольшее значение.

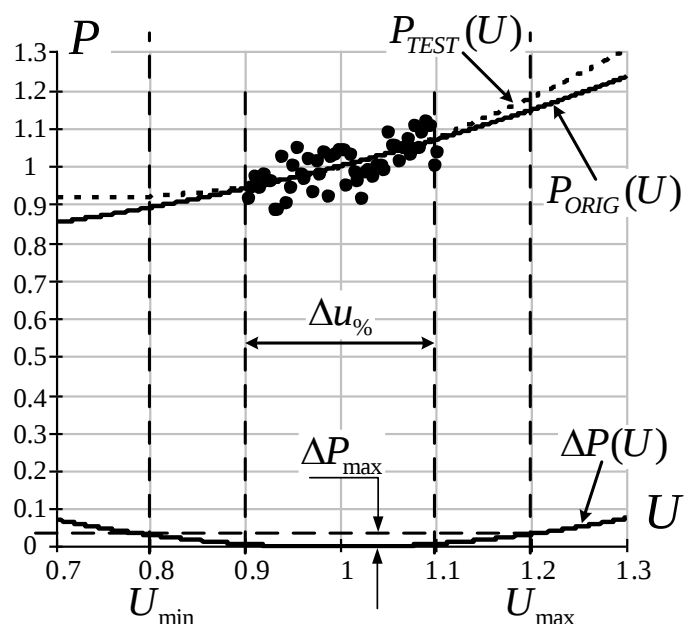


Рисунок 2.1 – Сравнение эталонной и экспериментальной СХН

2.2.4. Обобщение результатов, полученных в ходе расчета серии вычислительных экспериментов с использованием случайных величин

Расчет серии из 1000 экспериментов дает массив из 1000 значений погрешностей. Расположение расчетных мощностей относительно эталонной СХН случайно, и обуславливает величину расчетной погрешности СХН, которая, как следствие, также случайна.

Из 1000 значений расчетных погрешностей ΔP_{max} максимальные значения могут принимать значения на много больше чем основная часть полученных результатов и имеют малую вероятность появлению. Учет всех результатов дает неоправданно пессимистичный результат. Поэтому часть результатов требуется отбраковать.

Для этого использован квантиль вероятности 0,95. 5% результатов из каждой серии экспериментов были отбракованы. Так как при каждой группе факторов производится 1000 экспериментов, то отбраковывается 50 результатов с наибольшей погрешностью. За расчетную погрешность был принят максимальный результат Δ_{max} от оставшихся.

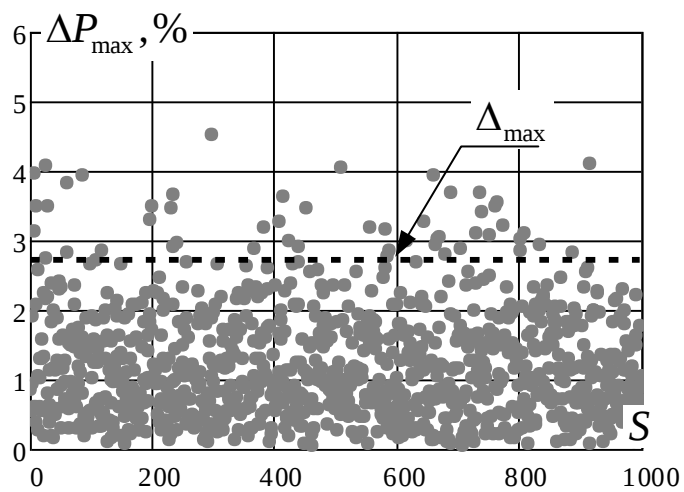


Рисунок 2.2 – Погрешности СХН при одинаковых факторах

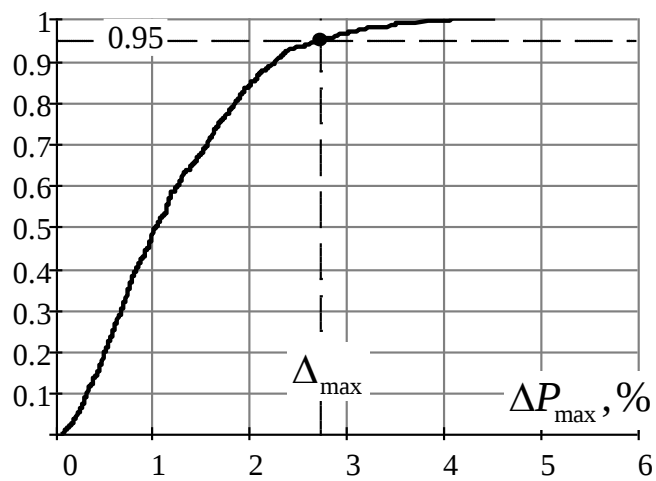


Рисунок 2.3 – Функция распределения величин вероятности

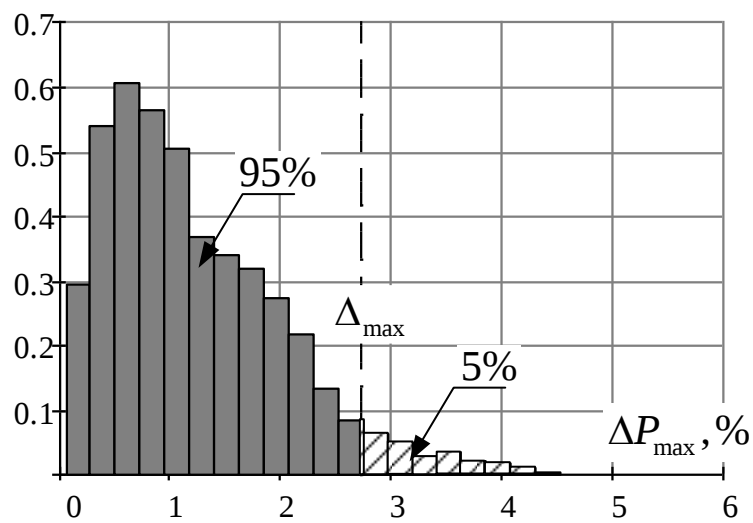


Рисунок 2.4 – Гистограмма погрешности СХН

В таблицах 2.2 – 2.7 представлены Δ_{max} для различных значений факторов.

Таблица 2.2 – Расчетные величины погрешности СХН при $\sigma_{P\%} = 1\%$

$\Delta U \backslash N$	10	33	100	333	1000	3333	10000	33333	100000
20	0,07006	0,04551	0,02797	0,0154	0,0084	0,00531	0,0028	0,0015	0,0009
15	0,12614	0,08112	0,04913	0,0278	0,0160	0,00912	0,0048	0,0029	0,0016
10	0,28206	0,21882	0,11184	0,0630	0,0356	0,02084	0,0116	0,0063	0,0040
5	1,16566	0,75675	0,43648	0,2670	0,1452	0,07889	0,0468	0,0264	0,0149
2	3,49895	2,14135	1,24956	0,7543	0,4252	0,22606	0,1255	0,0735	0,0434
1	30,6252	21,7524	12,0514	6,5951	3,5778	2,03344	1,1769	0,6117	0,3664

Таблица 2.3 – Расчетные величины погрешности СХН при $\sigma_{P\%} = 2\%$

$\Delta U \backslash N$	10	33	100	333	1000	3333	10000	33333	100000
20	0,1395	0,0903	0,05431	0,02984	0,01778	0,00928	0,0056	0,0030	0,0019
15	0,2672	0,1673	0,09946	0,05457	0,03195	0,01726	0,0104	0,0056	0,0032
10	0,5920	0,3913	0,21587	0,12665	0,07582	0,04149	0,0229	0,0127	0,0081
5	2,3194	1,6945	0,88287	0,53213	0,28315	0,15244	0,0919	0,0535	0,0297
2	6,6224	4,3149	2,52379	1,37796	0,83247	0,46406	0,2737	0,1786	0,0868
1	59,789	37,083	23,0946	17,9939	7,63782	4,17855	2,3532	1,2469	0,7328

Таблица 2.4 – Расчетные величины погрешности СХН при $\sigma_{P\%} = 5\%$

$\Delta U \backslash N$	10	33	100	333	1000	3333	10000	33333	100000
20	0,3469	0,2248	0,1264	0,0755	0,0425	0,02421	0,0145	0,00742	0,0047
15	0,6624	0,4305	0,2445	0,1414	0,0786	0,04348	0,0245	0,01396	0,0080
10	1,4827	0,9300	0,5834	0,3160	0,1781	0,10429	0,0584	0,03168	0,0202
5	5,9062	3,6350	3,5095	1,2496	0,7260	0,40515	0,2385	0,13379	0,0743
2	16,290	10,346	6,4203	3,4068	2,1267	1,10216	0,6449	0,44661	0,2171
1	151,24	92,414	55,933	32,359	17,840	10,61885	5,5287	3,11719	1,8321

Таблица 2.5 – Расчетные величины погрешности СХН при $\sigma_{P\%} = 10\%$

$\Delta U \backslash N$	10	33	100	333	1000	3333	10000	33333	100000
20	0,6998	0,44261	0,27664	0,15341	0,08877	0,04785	0,02890	0,01550	0,0088
15	1,3465	0,82021	0,51148	0,26712	0,15556	0,08854	0,06812	0,02763	0,0171
10	2,8694	1,82911	1,10434	0,62808	0,35990	0,19997	0,11326	0,06534	0,0372
5	11,731	7,87608	4,65939	2,54198	1,66268	0,80105	0,55806	0,24980	0,1509
2	32,431	21,5105	12,8025	7,11105	4,13948	2,32050	1,33309	0,72656	0,4199
1	288,36	187,656	113,843	64,6213	36,1146	19,6620	11,2969	6,32158	3,9632

Таблица 2.6 – Расчетные величины погрешности СХН при $\sigma_{P\%} = 15\%$

$\Delta U \backslash N$	10	33	100	333	1000	3333	10000	33333	100000
20	1,0577	0,66204	0,39396	0,22085	0,13279	0,0705	0,0426	0,02295	0,0140
15	1,9418	1,29733	0,75194	0,43507	0,24839	0,1308	0,0751	0,04242	0,0241
10	4,4731	2,96331	1,62835	1,02934	0,54168	0,2945	0,1713	0,09350	0,0605
5	18,168	10,93879	6,89484	3,68177	2,19834	1,2180	0,8255	0,37564	0,2228
2	59,159	31,15628	19,2956	10,8795	5,95261	3,3392	1,8797	1,06268	0,6513
1	424,15	289,4345	174,897	100,854	56,4057	30,726	17,704	9,84279	5,4963

Таблица 2.7 – Расчетные величины погрешности СХН при $\sigma_{P\%} = 20\%$

$\Delta U \backslash N$	10	33	100	333	1000	3333	10000	33333	100000
20	1,4054	0,88147	0,56403	0,29371	0,16525	0,10383	0,0586	0,02919	0,0178
15	2,4897	1,60331	0,94236	0,54873	0,31439	0,17691	0,0939	0,05311	0,0308
10	5,4219	3,72245	2,33937	1,20552	0,70258	0,41371	0,2282	0,13563	0,0703
5	23,598	16,6219	9,05657	5,35310	2,87483	1,59353	0,9610	0,50875	0,2929
2	63,976	42,2639	25,0501	14,0395	8,09585	4,63372	2,5807	1,43381	0,8234
1	552,21	395,187	222,120	124,633	76,1594	39,5558	23,911	13,1853	7,4264

2.3. Формульная зависимость точности статической характеристики нагрузки

Для удобства использования полученных результатов требуется представить результаты в упрощенном виде. Наиболее простым видом представления полученных результатов является формульная зависимость.

2.3.1. Линеаризация результатов в логарифмической шкале

На рисунке 1.12 представлена зависимость погрешности СХН от диапазона изменения напряжения. Представление ее в логарифмических шкалах по обеим осям дает зависимости, близкие к линейным (рисунок 1.13).

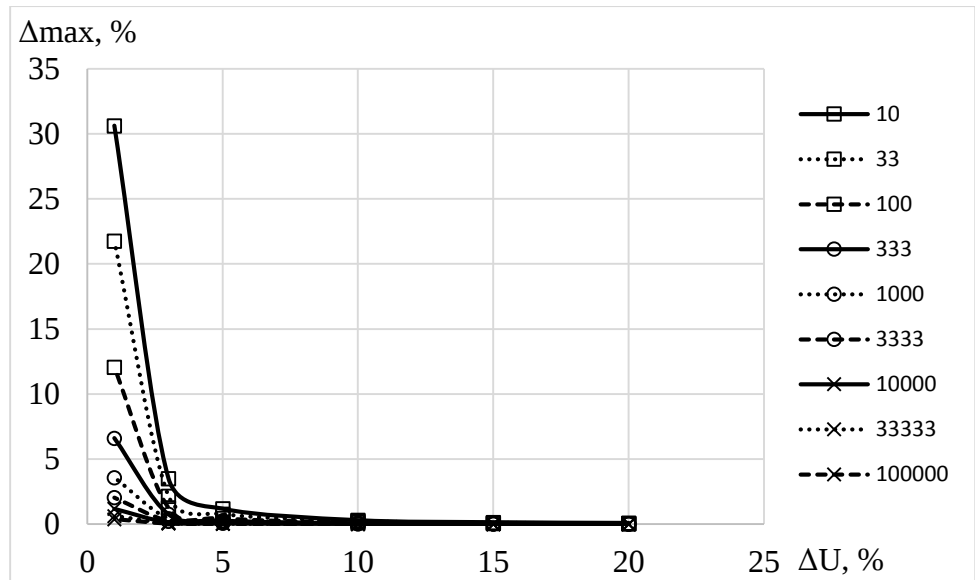


Рисунок 2.5 – Зависимость погрешности СХН от диапазона изменения напряжения при $\sigma_{P\%} = 1\%$ и различном количестве точек

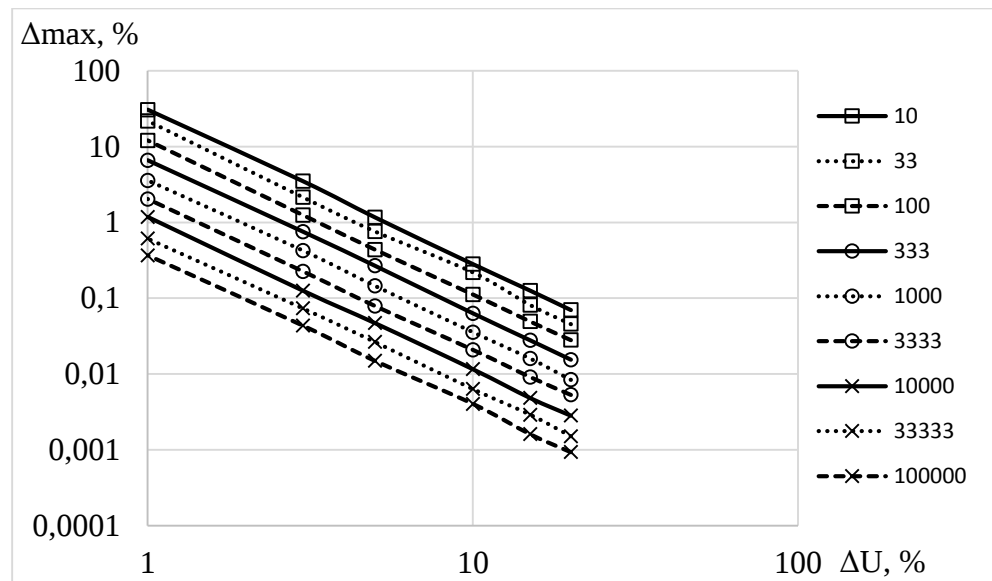


Рисунок 2.6 – Зависимость в логарифмических шкалах погрешности СХН от диапазона изменения напряжения при $\sigma_{P\%} = 1\%$ и различном количестве точек

$$\begin{cases} A_{\Delta U} = \frac{n \cdot \sum_{i=1}^n (y_i \cdot x_i) - \sum_{i=1}^n (x_i \cdot \sum_{i=1}^n y_i)}{n \cdot \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2}, \\ A = \left(\sum_{i=1}^n y_i - A_{\Delta U} \sum_{i=1}^n x_i \right) / n \end{cases}, \quad (2.8)$$

где $y_i = \ln(\Delta_{max_i})$, $x_i = \ln(\Delta U_i)$.

Посредством МНК по формулам (11), зависимость в логарифмических шкалах может быть представлена в виде формулы:

$$\Delta_{max} = A(N, \sigma) \cdot \Delta U^{A_{\Delta U}} \quad (2.9)$$

Коэффициент A меняется при изменении N т.е. может быть представлен функциональной зависимостью $A = f(N)$.

Изменение величины $\sigma_{p\%}$ приводит к получению графиков, того же вида, что и на рисунке 2.6. Угол наклона графиков такой же, но меняется коэффициент A . Таким образом, обобщая, коэффициент A может быть представлен функцией $A = f(N, \sigma)$.

Так как имеется 3 переменные, отражающие факторы эксперимента, то есть необходимость также представления зависимости погрешности СХН от переменных: количество измерений и величины нерегулярных колебаний мощности.

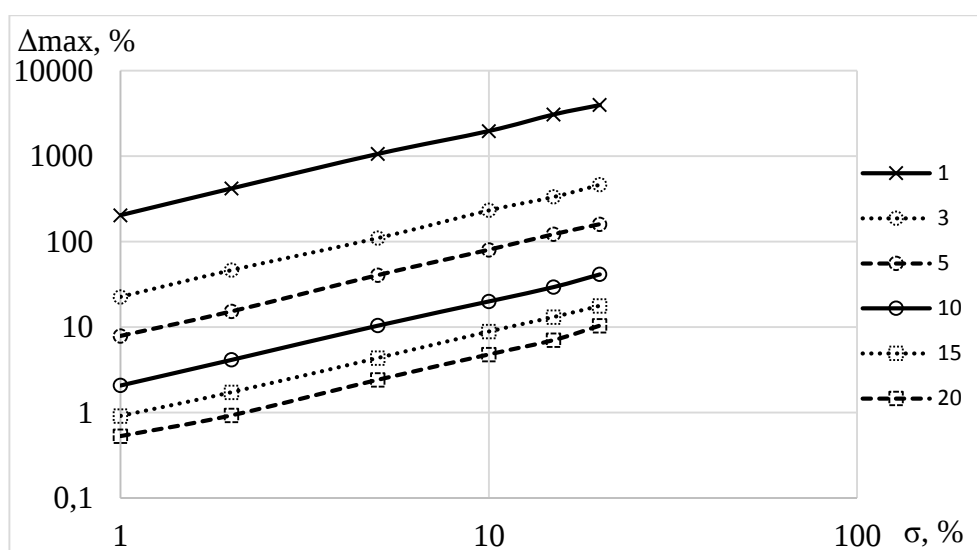


Рисунок 2.7 – Зависимость в логарифмических шкалах погрешности СХН от среднеквадратичной величины нерегулярных колебаний $\sigma_{p\%}$ при количестве точек $N = 3333$ и различном диапазоне изменения напряжения

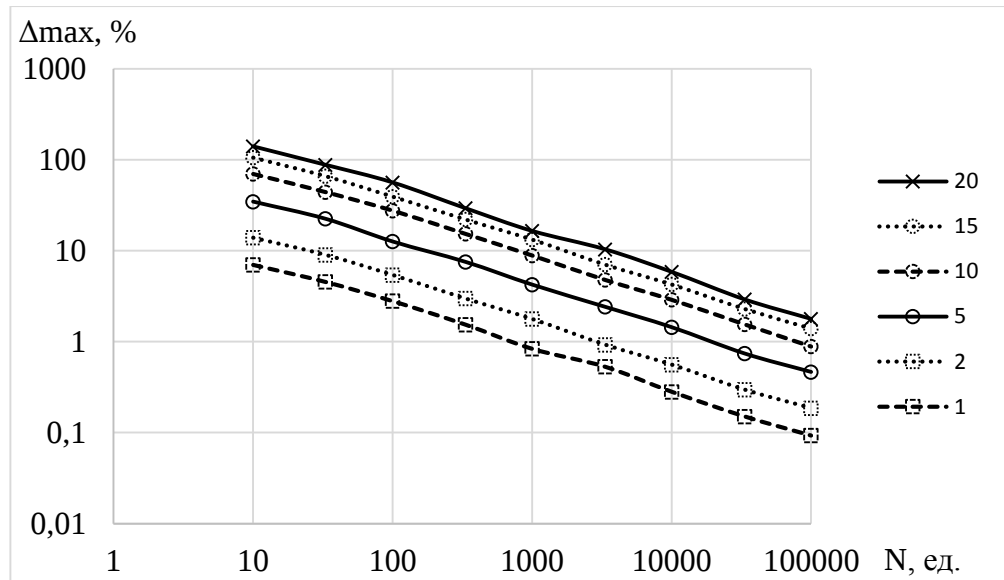


Рисунок 2.8 – Зависимость в логарифмических шкалах погрешности СХН от количества точек данных N при среднеквадратической величине нерегулярных колебаний $\sigma_{p\%} = 1\%$ и различном диапазоне изменения напряжения

По аналогии с формулой (2.9), зависимость от $\sigma_{p\%}$ может быть представлена в виде формулы (2.10), зависимость от N может быть представлена в виде формулы (2.11).

$$\Delta_{max} = B(N, \Delta U) \cdot \sigma_{p\%}^{B\sigma} \quad (2.10)$$

$$\Delta_{max} = C(\Delta U, \sigma) \cdot N^{C_N} \quad (2.11)$$

2.3.2. Обобщающая формульная зависимость

Угол наклона графиков в логарифмических шкалах при варьировании фиксированных значений переменных одинаков к примеру $\sigma_{p\%}$ для рисунка 2.6. Следовательно, коэффициент $A_{\Delta U}$ в формуле (2.9) не зависит от σ .

Можно предположить, что переменные $N, \Delta U, \sigma$ независимо друг от друга влияют на погрешность СХН. Тогда погрешность СХН можно записать в виде функции от трех переменных.

Таким образом, обобщающая формула принимает следующий вид:

$$\Delta_{max} = A \cdot \Delta U^{A_{\Delta U}} \cdot \sigma_{p\%}^{B_{\sigma}} \cdot N^{C_N} \quad (2.12)$$

В таблицах 2.8 – 2.10 приведены расчетные значения коэффициентов $A_{\Delta U}, B_{\sigma}, C_N$.

Таблица 2.8 – Коэффициент $A_{\Delta U}$

$N \backslash \sigma_{p\%}$	1	2	5	10	15	20
10	-2,037	-2,012	-2,016	-2,001	-2,019	-2,002
33	-2,042	-2,007	-1,998	-2,021	-2,009	-2,038
100	-2,023	-2,019	-2,035	-2,008	-2,030	-2,002
333	-2,028	-2,115	-2,011	-2,021	-2,022	-2,019
1000	-2,020	-2,019	-2,019	-2,016	-2,010	-2,038
3333	-1,987	-2,032	-2,023	-2,009	-2,024	-1,992
10000	-2,017	-2,017	-1,995	-1,963	-2,016	-2,023
33333	-2,001	-2,037	-2,037	-2,007	-2,018	-2,032
100000	-1,999	-1,999	-1,999	-2,025	-1,999	-2,022

Таблица 2.9 – Коэффициент B_{σ}

$\Delta U \backslash N$	10	33	100	333	1000	3333	10000	33333	100000
20	1,002	0,989	0,998	0,989	1,001	0,991	1,011	1,001	0,988
15	0,998	1,002	0,997	1,003	1,000	0,994	1,018	0,983	0,998
10	0,994	0,960	1,007	1,003	0,991	0,987	0,996	1,014	0,968
5	1,009	0,999	1,010	0,986	1,015	1,012	1,045	0,979	0,999
3	1,003	0,993	1,005	0,991	0,982	1,001	0,997	0,958	0,987
1	0,968	0,979	0,983	0,945	1,010	0,988	1,001	1,023	1,009

Таблица 2.10 – Коэффициент C_N

$\Delta U \backslash \sigma_{p\%}$	1	2	5	10	15	20
20	-0,480	-0,481	-0,477	-0,481	-0,477	-0,481
15	-0,481	-0,485	-0,488	-0,474	-0,487	-0,485
10	-0,481	-0,479	-0,478	-0,479	-0,482	-0,478
5	-0,480	-0,486	-0,491	-0,480	-0,479	-0,488
3	-0,484	-0,469	-0,469	-0,480	-0,492	-0,481
1	-0,495	-0,489	-0,486	-0,479	-0,482	-0,478

Для обобщающей формульной зависимости могут быть использованы средние арифметические значения:

$$A_{\Delta U} = -2,017;$$

$$B_{\sigma} = 0,996;$$

$$C_N = -0,482.$$

Расчетный Δ_{max} должен аппроксимировать экспериментальные значения. Погрешность СХН достигает больших величин при значениях параметров $\sigma_{P\%} = 20\%$, $N = 10$, $\Delta U = 1\%$. Так как погрешность теряет практическую ценность при больших значениях, то для расчета коэффициента A принято совпадение формульной погрешности с экспериментальной в точке с наименьшей величиной погрешности, при $\sigma_{P\%} = 1\%$, $N = 100000$, $\Delta U = 20\%$.

Коэффициент A может быть рассчитан по следующему выражению:

$$A = 9,302 \cdot 10^{-4} \cdot 20^{2,017} \cdot 0,01^{-0,996} \cdot 100000^{0,482} = 9834 \quad (2.13)$$

Использование в качестве точек совпадения формульной погрешности с экспериментальной приводит к изменению величины коэффициента A , и прямо пропорциональному изменению величины формульной погрешности. Результаты варьирования точек при $N = 100000$ и различных значениях параметров ΔU , $\sigma_{P\%}$ приводит к небольшому изменению коэффициента A , менее 10% от среднего значения 9769. Результаты варьирования представлены в таблицах 2.11, 2.12.

Таблица 2.11 – Величины коэффициента A в формуле (2.12) при $N = 100000$ и различных значениях параметров ΔU , $\sigma_{P\%}$

$\Delta U \backslash \sigma_{P\%}$	1	2	5	10	15	20
20	9834	9864	9905	9446	9953	9543
15	9487	9516	9555	10193	9601	9246
10	10533	10565	10608	9821	10660	9298
5	9585	9615	9654	9832	9701	9576
3	9997	10027	10068	9767	10117	9605
1	9199	9227	9264	10051	9310	9446

Таблица 2.12 – Процентное изменение коэффициента A в формуле (2.12) при $N = 100000$ и различных значениях параметров ΔU , $\sigma_{P\%}$ относительно среднего значения

$\Delta U \backslash \sigma_{P\%}$	1	2	5	10	15	20
20	0,673	0,982	1,392	-3,302	1,886	-2,306
15	-2,882	-2,583	-2,188	4,348	-1,711	-5,347
10	7,822	8,153	8,593	0,541	9,122	-4,822
5	-1,877	-1,576	-1,177	0,653	-0,695	-1,974
3	2,336	2,65	3,067	-0,021	3,569	-1,67
1	-5,835	-5,548	-5,164	2,892	-4,699	-3,302

С учетом численных значений коэффициентов формула (2.12) принимает следующий вид:

$$\Delta_{max} = 9834 \cdot \Delta U^{-2,017} \cdot \sigma_{P\%}^{0,996} \cdot N^{-0,482} \quad (2.14)$$

В таблицах 2.13, 2.14 представлены в процентах погрешности аппроксимации формулой данных, полученных по результатам вычислительных экспериментов, представленных в таблицах 2.1 – 2.6.

Таблица 2.13 – Отклонение погрешности СХН при $\sigma_{P\%} = 1\%$

$\Delta U \backslash N$	10	33	100	333	1000	3333	10000	33333	100000
20	12,85	-4,37	-10,61	-11,16	-5,54	-18,48	-11,36	-9,29	-15,01
15	11,42	-4,63	-9,54	-12,22	-12,00	-15,61	-7,73	-15,97	-12,34
10	12,11	-20,45	-10,59	-13,06	-11,21	-16,88	-13,42	-13,26	-21,59
5	8,52	-7,99	-8,36	-17,89	-12,88	-12,18	-14,58	-16,95	-14,86
3	0,42	-9,67	-11,08	-19,28	-17,36	-14,87	-11,45	-17,14	-19,08
1	3,26	-19,97	-17,02	-16,91	-11,61	-14,82	-15,03	-10,45	-13,70

Таблица 2.14 – Отклонение погрешности СХН при $\sigma_{P\%} = 20\%$

$\Delta U \backslash N$	10	33	100	333	1000	3333	10000	33333	100000
20	12,50	-1,26	-11,35	-6,71	-4,32	-16,59	-14,70	-6,19	-11,25
15	12,90	-3,49	-5,67	-11,23	-10,59	-12,97	-5,35	-8,32	-8,85
10	16,65	-6,47	-14,51	-9,09	-9,98	-16,26	-12,36	-19,23	-9,98
5	7,20	-16,22	-11,67	-18,10	-12,00	-13,04	-16,75	-13,87	-13,63
3	9,84	-8,47	-11,29	-13,26	-13,20	-16,93	-13,89	-15,11	-14,65
1	14,53	-11,90	-9,96	-12,06	-16,96	-12,42	-16,36	-16,92	-14,84

2.3.3. Применение полученной формулы с примерами

При известных значениях: диапазона изменения напряжения ΔU , количества измеренных значений N и среднеквадратического отклонения мощности нагрузки $\sigma_{P\%}$, погрешность СХН с вероятностью не менее 0,95 не превысит расчетное значение по формуле (2.14).

Например, при $\sigma_{P\%} = 5\%$, $\Delta U = 10\%$, $N = 1000$, $\Delta_{max} = 18,98\%$.

Также с помощью полученных результатов можно решить и обратную задачу – планирование эксперимента для определения СХН с заданной точностью. Например, если погрешность СХН не должна превышать 10%, а допустимый диапазон изменения напряжения составляет 18%, то при $\sigma_{P\%} = 5\%$ необходимо произвести не менее 343 измерений.

2.4. Точность расчета зависимости регулирующего эффекта от напряжения

Расчет СХН посредством эксперимента может осуществляться с помощью расчета регулирующих эффектов dP/dU и dQ/dU при различных уровнях напряжения.

Нагрузка $P = f(U)$ имеет вид, близкий к полиному второй степени. При этом, зависимость регулирующего эффекта от напряжения может быть представлена линейной зависимостью.

Отклонение расчетного регулирующего эффекта от линейной зависимости, имеет распределение, близкое к нормальному в силу наличия множества независимых факторов, вызывающих отклонение.

Как видно из рисунка 2.9, даже для небольшого количества точек экспериментальных данных (по данным активного эксперимента) [11], с увеличением отклонения плотность точек уменьшается.

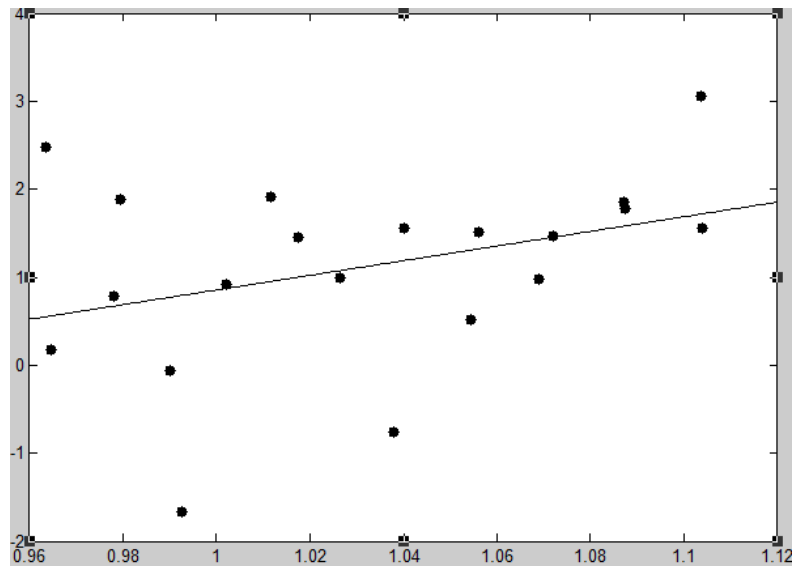


Рисунок 2.9 – Зависимость регулирующего эффекта от напряжения в о.е.

Выбор основных факторов, влияющих на точность описан в пункте 2.2.1. Вычислительный эксперимент проводится аналогичным способом, посредством задания эталонной кривой, для данного случая ей является линейная зависимость. Каждому измеренному значению напряжения соответствует величина регулирующего эффекта, задаваемого согласно линейной зависимости с некоторым случайным отклонением, описываемым нормальным распределением.

Посредством аппроксимации МНК получена линейная функция. По результатам множественного повторения эксперимента при одинаковых значениях факторов получены статистически достоверные результаты.

Результаты при различных значениях факторов аппроксимированы посредством МНК и представлены в виде формулы (2.15):

$$\Delta_{max} = 11808 \cdot \Delta U^{-2,021} \cdot \sigma_{p\%}^{1,026} \cdot N^{-0,46} \quad (2.15)$$

Погрешность расчета регулирующего эффекта по своему виду одинакова с формулой расчета погрешности для СХН (2.12) и имеет слабо отличающиеся от численной зависимости погрешности СХН (2.14) соответствующие коэффициенты. Это говорит об приблизительном равенстве погрешностей расчета СХН и регулирующего эффекта.

2.5. Влияние диапазона сравнения на величину погрешности

Величина отклонения с увеличением диапазона сравнения также увеличивается. При расчете погрешности использовался диапазон сравнения мощности расчетной СХН и эталонной СХН от 0,8 до 1,2 базисного. Вместе с тем, требуемая величина диапазона сравнения может быть меньше, в результате чего расчетная максимальная величина погрешности оказывается завышенной.

С целью определения того, как изменяется расчетная величина погрешности при изменении диапазона сравнения проведена дополнительная серия вычислительных экспериментов.

Результаты серий экспериментов как с одинаковыми, так и с разными наборами величин факторов величины погрешности принимают разные значения в силу случайности значений исходных данных. Вместе с тем, требуется описание не точной, а усредненной зависимости результатов, при условии, что они слабо изменяются при варьировании величин основных факторов определяющих величину погрешности.

Так как результат должен быть приемлем к использованию при любых величинах факторов, то вычислительный эксперимент повторяется при различных значениях факторов.

Предполагается, что результаты зависят слабо от количества измерений, диапазона изменения напряжения и среднеквадратического отклонения мощности. Результат изменения диапазона сравнения мощностей расчетной СХН с эталонной рассчитан относительно результата погрешности при диапазоне сравнения от 0,8 до 1,2 базисного. При этом, расчетная погрешность может быть скорректирована посредством умножения на коэффициент, зависящий от диапазона сравнения.

Значение коэффициента может быть представлено в виде формульной зависимости в соответствии с результатами, получаемыми при вычислительных экспериментах с изменяющимся диапазоном сравнения.

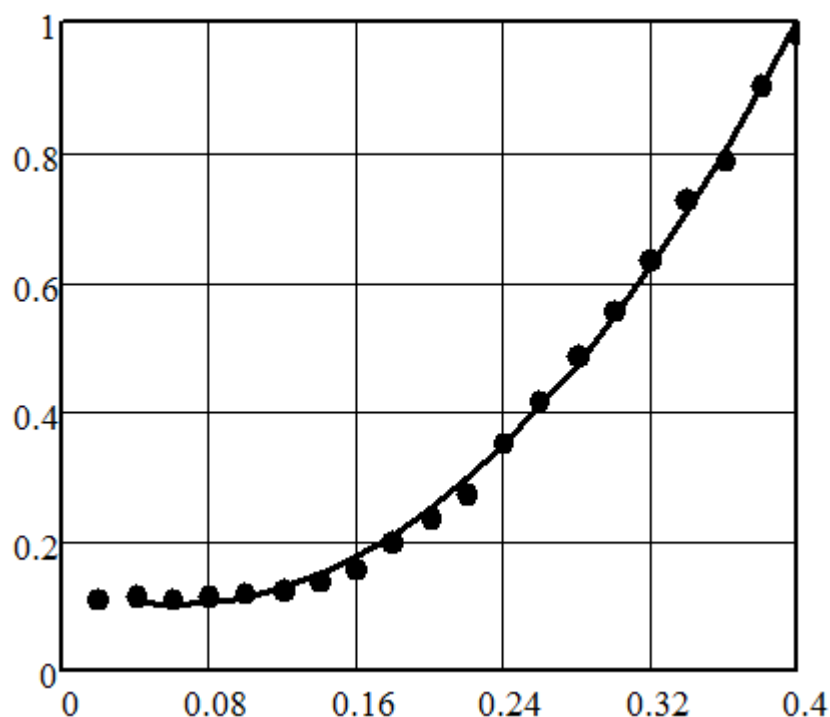


Рисунок 2.10 – Зависимость расчетная погрешности СХН (о.е.) от диапазона сравнения напряжения (о.е.), при $\sigma = 20\%$, $N = 10$, $\Delta U = 20\%$ и различном диапазоне сравнения δU , в пределах 40%

Значение данного коэффициента может быть рассчитано по следующей формуле:

$$K_{\delta U} = A_{0\delta U} + A_{1\delta U} \cdot \delta U + A_{2\delta U} \cdot \delta U^2 \quad (2.16)$$

где δU^* – относительный диапазон сравнения СХН, может быть рассчитан по формуле $\delta U/40\%$. В относительных единицах диапазон сравнения может быть обозначен как $1 \pm \delta U/2$.

На рисунке 2.11 представлены зависимости коэффициента $K_{\delta U}$ от диапазона сравнения при различных величинах факторов, рассчитанные посредством МНК, включая те, что приводят к наименьшему и наибольшему значению погрешности. Зависимости приведены в относительных единицах от своего максимального значения, соответствующего диапазону сравнения $\pm 20\%$.

Как видно из рисунка 2.11, кривые в точности не совпадают, но, тем не менее принимают близкие значения, в особенности при больших величинах

диапазона сравнения. Замена всей группы парабол одной усредненной позволяет в простой форме оценить влияние диапазона сравнения на расчетную погрешность.

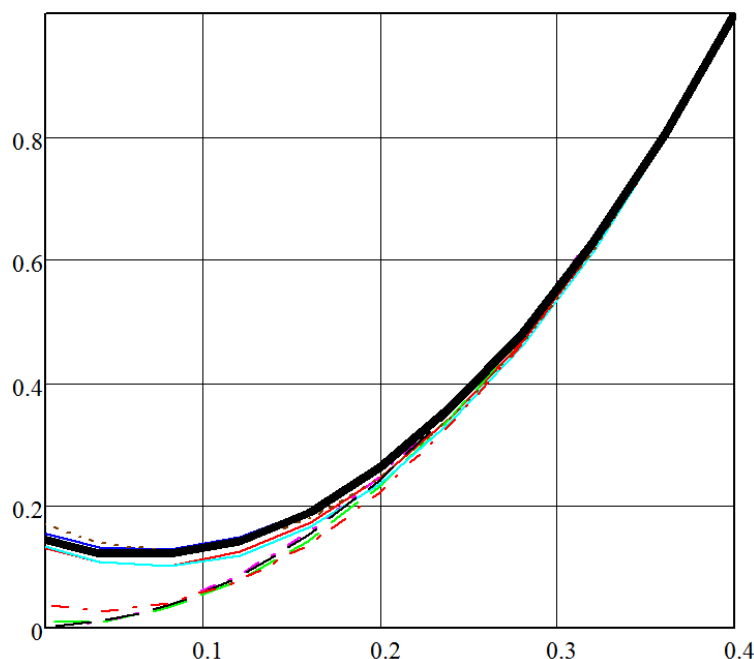


Рисунок 2.11 – Расчетные зависимости коэффициента $K_{\delta U}$ от напряжения при различных величинах факторов появления погрешности

Все параболы проходят через значение 1 при $\delta U = 40\%$ исходя из условия приведения к относительным единицам. С приближением к нулю различия между значениями аппроксимирующих кривых увеличивается. Каждая из кривых принимает значения близкие к нулю при нулевом диапазоне сравнения. В действительности нулевая и отрицательная погрешность при малом диапазоне сравнения не соответствует экспериментальным данным. Данные значения получены согласно аппроксимирующим параболом.

В качестве обобщающей функции принята парабола, принимающая значение 0,15 при нулевом диапазоне сравнения, 1 при $\delta U = 40\%$, а также принимающая максимальные значения из аппроксимирующих кривых при промежуточных значениях δU . При этом $A_{0\delta U} = 0,15$, $A_{1\delta U} = -2$, $A_{2\delta U} = 31,25$. На рисунке 2.10 эта парабола обозначена жирной линией.

2.6. Влияние равенства диапазона сравнения диапазону изменения напряжения на погрешность

Различие между эталонной СХН и расчетной (рисунок 2.1) принимает большие величины при выходе диапазона сравнения за пределы изменения напряжения в ходе эксперимент, т.е. вне диапазона экспериментальных данных.

Данный вычислительный эксперимент выполняется с параметрами представленными в подразделах 2.2 – 2.4, с отличием в том, что диапазон сравнения напряжения принимается равным диапазону изменения напряжения.

$$\begin{aligned} U_{min} &= 1 - \frac{\Delta U_{\%}}{2} \\ U_{max} &= 1 + \frac{\Delta U_{\%}}{2} \end{aligned} \quad (2.17)$$

Расчетные погрешности приведены в таблицах 2.15 – 2.20.

Таблица 2.15 – Расчетные величины погрешности СХН при $\sigma_{P\%} = 1\%$, о.е.

$\Delta U \backslash N$	10	33	100	333	1000	3333	10000
20	0,0811	0,0458	0,0286	0,0154	0,0088	0,0048	0,0029
15	0,0709	0,0467	0,0270	0,0152	0,0090	0,0047	0,0029
10	0,0700	0,0464	0,0265	0,0156	0,0084	0,0048	0,0029
5	0,0661	0,0442	0,0265	0,0146	0,0087	0,0048	0,0027
2	0,0682	0,0428	0,0261	0,0164	0,0085	0,0046	0,0027
1	0,0675	0,0431	0,0259	0,0148	0,0084	0,0049	0,0026

Таблица 2.16 – Расчетные величины погрешности СХН при $\sigma_{P\%} = 3\%$, о.е.

$\Delta U \backslash N$	10	33	100	333	1000	3333	10000
20	0,2148	0,1328	0,0791	0,0456	0,0263	0,0152	0,0083
15	0,2028	0,1395	0,0816	0,0463	0,0261	0,0141	0,0081
10	0,2100	0,1352	0,0805	0,0416	0,0268	0,0141	0,0083
5	0,2124	0,1292	0,0821	0,0444	0,0248	0,0146	0,0077
2	0,1907	0,1229	0,0815	0,0455	0,0254	0,0146	0,0085
1	0,2033	0,1296	0,0783	0,0475	0,0253	0,0140	0,0084

Таблица 2.17 – Расчетные величины погрешности СХН при $\sigma_{P\%} = 5\%$, о.е.

$\Delta U \backslash N$	10	33	100	333	1000	3333	10000
20	0,3410	0,2744	0,1283	0,0743	0,0439	0,0254	0,0138
15	0,3416	0,2332	0,1350	0,0764	0,0435	0,0235	0,0136
10	0,3477	0,2140	0,1276	0,0745	0,0447	0,0234	0,0139
5	0,4811	0,2102	0,1323	0,0695	0,0413	0,0243	0,0129
2	0,3334	0,2196	0,1334	0,0699	0,0423	0,0243	0,0141
1	0,3391	0,2132	0,1394	0,0715	0,0422	0,0233	0,0140

Таблица 2.18 – Расчетные величины погрешности СХН при $\sigma_{P\%} = 10\%$, о.е.

$\Delta U \backslash N$	10	33	100	333	1000	3333	10000
20	0,7116	0,4518	0,2653	0,1571	0,0905	0,0476	0,0276
15	0,6898	0,4462	0,2811	0,1534	0,0877	0,0466	0,0291
10	0,7294	0,4451	0,2662	0,1460	0,0839	0,0461	0,0268
5	0,6841	0,4407	0,2734	0,1574	0,0858	0,0467	0,0278
2	0,6757	0,4200	0,2675	0,1543	0,0855	0,0455	0,0280
1	0,6944	0,4374	0,2705	0,1458	0,0855	0,0479	0,0278

Таблица 2.19 – Расчетные величины погрешности СХН при $\sigma_{P\%} = 15\%$, о.е.

$\Delta U \backslash N$	10	33	100	333	1000	3333	10000
20	1,0737	0,7155	0,4185	0,2285	0,1313	0,0737	0,0417
15	1,0195	0,6574	0,4017	0,2278	0,1344	0,0709	0,0410
10	1,0356	0,6627	0,4121	0,2266	0,1265	0,0718	0,0396
5	1,0290	0,8011	0,4001	0,2263	0,1341	0,0717	0,0418
2	1,0072	0,6652	0,3863	0,2242	0,1281	0,0727	0,0401
1	1,0037	0,6382	0,3881	0,2307	0,1254	0,0718	0,0428

Таблица 2.20 – Расчетные величины погрешности СХН при $\sigma_{P\%} = 20\%$, о.е.

$\Delta U \backslash N$	10	33	100	333	1000	3333	10000
20	1,4216	0,8950	0,5363	0,2963	0,1750	0,0983	0,0557
15	1,4490	0,8875	0,5431	0,3013	0,1792	0,0945	0,0547
10	1,3789	0,8921	0,5458	0,3080	0,1686	0,0958	0,0527
5	1,3332	0,9144	0,5266	0,2946	0,1788	0,0956	0,0557
2	1,3981	0,8662	0,5139	0,3007	0,1707	0,0969	0,0535
1	1,4168	0,8671	0,5276	0,2977	0,1673	0,0958	0,0570

В полученных результатах погрешность при различных диапазонах изменения напряжения принимает слабо отличающиеся величины. Величина

отклонений погрешностей при разных диапазонах изменения напряжений и одинаковых прочих параметрах может быть охарактеризована среднеквадратическим отклонением от среднего.

Таблица 2.21 – Среднеквадратическое отклонение от среднего значения при разных диапазонах изменения напряжения, %

$N, \text{ед} \setminus \sigma, \%$	1	3	5	10	15	20
10	6,97	3,892	14,438	2,579	2,263	2,619
33	3,453	3,969	9,802	2,293	7,959	1,883
100	3,409	1,713	3,026	1,998	2,904	2,043
333	3,828	4,09	3,488	3,144	0,883	1,449
1000	2,549	2,698	2,698	2,456	2,711	2,711
3333	2,136	3,051	3,051	1,724	1,229	1,229
10000	3,301	3,014	3,014	2,448	2,629	2,629

Так как среднеквадратическое отклонение принимает малые величины вне зависимости от параметров эксперимента, то может быть сделан вывод о том, что диапазон изменения напряжения не влияет на погрешность расчета СХН.

В логарифмических шкалах зависимость погрешности от среднеквадратического колебания мощности и от количества точек экспериментальных данных может быть линеаризована (рисунок 2.12, 2.13).

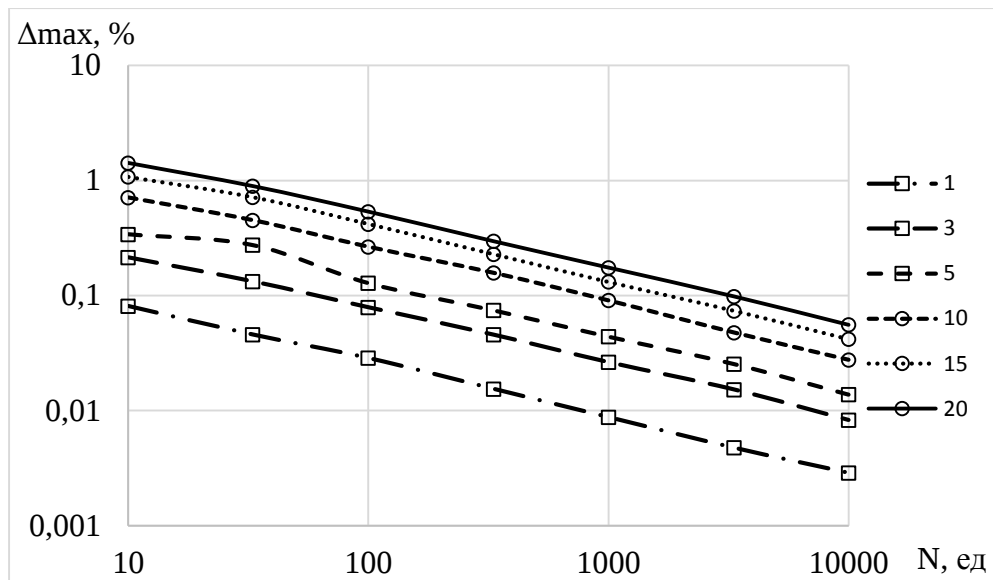


Рисунок 2.12 – Зависимость погрешности от количества точек экспериментальных данных при различной величине среднеквадратического отклонения

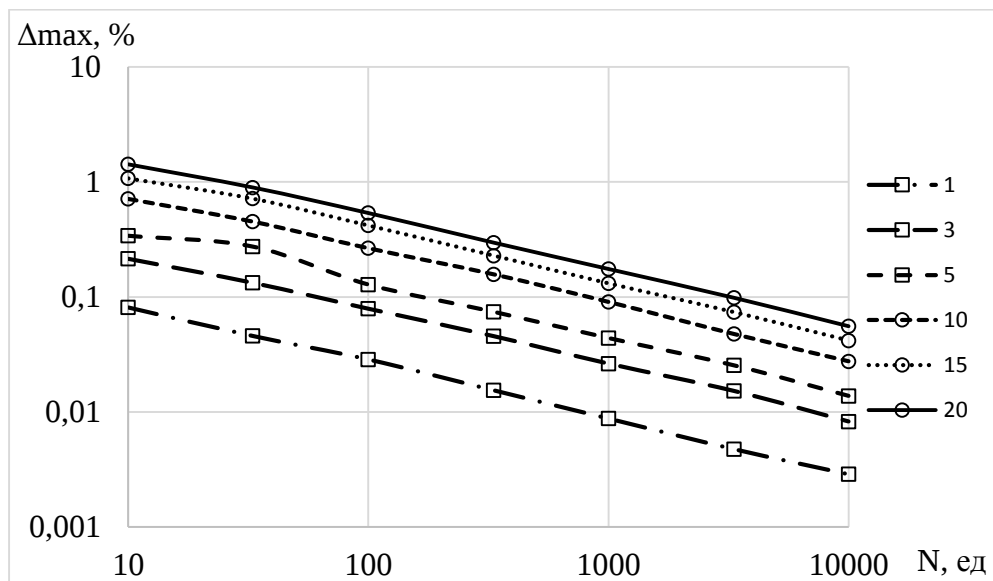


Рисунок 2.13 – Зависимость погрешности от величины среднеквадратического отклонения при различном количестве точек экспериментальных данных

Посредством аппроксимации функции в логарифмическом масштабе методом МНК, погрешность может быть записана в виде формульной зависимости от двух параметров эксперимента σ_p и N .

$$\Delta_{max} = 21,89 \cdot \sigma_p^{0,999} \cdot N^{-0,474} \quad (2.18)$$

3. ПРАКТИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТОЧНОСТИ СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК НАГРУЗКИ

Оценка точности СХН может быть осуществлена посредством расчетных формул, представленных в подразделах 2.3, 2.4, 2.5. При этом результатом является не отличие от нагрузки в узле согласно СХН, а величина, в пределах которой эта погрешность лежит.

3.1. Оценка точности характеристики, полученной по результатам активного эксперимента

В качестве испытуемых результатов расчета СХН по результатам активного эксперимента использована СХН, полученная на предприятии ЗАО «Сибкабель» г. Томск [11].

Питание нагрузки ЗАО «Сибкабель» осуществляется от тупиковой понижающей подстанции напряжением 35/6 кВ. Нагрузка ЗАО «Сибкабель» имеет резко переменный характер, обусловленный особенностями технологического процесса.

В ходе активного эксперимента эксперимента напряжение на нагрузке изменялось каждые 2 минуты с помощью перевода РПН в соседнее положение. Перевод осуществлялся от нормального положения до максимально допустимого, затем до минимально допустимого, затем обратно до нормального положения. Измерения напряжения и мощности производились через каждые 5 секунд с помощью анализатора качества электрической энергии AR-5.

Напряжение изменялось в пределах от $0,99 U_{\text{ном}}$ до $1,15 U_{\text{ном}}$. Длительность активного эксперимента составила 40 минут. Перевод РПН за это время был осуществлен 20 раз.

На рисунке 3.1 представлены графики зависимости напряжения и мощности от времени.

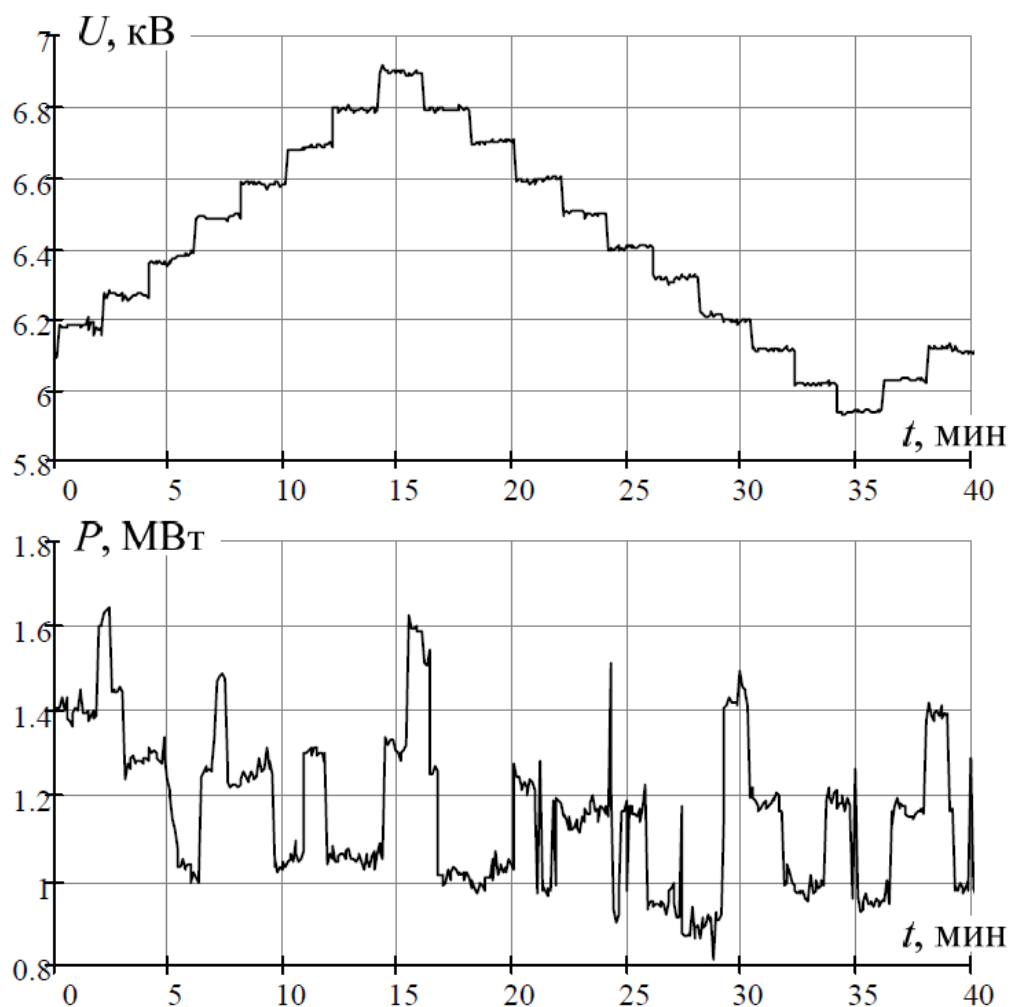


Рисунок 3.1 – Графики зависимостей от времени напряжения и активной мощности

Активная мощность зависит от изменения напряжения слабо, что заметно даже без использования специальных средств. В своей основе изменение активной мощности обусловлено изменением нагрузки согласно технологическому процессу, а не изменением положения РПН.

Тем не менее, при изменении положения РПН, в силу малой длительности процесса изменения напряжения, вероятность наложения на этот процесс скачка потребляемой активной мощности согласно технологическому процессу мала. Как следствие, расчетная величина регулирующего эффекта в большей части обусловлена СХН, а не технологическим процессом. На рисунке 3.2 представлены пары отсчетов, соответствующие моментам измерений до и после перевода РПН.

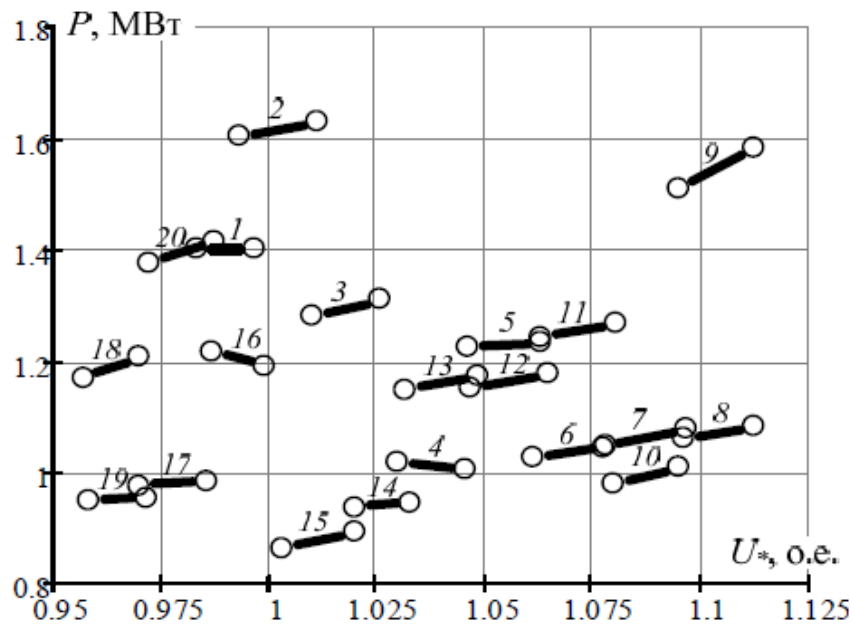


Рисунок 3.2 – Пары отсчетов, соответствующие моментам измерений до и после перевода РПН

Для каждой пары измерений был рассчитан регулирующий эффект. Затем была выполнена фильтрация, в процессе которой были отбракованы результаты в наибольшей степени отклоняющиеся от аппроксимирующей прямой (рисунок 3.3).

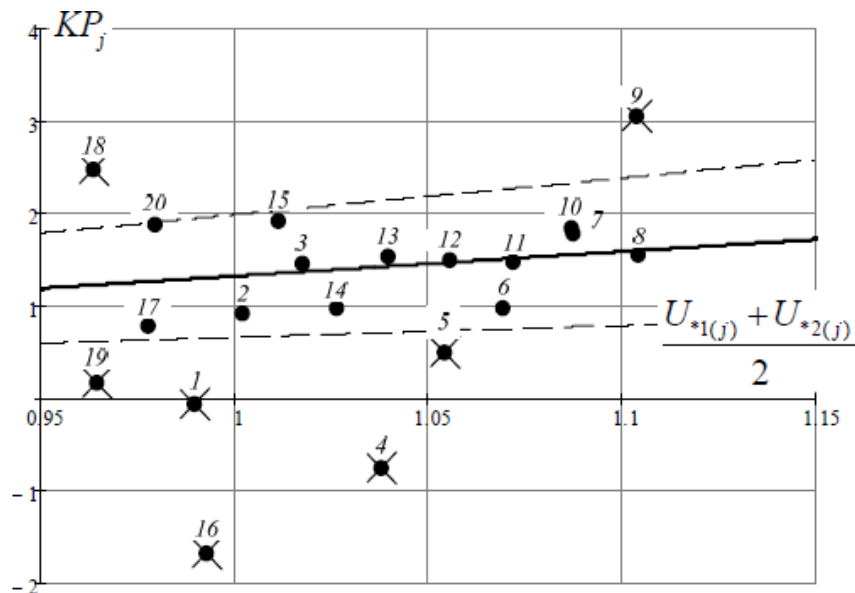


Рисунок 3.3 – Фильтрация пар отсчетов

В качестве расчетных данных для оценки точности расчетной СХН являются набор неотфильтрованных значений регулирующих эффектов. В таблице 3.1 представлены пары отсчетов и регулирующие эффекты нагрузки.

Таблица 3.1 – Выделенные пары отсчетов и регулирующие эффекты нагрузки

j	$U_{*1(j)}, \text{ о.е.}$	$P_{*1(j)}, \text{ о.е.}$	$U_{*2(j)}, \text{ о.е.}$	$P_{*2(j)}, \text{ о.е.}$	KP_j
2	0,993	1,606	1,011	1,634	0,92
3	1,010	1,282	1,025	1,312	1,46
6	1,061	1,030	1,077	1,045	0,98
7	1,078	1,050	1,097	1,082	1,78
8	1,096	1,062	1,112	1,086	1,55
10	1,095	1,009	1,079	0,983	1,85
11	1,081	1,272	1,063	1,242	1,47
12	1,065	1,181	1,047	1,151	1,51
13	1,048	1,176	1,032	1,147	1,55
14	1,033	0,949	1,020	0,937	0,99
15	1,020	0,893	1,003	0,865	1,92
17	0,986	0,987	0,970	0,975	0,79
20	0,972	1,376	0,987	1,417	1,89

Таким образом, при расчете СХН использовался массив данных из 13 точек с диапазоном изменения напряжения 14%.

Расчетная СХН представлена полиномом второй степени:

$$P_H = P_{H,0} \left(1,481 - 2,277 \left(\frac{U}{U_{\text{норм}}} \right) + 1,796 \left(\frac{U}{U_{\text{норм}}} \right)^2 \right) \quad (3.1)$$

Зависимость величины регулирующего эффекта от напряжения может быть представлена линейной функцией :

$$KP = -2,277 + 3,592 \frac{U}{U_{\text{норм}}} \quad (3.2)$$

Среднеквадратичное отклонение от расчетной СХН в относительных единицах рассчитано в Matlab.

```

for i = 1 : length(KP)
    s(i) = ((KP(i) - (a1*u(i) + 2*a2*u(i)))/(a1*u(i) + 2*a2*u(i)))^2;
    S = S + s(i);
end
S = sqrt(S/length(KP))

```

Расчетная величина среднеквадратического отклонения: $\sigma_P = 0,2875$

Расчетная погрешность составляет:

$$\Delta_{max} = 11808 \cdot 14^{-2,021} \cdot 0,2875^{1,026} \cdot 13^{-0,46} = 4,875 \quad (3.3)$$

Величина регулирующего эффекта может отличаться на 488% относительно расчетной СХН, при отклонении напряжения на 20% от нормального. Как следствие значения СХН принимают еще больший разброс. Условия эксперимента нельзя назвать достаточными для объявления результатов достоверными.

Применять формулу можно как по данным, прошедшим обработку и фильтрацию, так и по исходным данным, полученным непосредственно в процессе эксперимента. Вопрос правильного применения формулы для расчета максимальной погрешности остается открытым.

Приведенный расчет погрешности осуществлен по обработанным данным и прошедшим фильтрацию. Процесс вычислительного эксперимента основан на применении МНК на массиве данных. То же самое было произведено с обработанными и отфильтрованными экспериментальными данными. Таким образом расчетная формула оценивает погрешность в результате действий аналогичных расчетному эксперименту.

Использование диапазона сравнения согласно диапазону изменения напряжения не вносит принципиального отличия результата.

$$\Delta_{max} = 21,89 \cdot 0,2875^{1,026} \cdot 13^{-0,474} = 1,868 \quad (3.4)$$

Величина регулирующего эффекта может отличаться на 187% относительно расчетной СХН, при напряжении от 0,97 до 1,11 нормального. Погрешность расчета СХН соизмерима с погрешностью расчета регулирующего эффекта и не позволяет судить об достаточности точности для практического применения результатов.

Несмотря на проблематичность обоснования, применим формулу к исходным данным без обработки и фильтрации.

Исходный массив данных содержит 501 точку. Среднеквадратическое отклонение активной мощности от своего среднего значения $\sigma_p = 0,1537$.

Диапазон изменения напряжения 16%. Расчетная формула для диапазона сравнения 40% ($\pm 20\%$) дает следующий результат.

$$\Delta_{max} = 11808 \cdot 16^{-2,021} \cdot 0,1537^{1,026} \cdot 501^{-0,46} = 0,365 \quad (3.5)$$

Результат много лучше чем при применении формулы к обработанным и отфильтрованным данным, но все же трудно допустим к применению ($\pm 36,5\%$).

Применим формулу с диапазоном сравнения равным диапазону изменения напряжения при эксперименте.

$$\Delta_{max} = 21,89 \cdot 0,1537^{1,026} \cdot 501^{-0,474} = 0,177 \quad (3.6)$$

Полученный результат показывает допустимость применения расчетной СХН в пределах от 0,97 до 1,17 нормального напряжения с точностью $\pm 17,7\%$.

ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ

Целью данного раздела является комплексный анализ научного исследования, выполняемой в рамках магистерской диссертации, при этом детально рассматриваются планово-временные и материальные показатели процесса выполнения научного исследования.

4.1. Предпроектный анализ

Исследование точности статических характеристик нагрузки получаемых экспериментальным путем можно считать элементом, основой для создания полной, универсальной методики по определению статических характеристик нагрузки посредством эксперимента.

Результат научного исследования не представляет коммерческой ценности и не предполагается к коммерческому использованию.

Потенциальным потребителем результатов исследования можно считать ОАО «СО ЕЭС», заинтересованное в создании методики достоверного расчета статических характеристик нагрузки, а также научное сообщество ученых, работающих в данном направлении.

Ввиду слабой проработки вопроса точности статических характеристик нагрузки получаемых экспериментальным путем, полнота и достаточность результатов исследования для практического использования не предполагается. Вместе с тем, целью исследования можно считать снижение уровня неопределенности об влиянии наиболее существенных аспектов эксперимента на точность расчета статических характеристик нагрузки посредством эксперимента.

4.2. Структура работ в рамках научного исследования

Для выполнения проектирования формируется рабочая группа, в состав которой входят научный руководитель и магистрант. На каждый вид запланированных работ установлена соответствующая должность исполнителей.

Составлен перечень этапов и работ в рамках проведения проектирования и произведено распределение исполнителей по видам работ. Перечень этапов, работ и распределение исполнителей по данным видам работ приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Перечень этапов работ и распределение исполнителей

Основные этапы	№ работ	Содержание работ	Должность исполнителя
Выбор направления исследования	1	Подбор литературы и материалов по теме исследования	Научный руководитель и магистрант
Выбор объекта исследования	2	Анализ литературы и материалов по теме исследования	Магистрант совместно с научным руководителем
Разработка цели исследования	3	Поиск проблемы исследования	Научный руководитель и магистрант
Исследование	4	Планирование основного вычислительного эксперимента	Магистрант совместно с научным руководителем
	5	Выполнение основного вычислительного эксперимента	Магистрант
	6	Анализ и обобщение результатов основного вычислительного эксперимента	Магистрант
Публикация статьи по теме исследования	7	Написание статьи по теме исследования	Научный руководитель и магистрант
	8	Публикация статьи	Научный руководитель
Исследование	9	Планирование типовых вычислительных экспериментов	Магистрант

	10	Выполнение типовых вычислительных экспериментов	Магистрант
	11	Анализ и обобщение результатов типовых вычислительных экспериментов	Магистрант
Подготовка отчета	12	Составление пояснительной записки	Магистрант
	13	Проверка пояснительной записки	Научный руководитель
	14	Правки пояснительной записки в соответствии с замечаниями	Магистрант
Защита магистерской диссертации	15	Подготовка доклада и иллюстративного материала	Магистрант

4.3. FAST - анализ

Объектом FAST - анализа выступает объект исследования.

1.) В качестве главной функции выступает уровень соответствия оцениваемой методикой точности СХН по экспериментальным данным действительной погрешности.

2.) Основной функцией является преобразование параметров эксперимента в максимальную погрешность с которой могут быть получены результаты по ней.

3.) Вспомогательной функцией выступает гарантирующая, о том, что погрешность расчета по экспериментальным данным не превышает расчетную погрешность согласно методике.

Таблица 4.2 – Классификация функций, выполняемых объектом исследования

Наименование	Выполняемая функция	Ранг функции		
		Главная	Основная	Вспомогательная
МНК полиномом с фиксированным диапазоном сравнения	Показывает максимальную погрешность определения СХН при диапазоне сравнения $\pm 20\%$		X	X
МНК линейный для регулирующего эффекта	Позволяет определить максимальную погрешность определения регулирующего эффекта при диапазоне сравнения $\pm 20\%$			X
МНК полиномом с диапазоном сравнения согласно эксперименту	Показывает максимальную погрешность определения СХН при диапазоне сравнения в пределах экспериментальных данных	X	X	X

Таблица 4.3 – Матрица соотношений функций

	Функция 1	Функция 2	Функция 3
Функция 1	=	>	>
Функция 2	<	=	<
Функция 3	<	>	=

Таблица 4.4 – Матрица количественных соотношений функций

	Функция 1	Функция 2	Функция 3	ИТОГО
Функция 1	1	1,5	1,5	4
Функция 2	0,5	1	1,5	3
Функция 3	0,5	0,5	1	2
Примечание: 0,5 при «<», 1,5 при «>», 1 при «=».				$\Sigma = 9$

Таблица 4.5 – Определение стоимости функций, выполняемых объектом исследования

Наименование	Выполняемая функция	Трудовые мкость, час	Заработная плата, руб	Себестоимость, руб
МНК полиномом с фиксированным диапазоном сравнения	Показывает максимальную погрешность определения СХН при диапазоне сравнения $\pm 20\%$	3	900	900
МНК линейный для регулирующего эффекта	Позволяет определить максимальную погрешность определения регулирующего эффекта при диапазоне сравнения $\pm 20\%$	3	900	900
МНК полиномом с диапазоном сравнения согласно эксперименту	Показывает максимальную погрешность определения СХН при диапазоне сравнения в пределах экспериментальных данных	3	900	900

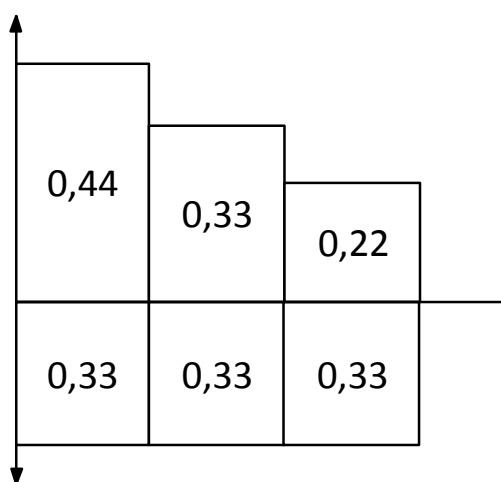


Рисунок 4.1 – Функционально-стоимостная диаграмма

Построенная функционально-стоимостная диаграмма позволяет выявить отсутствие явных диспропорций между важностью функций и затратами на них.

4.4. Диаграмма Исикава

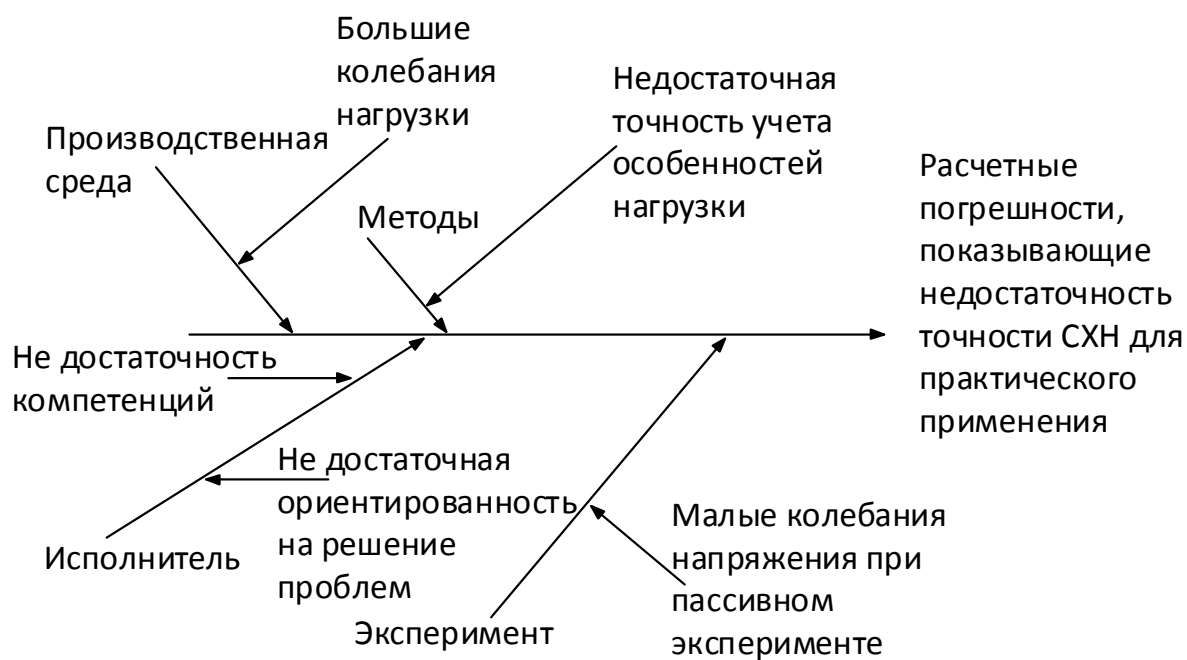


Рисунок 4.2 – Причино-следственная диаграмма

4.5. SWOT - анализ

SWOT – Strengths (сильные стороны), Weaknesses (слабые стороны), Opportunities (возможности) и Threats (угрозы) – представляет собой комплексный анализ научно-исследовательского проекта. SWOT-анализ исследования внешней и внутренней среды проекта.

Таблица 4.6 – Матрица SWOT

		Сильные стороны	Слабые стороны
		С1. Новизна научного проекта С2. Квалифицированный персонал	Сл1. Отсутствие прототипа научной разработки Сл2. Отсутствие профессиональных математиков занимающихся проектом
Возможности	В1. Использование инновационной инфраструктуры ТПУ В2. Кадровые ресурсы ТПУ В3. Потребность в исследовании направления		
Угрозы	У1. Несвоевременное финансовое обеспечение научного исследования со стороны государства		

Таблица 4.7 – Интерактивная матрица проекта

	Сильные и слабые стороны проекта				
Возможности и угрозы		С1	С2	Сл1	Сл2
	В1	+	-	-	-
	В2	+	-	-	+
	В3	+	+	-	-
	У1	+	-	+	-

В1С1) Использование инновационной структуры ТПУ с целью углубления исследования, увеличения качества исследований.

В2С1) Привлечение квалифицированных сотрудников для ускорения исследований.

В2Сл2) Привлечение специалистов в области математики для решения проблем исследования

В3С1) Представление результатов на конференциях с целью увеличения заинтересованности в услугах расчета СХН

В3С2) Увеличение качества производимых исследований с целью увеличения заинтересованности в услугах расчета СХН

У1С1) Подача заявок на гранты на основании результатов исследований

У1Сл1) Обоснование ценности научной разработки на конференциях

4.6. Оценка готовности проекта к коммерциализации

На какой бы стадии жизненного цикла не находилась научная разработка полезно оценить степень ее готовности к коммерциализации и выяснить уровень собственных знаний для ее проведения (или завершения). Для этого необходимо заполнить специальную форму, содержащую показатели о степени проработанности проекта с позиции коммерциализации и компетенциям разработчика научного проекта. Перечень вопросов приведен в таблице 4.8.

Таблица 4.8 – Бланк готовности к коммерциализации

№ п/п	Наименование	Степень проработанности научного проекта	Уровень имеющихся знаний у разработчика
1	Определен имеющийся научно-технический задел	3	2
2	Определены перспективные направления коммерциализации научно-технического задела	2	1
3	Определены отрасли и технологии (товары, услуги) для предложения на рынке	2	1
4	Определена товарная форма научно-технического задела для представления на рынок	1	1

5	Определены авторы и осуществлена охрана их прав	1	1
6	Проведена оценка стоимости интеллектуальной собственности	1	1
7	Проведены маркетинговые исследования рынков сбыта	1	1
8	Разработан бизнес-план коммерциализации научной разработки	1	1
9	Определены пути продвижения научной разработки на рынок	1	1
10	Разработана стратегия (форма) реализации научной разработки	1	1
11	Проработаны вопросы международного сотрудничества и выхода на зарубежный рынок	1	1
12	Проработаны вопросы использования услуг инфраструктуры поддержки, получения льгот	1	1
13	Проработаны вопросы финансирования коммерциализации научной разработки	1	1
14	Имеется команда для коммерциализации научной разработки	1	1
15	Проработан механизм реализации научного проекта	1	1
	Итого баллов	19	17

При оценке степени проработанности научного проекта 1 балл означает не проработанность проекта, 2 балла - слабую проработанность, 3 балла - выполнено, но в качестве не уверен, 4 балла — выполнено качественно, 5 - имеется положительное заключение независимого эксперта. Для оценки уровня имеющихся знаний у разработчика система баллов принимает следующий вид: 1 означает не знаком или мало знаю, 2 - в объеме теоретических знаний. 3 — знаю теорию и практические примеры применения, 4 - знаю теорию и самостоятельно выполняю. 5 - знаю теорию, выполняю и могу консультировать.

Сумма баллов 19 по направлению степень проработанности научного проекта и сумма 17 баллов по направлению уровень имеющихся знаний у разработчика позволяют сделать вывод об однозначно низкой готовности научной разработки к коммерциализации, а также об недостатке компетенций разработчику в области коммерциализации. С ростом готовности научной разработки к коммерциализации необходимо привлечения квалифицированного специалиста в команду проекта для последующей коммерциализации.

4.7. Инициация проекта

Таблица 4.9 – Иерархия целей проекта и критерии достижения

Цели проекта:	Создание методики оценки точности статических характеристик нагрузки получаемых экспериментальным путем
Ожидаемые результаты проекта:	Методика по оценке точности СХН, применяемая для расчетных СХН по экспериментальным данным
Критерии приемки результата проекта:	Адекватность результатов оценки точности расчетных СХН по экспериментальным данным. Соответствие результата применения методики к расчетным СХН по экспериментальным данным здравому смыслу
Требование к результату проекта:	Наличие методики оценки точности статических характеристик нагрузки полученных экспериментальным путем
	Обоснованность методики
	Применимость методики для оценки точности СХН рассчитанных по результатам натурного эксперимента

Таблица 4.10 – Календарный план проекта

Код работы (из ИСР)	Название	Длительность, дни	Дата начала работ	Дата окончания работ	Состав участников (ФИО ответственных исполнителей)
1	Подбор литературы и материалов по теме исследования	60	01.09.14	31.10.14	Научный руководитель и магистрант
2	Анализ литературы и материалов по теме исследования	120	01.11.14	28.02.15	Магистрант совместно с научным руководителем
3	Поиск проблемы исследования	15	01.03.15	15.03.15	Научный руководитель и магистрант
4	Планирование основного вычислительного эксперимента	30	16.03.15	15.04.15	Магистрант совместно с научным руководителем
5	Выполнение основного вычислительного эксперимента	45	16.04.15	31.05.15	Магистрант
6	Анализ и обобщение результатов основного вычислительного эксперимента	60	01.06.15	31.09.15	Магистрант
7	Написание статьи по теме исследования	90	01.10.15	31.12.15	Научный руководитель и магистрант
8	Публикация статьи	90	01.01.16	31.03.16	Научный руководитель
9	Планирование типовых вычислительных экспериментов	15	01.10.15	15.10.15	Магистрант
10	Выполнение типовых	15	16.10.15	31.10.15	Магистрант

	вычислительных экспериментов				
11	Анализ и обобщение результатов типовых вычислительных экспериментов	60	01.11.15	31.12.15	Магистрант
12	Составление отчета	120	01.01.16	30.03.16	Магистрант
13	Проверка отчета	15	01.04.16	15.04.16	Научный руководитель
14	Правки пояснительной записки в соответствии с замечаниями	30	16.04.16	15.05.16	Магистрант
15	Подготовка доклада и иллюстративного материала	7	16.05.16	22.05.16	Магистрант

Таблица 4.11 – Календарный план-график проведения НИ

Код работы (из ИСР)	Исполнители	Т _к , кал. дн.	Продолжительность выполнения работ																			
			Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь
1	Магистрант и руководитель	60	■	■																		
2	Магистрант и руководитель	120			■	■	■	■														
3	Магистрант и руководитель	15							■													
4	Магистрант и руководитель	30							■	■												
5	Магистрант	45								■	■											
6	Магистрант	60										■	■	■								
7	Магистрант и руководитель	90												■	■	■						
8	Руководитель	90															■	■	■			
9	Магистрант	15												■								
10	Магистрант	15												■								
11	Магистрант	60													■	■	■					
12	Магистрант	105															■	■	■	■		
13	Руководитель	15																		■		
14	Магистрант	30																		■	■	
15	Магистрант	7																			■	

4.8. Бюджет научного исследования

При планировании бюджета научного исследования должно быть обеспечено полное и достоверное отражение всех видов планируемых расходов, необходимых для его выполнения.

Таблица 4.12 – Расчет затрат по статье «Спецоборудование для научных работ»

№ п/п	Наименование оборудования	Количество единиц оборудования	Цена единицы оборудования, тыс. руб.	Общая стоимость оборудования, тыс. руб.
1	MathCad (лицензия 1 год)	2	6 984.00	13 968.00
2	MS Office 2010	1	2 429,58	2 429,58
	Итого			16 397,58

Так как приобретается программное обеспечение, то затраты на его доставку и монтаж не требуются. Все статьи расходов на приобретение программного обеспечения могут не учитываться за счет отсутствия необходимости покупать из-за наличия в учебных аудиториях 8 корпуса ТПУ.

Таблица 4.13 – Расчет основной заработной платы

№ п/п	Наименование этапов	Исполнители по категориям	Трудоем кость, чел.-час.	Заработная плата, приходящаяся на 1 чел.-час., тыс. руб.	Всего заработная плата по окладу, тыс. руб.
1	Подбор литературы и материалов по теме исследования	Руководитель	12	0,217	2,604
2	Анализ литературы и материалов по теме	Руководитель	24	0,217	5,208

	исследования				
3	Поиск проблемы исследования	Руководитель	4	0,217	0,868
4	Планирование основного вычислительного эксперимента	Руководитель	6	0,217	1,302
5	Написание статьи по теме исследования	Руководитель	9	0,217	1,953
6	Проверка отчета	Руководитель	3	0,217	0,651
	Итого				12,586

Примечание: работа руководителя над НИ не представляет собой полный выполняемый объем работ. Потому представление трудоемкости в чел.-дн. не корректно.

Месячный должностной оклад работника:

$$Z_m = Z_b \cdot (k_{пр} + k_d) \cdot k_p$$

$$Z_m = 23264,86 \cdot (1 + 0) \cdot 1,3 = 30244,32 \text{ руб.} \quad (4.1)$$

где Z_b – базовый оклад, руб.;

$k_{пр}$ – премиальный коэффициент;

k_d – коэффициент доплат и надбавок;

k_p – районный коэффициент, равный 1,3 (для Томска).

Среднедневная зарплата рассчитывается по формуле:

$$Z_{дн} = \frac{Z_m \cdot M}{F_d}$$

$$Z_{дн} = \frac{30244,32 \cdot 11,2}{224} = 1512,22 \text{ руб.} \quad (4.2)$$

где M – количество месяцев работы без отпуска в течение года:

при отпуске в 24 раб. дней $M = 11,2$ месяца, 5-дневная неделя;

при отпуске в 48 раб. дней $M = 10,4$ месяца, 6-дневная неделя;

F_d – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб. дн.

Таблица 4.14 – Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Руководитель
Календарное число дней	365
Количество нерабочих дней	
- выходные дни	104
- праздничные дни	9
Потери рабочего времени	
- отпуск	24
- невыходы по болезни	
Действительный годовой фонд рабочего времени	228

В расчете на 8 часовой рабочий день получаем среднечасовую оплату труда,

$$З_{\text{ч}} = \frac{З_{\text{дн}}}{8} = \frac{1512,22}{8} = 189,03 \text{ руб.} \quad (4.3)$$

Дополнительная заработная плата рассчитывается исходя из 10 - 15% от основной заработной платы, работников, непосредственно участвующих в выполнение темы [15].

$$\begin{aligned} З_{\text{доп}} &= k_{\text{доп}} \cdot З_{\text{осн}} \\ З_{\text{доп}} &= 0,15 \cdot 189,03 = 28,35 \text{ руб} \end{aligned} \quad (4.4)$$

где $З_{\text{доп}}$ – дополнительная заработная плата, руб.;
 $k_{\text{доп}}$ – коэффициент дополнительной зарплаты;
 $З_{\text{осн}}$ – основная заработная плата, руб.

Статья включает основную заработную плату работников, непосредственно занятых выполнением проекта, (включая премии, доплаты) и дополнительную заработную плату.

$$\begin{aligned} З_{\text{зп}} &= З_{\text{осн}} + З_{\text{доп}} \\ З_{\text{зп}} &= 189,03 + 28,35 = 217,38 \text{ руб} \end{aligned} \quad (4.5)$$

Статья расходов отчисления на социальные нужды отчисления во внебюджетные фонды

$$\begin{aligned} C_{\text{внеб}} &= k_{\text{внеб}} \cdot Z_{\text{зп}} \\ C_{\text{внеб}} &= 0,3 \cdot 217,38 = 65,21 \text{ руб} \end{aligned} \quad (4.6)$$

В статью научные и производственные командировки включаются расходы по командировкам научного и производственного персонала, связанного с непосредственным выполнением конкретного проекта, величина которых принимается в размере 10% от основной и дополнительной заработной платы всего персонала, занятого на выполнении данной темы [15].

$$\begin{aligned} C_{\text{ком}} &= k_{\text{ком}} \cdot Z_{\text{зп}} \\ C_{\text{ком}} &= 0,1 \cdot 217,38 = 21,74 \text{ ру} \end{aligned} \quad (4.7)$$

В статью накладные расходы включаются затраты на управление и хозяйственное обслуживание, которые могут быть отнесены непосредственно на конкретную тему. Кроме того, сюда относятся расходы по содержанию, эксплуатации и ремонту оборудования, производственного инструмента и инвентаря, зданий, сооружений и др. В расчетах эти расходы принимаются в размере 70 - 90 % от суммы основной заработной платы научно-производственного персонала данной научно-технической организации.

Расчет накладных расходов ведется по следующей формуле [15]:

$$\begin{aligned} C_{\text{накл}} &= k_{\text{накл}} \cdot Z_{\text{зп}} \\ C_{\text{накл}} &= 0,7 \cdot 217,38 = 152,17 \text{ руб} \end{aligned} \quad (4.8)$$

Таблица 4.15 – Группировка затрат по статьям

Вид работ	Статьи					
	Основная зарботная плата, руб	Дополнительная зарботная плата, руб	Отчисления на социальные нужды, руб	Научные и производственны е командировки, руб	Накладные расходы, руб	Итого плановая себестоимость, руб
Подбор литературы и материалов по теме исследования	2268,36	340,2	782,52	260,88	1826,04	5478
Анализ литературы и материалов по теме исследования	4536,72	680,4	1565,04	521,76	3652,08	10956
Поиск проблемы исследования	756,12	113,4	260,84	86,96	608,68	1826
Планирование основного вычислительного эксперимента	1134,18	170,1	391,26	130,44	913,02	2739
Написание статьи по теме исследования	1701,27	255,15	586,89	195,66	1369,53	4108,5
Проверка отчета	567,09	85,05	195,63	65,22	456,51	1369,5
Итого, руб						26477

4.9. Заключение по разделу

Произведен предпроектный анализ, составлена структура работ в рамках технического проектирования.

Произведенный FAST-анализ, и составленная функционально-стоимостная диаграмма позволили выявить отсутствие явных диспропорций между важностью функций и затратами на них.

В процессе SWOT-анализа сделаны выводы об необходимых действиях с целью развития проекта.

На основе причинно-следственной диаграммы Исикава изучены причины возникновения расчетных погрешностей, указывающих на невозможность использования результатов расчета статических характеристик нагрузки для практического применения.

Готовность проекта к коммерциализации недостаточен, как и уровень знаний для ее осуществления.

Приведен бюджет научного проекта.

СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ

Местом выполнения исследований является учебная аудитория, оборудованная персональным компьютером (ПК). В разделе социальная ответственность в качестве рабочей зоны рассмотрена учебная аудитория 253 корпуса 8 ТПУ оборудованная ПК.

5.1. Техногенная безопасность

Аудитория 253 восьмого корпуса ТПУ является помещением линейными размерами 5х10 м, высотой 3 м, находится на втором этаже здания. Имеется окна, в которые проникает солнечный свет. С противоположной от окна стороны находится дверной проем. Кабинет оборудован восемью светильниками общего освещения. Аудитория располагает шестью рабочими местами, оборудованными персональными компьютерами. Расположение элементов рабочей зоны приведено на рисунке 5.1.

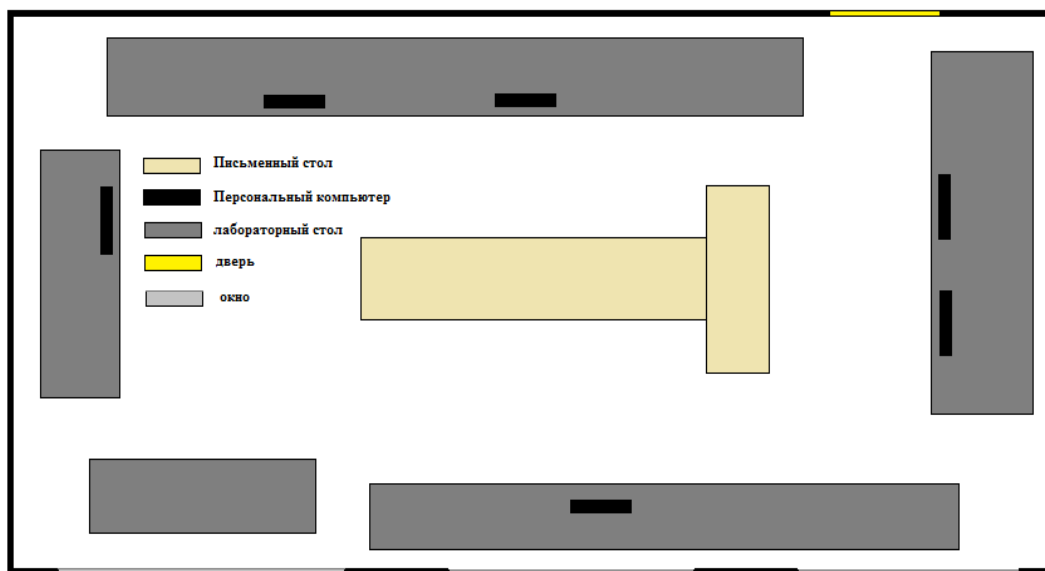


Рисунок 5.1 – План аудитории 253 восьмого корпуса ТПУ

В параграфе «Техногенная безопасность» необходимо проанализировать факторы рабочей зоны на предмет выявления их вредных и опасных проявлений. К первой группе факторов относят микроклимат помещения, освещение рабочей зоны, электромагнитное поле и шум, а также

психофизические факторы. В качестве второй группы необходимо рассмотреть возможность поражения электрическим током.

5.1.1. Освещение

Большее количество информации внешнего мира воспринимается человеком через зрительные органы. Качество восприятия информации зависит в большой степени от освещенности зоны, в которой находится человек. В случае, если освещение является неудовлетворительным, возможно искажение получаемой информации, утомление зрения и организма в целом, причинение травм вследствие потери ориентации, снижение производительности труда [1].

Одним из основных количественных показателей, характеризующих освещение, является освещенность – это поверхностная плотность светового потока. Единица освещенности – люкс (лк). Один лк – это освещенность 1 м^2 поверхности при падении на нее светового потока в 1 лм.

При освещении производственных помещений используют естественное освещение, создаваемое прямыми солнечными лучами и рассеянным светом небосвода, искусственное освещение, создаваемое электрическими источниками света, и комбинированное освещение, при котором недостаточное по нормам естественное освещение дополняют искусственным. В случае данной рабочей зоны естественное освещение чрезвычайно мало, поэтому выбору искусственного освещения уделено высокое внимание [2].

Освещение в помещениях регламентируется нормами в зависимости от характера зрительной работы, системы и вида освещения, фона, контраста объекта с фоном. Характеристика зрительной работы определяется наименьшим размером объекта различения. Основной задачей светотехнических расчётов для искусственного освещения является определение требуемой мощности электрической осветительной установки

для создания заданной освещённости. В расчётном задании должны быть решены вопросы выбора и расчета [3]:

- системы освещения;
- источников света;
- светильников и их размещение;
- нормируемой освещённости;
- освещения методом светового потока.

Выбор системы освещения. Для производственных помещений всех назначений применяются системы общего (равномерного или локализованного) и комбинированного (общего и местного) освещения. Система комбинированного освещения применяется для производственных помещений, в которых выполняются точные зрительные работы. Для данной рабочей зоны рассчитывается общее равномерное освещение.

Выбор источников света. Источники света, применяемые для искусственного освещения, делят на две группы – газоразрядные лампы и лампы накаливания. Для общего освещения, как правило, применяются газоразрядные лампы как энергетически более экономичные и обладающие большим сроком службы. Наиболее распространёнными являются люминесцентные лампы. Выбираем люминесцентные лампы стандартной цветопередачи T8 G13, диаметром 26 мм фирмы Philips [4].

Выбор светильников и их размещение. Светильник – прибор, перераспределяющий свет ламп внутри больших телесных углов и обеспечивающий угловую концентрацию светового потока. При выборе типа светильников следует учитывать светотехнические требования, экономические показатели, условия среды. Выбираем светильник накладной WRS/S, крепящийся на поверхность потолка, под люминесцентную лампу 26 мм (T8 G13), мощностью 4x18 Вт, производитель «Световые Технологии» [5]. Параметры светильника: 610x625x80 мм.

Размещение светильников в помещении определяется следующими размерами:

- $H=2,8$ – высота помещения, м;
- $h_c=0,08$ – расстояние светильников от перекрытия (свес), м;
- $h_n = H - h_c=2,72$ – высота светильника над полом, высота подвеса, м;
- $h_p=0,7$ – высота рабочей поверхности над полом, м;
- $h = h_n - h_p = 2,02$ – расчётная высота, высота светильника над рабочей поверхностью, м;
- L – расстояние между соседними светильниками или рядами (если по длине (А) и ширине (В) помещения расстояния различны, то они обозначаются L_A и L_B),
- l – расстояние от крайних светильников или рядов до стены.
- Оптимальное расстояние l от крайнего ряда светильников до стены рекомендуется принимать равным $L/3$.

Наилучшими вариантами равномерного размещения светильников являются шахматное размещение и по сторонам квадрата (расстояния между светильниками в ряду и между рядами светильников равны). Разместим светильники по сторонам квадрата.

При равномерном размещении люминесцентных светильников последние располагаются обычно рядами – параллельно рядам оборудования. Интегральным критерием оптимальности расположения светильников является величина $\lambda = L/h$ – наивыгоднейшее расстояние между осветительными приборами, уменьшение которого удорожает устройство и обслуживание освещения, а чрезмерное увеличение ведёт к резкой неравномерности освещённости. Эта величина зависит от кривая силы света светильника. Для косинусной кривой силы света (кривая типа Д), характерной для выбранного светильника, $\lambda = 1,2 \dots 1,6$. Принимаем $\lambda = 1,4$.

Расстояние между светильниками L определяется как:

$$L = \lambda \cdot h = 1,4 \cdot 2,02 = 2,83 \text{ м.} \quad (5.1)$$

Расстояние от крайних светильников или рядов до стены:

$$l = L/3 = \lambda \cdot h = 1,4 \cdot 2,02 = 0,94 \text{ м.} \quad (5.2)$$

Количество рядов светильников и светильников в рядку одинаково (по причине квадратной формы помещения) определим по формуле:

$$N = M = \frac{A}{L} = \frac{5}{2,83} = 1,77 \approx 2, \quad (5.3)$$

где A – ширина помещения;

L – расстояние между светильниками.

Общее количество светильников равно:

$$n = N^3 = 2 \cdot 2 \cdot 2 = 8. \quad (5.4)$$

Выбор нормируемой освещённости. Основные требования и значения нормируемой освещённости рабочих поверхностей изложены в СНиП 23-05-95 [6]. Выбор освещённости осуществляется в зависимости от размера объёма различения (толщина линии, риски, высота буквы), контраста объекта с фоном, характеристики фона.

В соответствии с требованиями по работе ПК, при работе с экраном в сочетании с работой над документами наиболее оптимальной для работы с экраном является освещённость 300 лк [7].

Расчёт общего равномерного освещения.

Расчёт общего равномерного искусственного освещения горизонтальной рабочей поверхности выполняется методом коэффициента светового потока, учитывающим световой поток, отражённый от потолка и стен. Световой поток лампы накаливания или группы люминесцентных ламп светильника определяется по формуле [2]:

$$\Phi = \frac{E_n \cdot S \cdot K_3 \cdot z}{N \cdot n \cdot \eta} \cdot 100 = \frac{300 \cdot 50 \cdot 1,5 \cdot 1,1}{4 \cdot 8 \cdot 53} \cdot 100 = 1459 \text{ лм,} \quad (5.5)$$

где E_n – нормируемая минимальная освещённость, лк;

S – площадь освещаемого помещения, м²;

K_3 – коэффициент запаса, учитывающий загрязнение светильника, наличие в атмосфере цеха дыма, пыли; для помещения с малым выделением пыли принимаем равным 1,5 [3];

z – коэффициент неравномерности освещения, отношение $E_{\text{ср.}}/E_{\text{min}}$; для люминесцентных ламп при расчётах берётся равным 1,1;

N – число ламп в светильнике, шт;

n – число светильников;

η – коэффициент использования светового потока, %.

Коэффициент использования светового потока показывает, какая часть светового потока ламп попадает на рабочую поверхность. Он зависит от индекса помещения i , типа светильника, высоты светильников над рабочей поверхностью h и коэффициентов отражения стен ρ_c и потолка ρ_n .

Индекс помещения определяется по формуле:

$$i = \frac{S}{h \cdot (A + B)} = 1,238. \quad (5.6)$$

Коэффициенты отражения оцениваются субъективно $\rho_c=50\%$ и потолка $\rho_n=30\%$. Значения коэффициента использования светового потока η светильников с люминесцентными лампами примем равным 53 % [3].

Рассчитав световой поток Φ , зная тип лампы, выбираем ближайшую стандартную лампу – Philips TL-D 18W/54-765 мощностью 18 Вт. Характеристики такого типа ламп приведены в таблице 1 [4].

Таблица 5.1 – Характеристики выбранного типа ламп

Артикул	Мощность, Вт	Световой поток, Лм	Цветовая температура, К	Цоколь	L, мм	D, мм	Производитель
TL-D 18W/54-765	18	1450	6500	G13	590	26	Philips

Проведенный расчет вполне соответствует реализованному в настоящее время варианту освещения в помещении – четыре светильника с четырьмя люминесцентными лампами по 18 Вт каждая. Приведем план расположения светильников в помещении в соответствии с расчетом (рисунок 5.2).

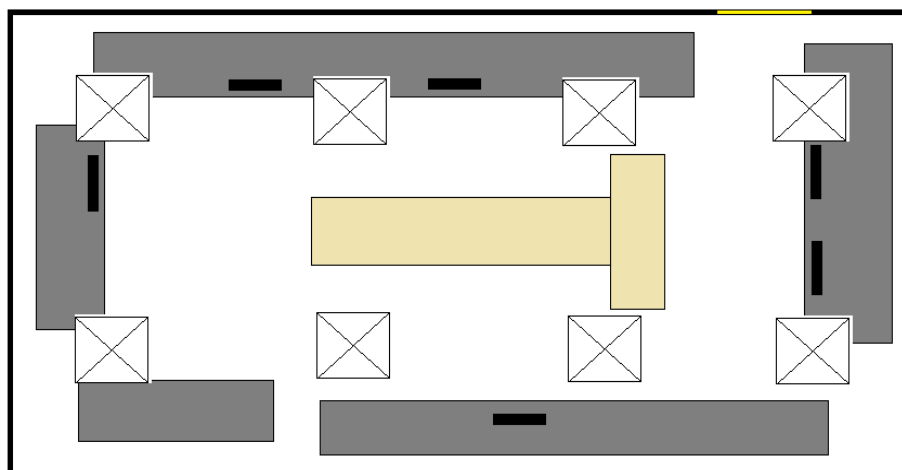


Рисунок 5.2 – План размещения светильников в помещении

5.1.2. Шум

Шум — беспорядочные колебания различной физической природы, отличающиеся сложностью временной и спектральной структуры. Длительное воздействие шума может привести к ухудшению слуха, а в отдельных случаях – к глухоте. Шумовое загрязнение среды на рабочем месте неблагоприятно воздействует на работающих: снижается внимание, увеличивается расход энергии при одинаковой физической нагрузке, замедляется скорость психических реакций и т.п. В результате снижается производительность труда и качество выполняемой работы.

Уровни шума на рабочих местах пользователей персональных компьютеров не должны превышать значений, установленных СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 и СН 2.2.4/2.1.8.562-96 [7, 8]. Рабочая зона соотносится с категорией «Высококвалифицированная работа, требующая сосредоточенности, административно-управленческая деятельность, измерительные и аналитические работы в лаборатории; рабочие места в помещениях цехового управленческого аппарата, в рабочих комнатах конторских помещений, в лабораториях». Предельно допустимые уровни звукового давления, уровни звука и эквивалентные уровни звука для такой категории приведены в таблице 2 [8].

Таблица 5.2 – Предельно допустимые уровни звукового давления, уровни звука и эквивалентные уровни звука

Уровни звукового давления в октавных полосах со среднегеометрическими частотами									Уровни звука в дБА
31,5 Гц	63 Гц	125 Гц	250 Гц	500 Гц	1000 Гц	2000 Гц	4000 Гц	8000 Гц	
93 дБ	79 дБ	70 дБ	68 дБ	58 дБ	55 дБ	52 дБ	52 дБ	49 дБ	60

Приведем уровни шума источников в помещения (дБ): жесткий диск – 40, вентилятор – 45, монитор – 17, клавиатура – 10, ноутбук – 40, МФУ – 42.

Для расчета уровня шума, возникающего от нескольких источников, используется принцип энергетического суммирования излучений отдельных источников [2]:

$$L = 10 \lg \sum_{i=1}^n 10^{0.1L_i} \quad (5.7)$$

$$L = 10 \lg(5 \cdot 10^{0.140} + 5 \cdot 10^{0.145} + 5 \cdot 10^{0.117} + 5 \cdot 10^{0.110} + 10^{0.140} + 2 \cdot 10^{0.142}) = 53,98 \text{ дБА}$$

где L_i – уровень звукового давления i -го источника шума;

n – количество источников шума.

По расчету получено значение звука в помещении ~54 дБА, которое не превышает предельно установленную величину в 60 дБА, что говорит о соблюдении уровня шума в рабочей зоне. Дополнительно снизить уровень шума в помещениях можно использованием звукопоглощающих материалов с максимальными коэффициентами звукопоглощения в области частот 63-8000 Гц для отделки стен и потолка помещений. Также звукопоглощающий эффект создают однотонные занавески из плотной ткани, повешенные в складку на расстоянии 15-20 см от ограждения. Ширина занавески должна быть в 2 раза больше ширины окна [9].

5.1.3. Микроклимат

Под микроклиматом производственных помещений понимается климат окружающей человека внутренней среды этих помещений, который определяется действующими на организм человека сочетаниями температуры, влажности и скорости движения воздуха, а также температуры окружающих

его поверхностей. Перечисленные параметры – каждый в отдельности и в совокупности – оказывают влияние на работоспособность человека, его здоровье. Человек постоянно находится в процессе теплового взаимодействия с окружающей средой. Для нормального течения физиологических процессов в организме человека необходимо, чтобы выделяемое организмом тепло отводилось в окружающую среду. Когда это условие соблюдается, наступают условия комфорта и у человека не ощущается беспокоящих его тепловых ощущений - холода или перегрева [2, 9].

В соответствии с [7, 10], параметрами, характеризующими микроклимат, являются:

- температура воздуха;
- температура поверхностей;
- относительная влажность воздуха;
- скорость движения воздуха;
- интенсивность теплового облучения.

Тип работ, выполняемых в рассматриваемом помещении, относится к категории Ia. Это работы с интенсивностью энергозатрат до 120 ккал/ч (до 139 Вт), производимые сидя и сопровождающиеся незначительным физическим напряжением. Оптимальные величины показателей микроклимата приведены таблице 5.3 [10].

Таблица 5.3 – Оптимальные величины показателей микроклимата на рабочих местах производственных помещений

Период года	Категория работ по уровню энергозатрат	Температура воздуха, °С	Температура поверхностей, °С	Относительная влажность воздуха, %	Скорость движения воздуха, м/с
Холодный	Ia	22-24	21-25	60-40	0,1
Теплый	Ia	23-25	22-26	60-40	0,1

Оптимальные параметры микроклимата в производственных помещениях обеспечиваются системами кондиционирования воздуха, а допустимые параметры — обычными системами вентиляции и отопления [9].

5.1.4. Электромагнитное поле

Электромагнитное поле – это особая форма материи, представляющая собой взаимосвязанные электрическое и магнитное поля. Основными источниками электромагнитных полей в помещении являются системы распределения и потребления электроэнергии; средства визуального отображения информации (мониторы); оборудование на электропитании. Фактически основанным источником электромагнитного излучения является ПК, частоты излучения приведены в таблице 4 [9]. Экспериментальные данные как отечественных, так и зарубежных исследователей свидетельствуют о высокой биологической активности электромагнитных полей во всех частотных диапазонах. При относительно высоких уровнях облучающего электромагнитного поля современная теория признает тепловой механизм воздействия. При относительно низком уровне электромагнитного поля (к примеру, для радиочастот выше 300 МГц это менее 1 мВт/см²) принято говорить о нетепловом или информационном характере воздействия на организм. Механизмы действия электромагнитного поля в этом случае еще мало изучены.

Таблица 5.4 – ПК как источник электромагнитных полей

Источник	Диапазон частот
Монитор: - сетевой трансформатор блока питания - статический преобразователь напряжения в импульсном блоке питания - блок кадровой развертки и синхронизации - блок кадровой развертки и синхронизации - ускоряющее анодное напряжение монитора (только для мониторов с ЭЛТ)	50 Гц 20 - 100 кГц 48 - 160 Гц 15 - 110 кГц 0 Гц (электростатика)
Системный блок (процессор)	50 Гц - 1000 МГц
Устройства ввода/вывода информации	0 Гц, 50 Гц
Источники бесперебойного питания	50 Гц, 20 - 100 кГц

В России система стандартов по электромагнитной безопасности складывается из ГОСТ [11, 12, 13] и СанПиН. Предельно допустимые значения плотности потока энергии электромагнитного поля составляют – 25 мкВт/см²

в течение 8 часов, 100 мкВт/см^2 в течение 2 часов, при этом максимальное значение не превышает 1000 мкВт/см^2 .

ЭМ поле с частотой от 60 кГц до 300 МГц нормируются отдельно по электрической и по магнитной составляющей, т.к. на этих частотах на человека действуют и электрическое, и магнитное поле. Для полей СВЧ диапазона (300 МГц - 300 ГГц) нормируют предельно-допустимую плотность потока энергии, которая не должна превышать 10 Вт/м^2 . Предельно допустимые уровни электромагнитного поля для ПК приведены в таблице 5.5.

Таблица 5.5 – Предельно допустимые уровни электромагнитного поля

Источник	Диапазон	Значение ПДУ
Видеодисплейный терминал ПЭВМ	5 Гц - 2 кГц	$E_{\text{пду}} = 25 \text{ В/м}$ $B_{\text{пду}} = 250 \text{ нТл}$
	2 - 400 кГц	$E_{\text{пду}} = 2,5 \text{ В/м}$ $B_{\text{пду}} = 25 \text{ нТл}$
	поверхностный электростатический потенциал	$V = 500 \text{ В}$

5.2. Психофизические факторы

Психофизиологические опасные и вредные производственные факторы по характеру действия подразделяются на физические перегрузки и нервно-психические перегрузки.

В случае работы за ПК имеет место статическая физическая нагрузка, связанная с нахождением в вынужденной позе. При проектировании рабочего места следует учитывать, что фиксированная рабочая поза физиологически не оправдана, так как она вызывает нарушение кровообращения в нижних конечностях и органах тазовой области, приводящие к профессиональным заболеваниям (варикозному расширению вен, геморрою и др.).

Отрицательно на состояние здоровья работающих отражается гиподинамия - нарушение функций организма (опорно-двигательного аппарата, кровообращения, дыхания, пищеварения и др.) при ограниченной двигательной активности, снижении сил сопротивления мышц. Профилактика гиподинамии предусматривает исключение статической работы, изменение

рабочей позы в процессе работы, проведение производственной гимнастики с рациональным комплексом физических упражнений и т.п. [2,9].

Труд оператора ПЭВМ относится к формам труда с высоким нервно-эмоциональным напряжением. Это обусловлено необходимостью постоянного слежения за динамикой изображения, различения текста рукописных и печатных материалов, выполнением машинописных и графических работ. В процессе работы требуется постоянно поддерживать активное внимание. В этом случае помогает организация комнат психологической разгрузки, способствующих снижению усталости и повышению производительности труда работающих, улучшает их настроение, что в конечном счете способствует сохранению их работоспособности и обеспечению охраны труда.

5.2.1. Электробезопасность

Электробезопасность – система организационных мероприятий и технических средств, предотвращающих вредное и опасное воздействие на работающих электрического тока и электрической дуги. Современное производство характеризуется широким применением различных электроустановок. В этой связи большое значение в общей системе инженерно-экологических мероприятий приобретают вопросы обеспечения электробезопасности. В данном помещении присутствуют только электроустановки напряжением до 1кВ. По электробезопасности помещение относится к первому классу – помещения без повышенной опасности (сухое, хорошо отапливаемое, помещение с токонепроводящими полами, с температурой 18—20°, с влажностью 40—50%) [13].

Большинство специалистов и исследователей в области электробезопасности указывают на термические, электролитические, механические, биологические действия, которые производит электрический ток, проходя через организм человека.

Основными техническими средствами защиты, согласно Правилам устройства электроустановок являются защитное заземление, автоматическое

отключение питания, устройства защитного отключения. Наличие таких средств защиты предусмотрено в рабочей зоне. Периодически проводится инструктаж работников по технике безопасности [14].

5.3. Экологическая безопасность работы

Состояние экологической безопасности работы контролируется региональными органами санитарно-эпидемиологического надзора и экологической экспертизы.

Охрана атмосферного воздуха включает выполнение требований по предельно допустимым концентрациям (ПДК) вредных веществ в атмосфере воздуха территории корпусов. Величины ПДК принимаются согласно [7] в зависимости от места, для которого определяется концентрация веществ.

Согласно [8] уровень шума на территории корпусов не должен превышать 60 дБА и согласно [9] уровень шума на территории, непосредственно прилегающей к зоне жилой застройки, - 45 дБА. Для обеспечения требований по уровню шума должны предусматриваться необходимые устройства шумоглушения, либо корпуса должны размещаться на соответствующем расстоянии от зоны жилой застройки.

Основными источниками загрязнения гидросферы являются сбрасываемые сточные воды. Загрязнение воды обуславливает подавление функций экосистем, замедляет естественные процессы биологической очистки пресных вод, а также способствует изменению химического состава пищи и организма человека. Гигиенические и технические требования к источникам водоснабжения и правила их выбора в интересах здоровья населения регламентируются документами.

Твердые отходы, появляющиеся в результате монтажа, наладки и ввода в работу оборудования, ремонтов (части кабелей, изоляции, неисправные крепежные изделия), неподдающееся ремонту оборудование, непригодные для дальнейшего использования порошки, бытовой мусор, лом черных и цветных металлов согласно [4] удаляются в мусорные контейнеры, установленные возле корпусов, а затем вывозятся мусоровозным транспортом

на полигон. Нормирование химического загрязнения почв проводится по предельно допустимым концентрациям ПДК в соответствии с [10].

5.4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Пожарная безопасность

Чрезвычайно высокие потоки негативных воздействий создают чрезвычайные ситуации (ЧС), которые изменяют допустимое состояние среды обитания и переводят жизнедеятельность в условия высокой травмоопасности или гибели. При ЧС на первое место выходят задачи защиты от высоких уровней негативного воздействия, ликвидации последствий, реабилитации пострадавших и восстановления повседневной жизнедеятельности.

Одним из наиболее распространенных и опасных видов ЧС является пожар. Пожаром называется неконтролируемое горение вне специального очага. Пожары причиняют значительный материальный ущерб, в ряде случаев вызывают тяжелые травмы и гибель людей. Основополагающими законодательными актами в области пожарной безопасности являются Федеральные законы "О пожарной безопасности" и "Технический регламент о требованиях пожарной безопасности" определяющие общие правовые, экономические и социальные основы обеспечения пожарной безопасности в Российской Федерации [15, 16].

Как известно для возникновения пожара или взрыва необходим источник воспламенения. Наиболее распространенными являются источники электрического происхождения. Устойчивость функционирования объекта при возникновении пожара зависит от огнестойкости элементов оборудования и зданий, от их конструктивной и функциональной пожарной опасности, от наличия на объекте средств локализации и тушения пожаров и возможностей их своевременного применения. Технический регламент о требованиях пожарной безопасности регламентирует классификацию зданий по степени огнестойкости, конструктивной и функциональной пожарной опасности. Учебные заведения относятся к классу Ф 4.1. По пожарной опасности помещение и здание возможно отнести к классу Д, т.е. к

помещениям, в которых находятся (обращаются) негорючие вещества и материалы в холодном состоянии.

К основным видам техники, предназначенной для защиты различных объектов от пожаров, относятся средства сигнализации и пожаротушения. В 8 корпусе предусмотрена электрическая пожарная сигнализация. Она должна быстро и точно сообщать о пожаре с указанием места его возникновения. Сигнализация обеспечивает также автоматический ввод в действие предусмотренных на объекте средств пожаротушения и дымоудаления.

Наиболее широко применяемым средством тушения является вода. Для этого в 8 корпусе существуют пожарные краны. В качестве первичных средств пожаротушения используют огнетушители. В качестве огнетушителей в корпусе распространены огнетушители углекислотные ОУ-5. Преимущества углекислотных огнетушителей: эффективность тушения жидких и газообразных веществ и электроустановок под напряжением до 1000 В; отсутствие следов тушения; диапазон рабочих температур от -40°С до +50 °.

Важную роль при возникновении ЧС играет успешная эвакуация людей. Для чёткого обозначения пути эвакуации, эвакуационных выходов, обеспечивающих безопасность процесса организованного самостоятельного движения людей из помещений, указания расположения пожарного оборудования и средств оповещения о пожаре и напоминания о первоочередных действиях при пожаре применяется план эвакуации. Разработка плана эвакуации людей в случае пожара, инструкции к нему, устройство системы оповещения людей о пожаре в школах, а также назначение лиц имеющих право на её включение регламентированы п.п. 16,17,102 ППБ 01-03 [17]. План эвакуации для правого крыла второго этажа восьмого корпуса, в где находится рассматриваемое помещение, изображенное на рисунке 5.3.



Рисунок 5.3 – План эвакуации

5.5. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

Безопасность в любой сфере жизнедеятельности является объектом правового регулирования и правовой защиты. Безопасность регламентируется множеством законов, кодексов, постановлений и иных нормативных правовых актов, в том числе и международных. Все они базируются на Конституции России и корректируются в соответствии с действующей в настоящее время Стратегией национальной безопасности до 2020 года.

Руководящим федеральным органом исполнительной власти управляющим охраной труда является министерство труда и социальной защиты Российской Федерации (Минтруд России). Оно осуществляет функции по выработке государственной политики и нормативно-правовому регулированию в сфере демографии, труда, уровня жизни и доходов, оплаты труда, пенсионного обеспечения, включая негосударственное пенсионное обеспечение, социального страхования, условий и охраны труда, социальной защиты и социального обслуживания населения, а также по управлению государственным имуществом и оказанию государственных услуг в установленной сфере деятельности.

Помимо Конституции РФ другими источниками права в области обеспечения безопасности жизнедеятельности в техносфере являются:

- федеральные законы;
- указы Президента Российской Федерации;
- постановления Правительства Российской Федерации;
- приказы, директивы, инструкции, наставления и другие нормативные акты министерств и ведомств;
- правовые акты субъектов Российской Федерации и муниципальных образований (указы, постановления);
- приказы (распоряжения) руководителей организаций (учреждений, объектов).

Разработкой документации в области обеспечения безопасности жизнедеятельности занимаются следующие органы:

- гигиенические нормативы (ГН), санитарные нормы (СН), санитарные правила (СП) - Министерство труда Российской Федерации (Минтруд России);
- санитарные правила и нормы (СанПиНы) - Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека (Роспотребнадзор);
- государственные стандарты (ГОСТ) - Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии (Росстандарт);
- строительные нормы и правила (СНиП) - Министерство экономического развития Российской Федерации (Минэкономразвития России);
- на уровне отраслей разрабатываются ОСТы, правила и т.д.

Также ряд функций возложено на Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации (Минприроды России), Федеральную службу по экологическому, технологическому и атомному надзору (Ростехнадзор) и специально уполномоченные органы управления по отдельным направлениям обеспечения безопасности жизнедеятельности в техносфере.

Надзором за соблюдением рассматриваемых законов занимается Генеральный прокурор РФ и местные органы прокуратуры. Также вопросами соблюдения законодательства по безопасности труда занимаются профсоюзы РФ. Для осуществления этого контроля в организации создаются службы охраны труда (ОТ), которые совместно с профсоюзом проверяют состояние производственных условий для работающих, проверяют выполнение подразделениями обязанностей в области охраны труда. Лица, которые осуществляют данный контроль, назначаются приказом по административному подразделению. Руководитель организации несет ответственность за безопасность труда во всех подразделениях.

В задачи службы охраны труда входят [17]:

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.

Службой охраны труда при участии комитетов профсоюзов разрабатываются инструкции по безопасности труда, которые учитывают специфику работы для различных специальностей. Ими же проводятся инструктажи и обучение правилам техники безопасности работающего персонала.

Различают следующие виды инструктажа:

- вводный – проводится со всеми рабочими до приема на работу;
- первичный на рабочем месте – проводится непосредственно руководителем работ перед допуском к работе и сопровождается показом безопасных приемов работ;
- повторный – проводится не реже чем раз в шесть месяцев с целью восстановления в памяти рабочего инструкции по охране труда, а также разбора нарушений из практики предприятия;
- внеплановый – проводятся в случае изменения правил по охране труда, технологического процесса, нарушения работниками правил техники

безопасности, при несчастном случае, при перерывах в работе – для работ, к которым предъявляются дополнительные требования безопасности труда, – более чем на 30 календарных дней, для остальных работ – 60 дней.

– текущий – проводятся для работников, которые оформляют наряд-допуск на определенные виды работ.

В организации заводятся специальные журналы, в которые вносят результаты всех видов инструктажа. За нарушение всех видов законодательства по безопасности жизнедеятельности предусматриваются в зависимости от тяжести нарушения дисциплинарная, административная уголовная либо материальная ответственности.

Трудовые отношения регулируются трудовым кодексом (ТК). Статьи 2-4 ТК устанавливают основные трудовые права работников, в соответствии с Декларацией прав и свобод человека и Конституцией РФ. В соответствии со статьей № 209 Трудового Кодекса Российской Федерации, рабочее место – это место, где работник должен находиться или куда ему необходимо прибыть в связи с его работой и которое прямо или косвенно находится под контролем работодателя.

Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности рассматривались в соответствии следующим нормативным документам:

1. СНиП 23-05-95;
2. СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03;
3. СН 2.2.4/2.1.8.562-96;
4. СанПиН 2.2.4.548-96;
5. ГОСТ 12.1.002-84;
6. ГОСТ 12.1.006-84;
7. ГОСТ 12.1.045-84;
8. ФЗ от 21.12.1994 N 69-ФЗ (ред. от 12.03.2014);
9. ФЗ от 22.07.2008 N 123-ФЗ.

5.6. Заключение по разделу

В ходе разработки настоящей главы диссертации была описана рабочая зона, выявлены опасные и вредные производственные факторы, а также предложены меры по ограничению их воздействия. Определены наиболее вероятные чрезвычайные ситуации, разработаны меры по предупреждению данных ситуаций, описаны порядок действий при их возникновении. Рассмотрены правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности.

5.7. Список использованных источников по разделу

1. Андриевский Р.А. Наноструктурные материалы: Учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений / Р.А. Андриевский, А.В. Рагуля. – М.: Издательский центр «Академия», 2005. – 192 с.
2. Белов С.В. Безопасность жизнедеятельности / Белов С.В., Ильницкая А.В., Козьяков А.Ф.. – М.: Высшая школа, 2007. – 616 с.
3. Безопасность жизнедеятельности. Расчёт искусственного освещения. Методические указания к выполнению индивидуальных заданий для студентов дневного и заочного обучения всех специальностей. – Томск: Изд. ТПУ, 2008. – 12 с.
4. Люминесцентные лампы стандартной цветопередачи T8 G13, диаметр 26 мм. – Электронный ресурс: <http://svetgrupp.ru/catalog/30/11957>.
5. WRS/S. Светильники с белой экранирующей решеткой. – Электронный ресурс: <http://www.ltcompany.com/model.php?id=138>.
6. СНиП 23-05-95 "Естественное и искусственное освещение". Утв. постановлением Минстроя РФ от 2 августа 1995 г. N 18-78.
7. СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 «Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы». Минздрав России, Москва. – 2003.

8. СН 2.2.4/2.1.8.562-96. Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки. Минздрав России, Москва. – 1996.
9. Новиков С.Г., Маслова Т.Н., Копылова Л.Н. Безопасность жизнедеятельности. Учебно-методический комплекс. Электронный учебник. <http://ftemk.mpei.ac.ru/bgd/>.
10. СанПиН 2.2.4.548-96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений. Минздрав России, Москва. – 1997.
11. ГОСТ12.1.002-84. Электрические поля промышленной частоты. Допустимые уровни напряженности и требования к проведению контроля на рабочих местах. Издательство стандартов, Москва. – 1984.
12. ГОСТ 12.1.006-84. Система стандартов безопасности труда. Электромагнитные поля радиочастот. Допустимые уровни на рабочих местах и требования к проведению контроля. Издательство стандартов, Москва. – 1984.
13. ГОСТ 12.1.045-84. Система стандартов безопасности труда. Электростатические поля. Допустимые уровни на рабочих местах и требования к проведению контроля. Издательство стандартов, Москва. – 1984.
14. Правила устройства электроустановок. Утверждены Приказом Минэнерго России от 08.07.2002 № 204.
15. Федеральный закон от 21.12.1994 N 69-ФЗ (ред. от 12.03.2014) "О пожарной безопасности".
16. Федеральный закон от 22.07.2008 N 123-ФЗ (ред. от 02.07.2013) "Технический регламент о требованиях пожарной безопасности".
17. Правила пожарной безопасности в Российской Федерации. Государственная противопожарная служба, Москва. – 2003.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам анализа технической литературы по теме исследования было принято решение произвести расчет погрешности определения статических характеристик нагрузки на основе результатов вычислительного эксперимента. Был остановлен выбор только на статических характеристиках нагрузки по активной мощности.

Моделируемая нагрузка была максимально упрощена и представлена полиномом второй степени. Вычислительный эксперимент многократно повторялся для статистической достоверности. Были определены параметры эксперимента и экспериментальных данных, вносящие определяющее влияние на точность расчета и представляющие собой факторами возникновения погрешности, а также создан алгоритм расчета погрешности на основе нахождения максимального отклонения расчетной статической характеристики от эталонной.

Полученные результаты в зависимости от факторов возникновения погрешности были аппроксимированы и представлены в виде полинома второй степени.

На основе вычислительного эксперимента по расчету погрешности расчета статических характеристик нагрузки были произведены вычислительный эксперимент по оценке величины погрешности расчета регулирующего эффекта по напряжению.

В процессе исследования остался не решенным однозначно вопрос об диапазоне напряжения, на котором необходимо сравнивать статические характеристики фактическую и полученную на основе эксперимента.

По результатам вычислительного эксперимента была получена зависимость погрешности от диапазона сравнения, представленная в виде полинома второго порядка.

Дополнительно был произведен вычислительный эксперимент по оценке величины погрешности при сравнении характеристик в пределах диапазона изменения напряжения в процессе эксперимента. Полученный

результат показал отсутствие влияния на погрешность диапазона изменения напряжения в процессе эксперимента, при условии определения погрешности только внутри него.

Полученные результаты были применены к статической характеристике, полученной по результатам активного эксперимента. Однозначно не был решен вопрос об применимости расчетной формулы непосредственно к экспериментальным данным, или к данным прошедшим первичную обработку и фильтрацию. В зависимости от области применения расчетной формулы и диапазона сравнения получены результаты отличающиеся сильно по величине.

Полученные расчетные формулы не позволяют точно рассчитать погрешность, но позволяют оценить ее верхнюю границу. Для нахождения соотношения максимальной погрешности с ожидаемой, наиболее вероятной необходимы дополнительные исследования, основанные на более точном моделировании натурального эксперимента, нагрузки и энергосистемы в целом.

Несмотря на возможность определения по формулам лишь верхней границы, в пределах которой лежит отклонение расчетной статической характеристики от фактической, установленные закономерности показывают влияние параметров эксперимента и полученных данных на точность расчетной характеристики.

Погрешность определения статической характеристики посредством метода наименьших квадратов прямо пропорциональна величине среднеквадратического колебания нагрузки, прямо пропорциональна квадратному корню из числа измерений и обратно пропорциональна квадрату диапазона изменения напряжения при эксперименте. В то же время, при сравнении статических характеристик лишь внутри диапазона изменения напряжения при эксперименте, его величина на погрешность не влияет, т.е. без применения экстраполяции диапазон изменения напряжения не вносит влияния на точность расчета статической характеристики.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ

1. Accuracy Estimation of the experimentally obtained Power System Static Load Models, Pankratov Aleksey V., Kopylov Igor E., Tavlintsev Alexander S.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Modelling and Aggregation of Loads in Flexible Power Networks, Working Group C4.605, February 2014
2. Учет статических характеристик нагрузки при расчетах режимов энергосистем, В.Г. Гольдштейн, Д.Н. Дадонов, Е.А. Кротков, М.М. Птичкин
3. Определение статической характеристики крупных узлов нагрузки, А.В. Паздерин, А.А. Суворов, А.С. Тавлинцев, П.В. Чусовитин, А.В. Юдин
4. Определение статических характеристик мощности нагрузок узлов сети на основе активного эксперимента, В.Ф. Кравченко, В.И. Нагай, И.Ф. Бураков, Б.П. Золоев
5. Technique for Field Data Based Identification of Static Polynomial Load Model, Natalia L. Batseva, Aleksey V. Pankratov, Yuriy V. Khrushchev, Anton V. Prokhorov
6. Investigating Effect of Voltage Changes on Static ZIP Load Model in a Microgrid Environment, Kenan Hatipoglu, Ismail Fidan, Ghadir Radman
7. Определение статических характеристик нагрузки по напряжению в электрических сетях с комплексной нагрузкой, С.В. Балдов и др.
8. Идельчик В.И. Электрические системы и сети: Учебник для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1989, - с.: ил. ISBN 5-283-01012-0
9. Устойчивость нагрузки электрических систем, Ю.Е. Гуревич, Л.Е. Либова, Э.А. Хачатарян. М.: Энергоатомиздат, 1981. – 208 с., ил.
10. Экспериментальные исследования режимов энергосистем, Л.М. Горбунова, М.Г. Портной, Р.С. Рабинович и др.; Под ред. С.А. Совалова. – М.: Энергоатомиздат, 1985 г. – 448 с., ил.
11. Экспериментальное определение статических характеристик нагрузки электроэнергетических систем, А.В. Панкратов, В.И. Полищук, Н.Л. Бацева.

12. Гуревич Ю.Е., Либова Л.Е., Окин А.А. Расчеты устойчивости и противоаварийной автоматики в энергосистемах. - М.: Энергоатомиздат. 1990.
13. Гуревич Ю.Е., Либова Л.Е. Применение математических моделей электрической нагрузки в расчетах устойчивости энергосистем и надежности электроснабжения промышленных потребителей — М.: ЭЛЕКС-КМ, 2008. — 248 с: ил.
14. Вычислительные и экспериментальные методы научного эксперимента: учебное пособие / Н.Ю. Афанасьева. – М. : КНОРУС, 2010 – 336 с.
15. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение: учебно-методическое пособие / Н.А. Гаврикова, Л.Р. Тухватулина, И.Г. Видяев, Г.Н. Серикова, Н.В. Шаповалова; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. – 73 с.

Приложение А

Accuracy estimation of static load characteristics obtained experimentally

Студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5АМ4Г	Копылов И.Е.		

Консультант кафедры ЭСиЭ:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Панкратов А.С.	к.т.н.		

Консультант – лингвист кафедры ИЯЭИ:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Низкодубов Г.А.	к.п.н.		

INTRODUCTION

Load characteristics have a great influence on the operation modes of power systems. Especially the effect manifests itself in emergency mode, when deflection voltage reaches a value close to the maximum permissible. Accounting for characteristic increases the accuracy of calculating the steady-state regimes and determination of the stability of power systems.

Static load characteristics of power systems nodes reflect the dependence of the total load power consumers on the voltage. Over time, new users are connected, the load is changing due to the commissioning of new equipment.

Due to the described the process is required a periodic update of static load characteristics. Today, it is the problem to the Russian and European electric power industry.

Complete information on the structure and parameters of electrical equipment is generally absent. As a consequence, the calculation of static load characteristics is based on the analysis of experimental data. The analysis is widely used in some form of approximation of experimental data by the method of least squares.

In the process of results approximation there is deviation from the actual static characteristic due to the features of the experimental data, fluctuations in the size of the load, the voltage in the grid nodes.

As the object of research the process of calculation of static load characteristics of the voltage on the data is obtained experimentally. The subject of the research is to evaluate the accuracy of the calculation of the static load voltage characteristics. In the dissertation the technique of estimating the accuracy of the calculation static load characteristics on the parameters of the experiment and obtained measured data are offered in a simple form .

The practical significance of the results of dissertation is the possibility of using the calculation formula for estimating the upper limit of calculation error of the static load characteristics from experimental data.

NOTION OF STATIC LOAD CHARACTERISTIC

Static load characteristics is dependence of active and reactive power on voltage and frequency at slow changes mode settings.

Load is determined by its static characteristics of voltage and frequency in the static calculation characteristic.

$$\begin{cases} P = F_1(U, \omega) \\ Q = F_2(U, \omega) \end{cases} \quad (1)$$

Static load characteristics indicate the load depending on the voltage and frequency when they change slowly. Therefore, the main field of application of such characteristic is the calculation of static stability.

The load often describes the static characteristics in the calculation of dynamic stability as well. This simplifies the preparation of the initial data, and static characteristics are known better than any of the other parameters of the load.

Static characteristics of the load system are usually represented in per-unit system, but may be presented with the dimension. Rated frequency, the normal voltage level taken as the basis, the value corresponding to these values of active and reactive power are taken as the basis also. At various substations in the electrical load voltage nodes usually differ. Therefore, representing the measured characteristics according to the rated voltage is impractical.

METHODS FOR SIMULATION OF POWER SYSTEM LOAD

The load may be represented in various forms, depending on their parameters in modeling.

- Current constant in magnitude and phase;
 - Power is constant in magnitude;
 - Permanent conductivity.
- a.) Current constant in magnitude and phase

$$\underline{I} = I' + jI'' = \text{const} \quad (2)$$

This load submission form is used in modeling the distribution networks of low voltage $U < 1$ kV. Likewise, as a rule, the load is simulated in industrial, urban and rural networks with a voltage level less than 35 kV.

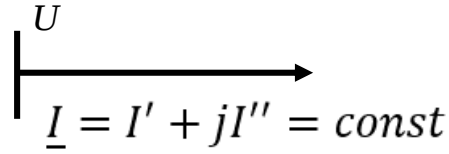


Figure 1 – Representation of constant current load

Usually it implies that the power supply voltage is known. Steady state is described by a system of linear algebraic equations by setting the load in the form of current.

b.) Power is constant in magnitude

$$\underline{S} = P + jQ = const \quad (3)$$

It is used in the established modes of power lines calculations, sometimes with a high voltage distribution networks. $S = const$ is used with unknown voltage level in the network node.

$$\underline{I}_H = \frac{\underline{S}^*}{\sqrt{3} \cdot \underline{U}^*} = \frac{P - jQ}{\sqrt{3} \cdot \underline{U}^*} = var \quad (4)$$

Using the equations (1.2) and (1.3) makes the equations for steady state nonlinear. This way of defining the load is sufficiently accurate for electrical systems that are fully secured by a voltage control device.

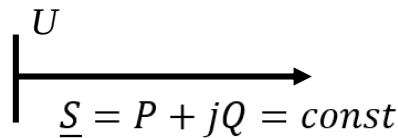


Figure 2 – Representation of a constant power load

In such systems, the electrical load in the nodes are widely used and auto-transformers with voltage regulation under load, and non-regulated transformers are

equipped with a linear regulating transformers. Consequently, it maintains a constant voltage level.

Also widely used voltage control means such as operated capacitor bank, synchronous motors. Under these conditions, voltage level at the load hardly changes when the mode changes, and the load remains constant.

Maintaining a constant voltage level is actually not provided by consumers. Because of this, in comparison with regard the dependence of active and reactive power of voltage, simulation constant power load consumers leads to errors in calculating the established modes of electricity supply networks.

c.) Permanent conductivity

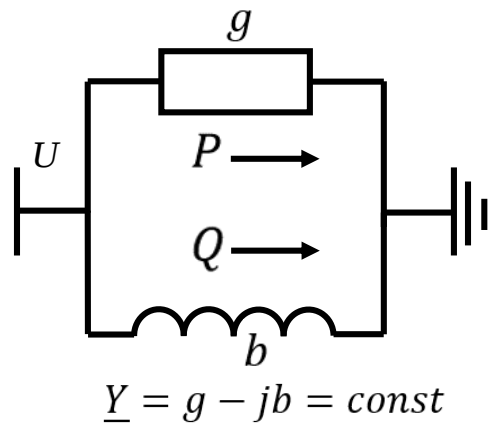


Figure 3 – Representation of the load conductivity

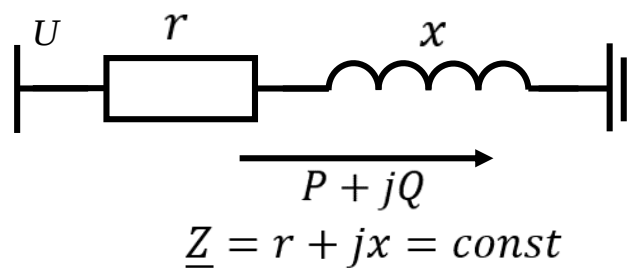


Figure 4 – Representation of the load resistance

Dependence of power loads from voltage can be submitted by constant conductivity. This is carried out at calculations electric network regimes with large voltage changes in the network nodes and the need to account for the non-linear

nature of the load. Conductivity value is calculated so that the power losses in the matched load shunt consumers.

$$\underline{Y} = g - jb = \text{const} \quad (5)$$

$$\underline{Z} = r + jx = \text{const} \quad (6)$$

Also, the task load continuous conduction is used in the calculation of electromechanical transients.

Static load characteristics as polynomials of the second degree are widely spread. A large share of the load in the united power grid is caused by the consumption of industrial enterprises. Induction motors are one of the most common power consumers. Typical static load characteristic induction motor contains non-zero coefficients.

To describe each of the nonlinear static load characteristics $P(U)$, $Q(U)$ need at least two independent factor. Static load characteristics $P(U)$, $Q_n(U)$ represented by equations 7, 8 have three coefficients.

$$P_H = P_n \left(A_0 + A_1 \left(\frac{U}{U_n} \right) + A_2 \left(\frac{U}{U_n} \right)^2 \right) \quad (7)$$

$$Q_H = Q_n \left(B_0 + B_1 \left(\frac{U}{U_n} \right) + B_2 \left(\frac{U}{U_n} \right)^2 \right) \quad (8)$$

In normal mode, $U = U_n$, $P = P_n$, $Q = Q_n$. Therefore, next conditions must be satisfied:

$$A_0 + A_1 + A_2 = 1, \quad B_0 + B_1 + B_2 = 1 \quad (9)$$

Static load characteristics are not exactly a quadratic polynomials. Depending on the voltage is much more complex, and the mathematical description of the presentation in the polynomial form must contain a large number of factors. It is necessary to simulate static load characteristics in a simpler form. Mainly due to the fact that can be quantitatively determine only a small number of coefficients in the formulas. The coefficients of higher powers are not as stable basis as the coefficients to the second degree inclusive.

Presentation in the form of second-degree polynomial model allows taking into account all types of load. A_0 coefficient displays component of load, which can be replaced by a constant active power. Assuming $A_1 = 0$ and $A_2 = 0$ in equation 7, we obtain:

$$P^*(U^*) = A_0 = P = \text{const.} \quad (10)$$

A_1 coefficient shows the component load, which can be replaced by current. Assuming $A_0 = 0$ and $A_2 = 0$ in equation 7, we obtain:

$$P^*(U^*) = A_1 U^*, \quad (11)$$

or

$$\frac{P^*(U^*)}{U^*} = A_1 = I = \text{const.} \quad (12)$$

A_2 shows the coefficient component of load, which can be replaced by a permanent shunt. Assuming $A_0 = 0$ and $A_1 = 0$ in equation 7, we obtain:

$$P^*(U^*) = A_2 (U^*)^2, \quad (13)$$

or

$$\frac{P^*(U^*)}{(U^*)^2} = A_2 = Y = \text{const.} \quad (14)$$

Taking into account the equation 9, for presentation static load characteristic, given basis of active, reactive power and voltage is sufficient determination of two coefficients of the equation for static load characteristic active power of voltage (Equation 7) and static load characteristic reactive power from the voltage (Equation 7). static load characteristic in relative units may be completely characterized by dependent voltage regulating effect, for approximated straight active power (Equation 15) and reactive (Equation 16)

$$\frac{dP}{dU} = P_{H.0} \left(A_1 + \frac{2A_2}{U_{6a3}^2} \cdot U \right) \quad (15)$$

$$\frac{dQ}{dU} = Q_{H.0} \left(B_1 + \frac{2B_2}{U_{6a3}^2} \cdot U \right) \quad (16)$$

Thus static load characteristic representation in relative units may be performed by calculation dependent voltage regulating effect.

METHODS OF EXPERIMENTAL DETERMINATION OF THE STATIC LOAD CHARACTERISTICS

Methods of experimental determination of the characteristics of the load is divided into two classes: active experiment method and passive experiment method. The forced changes were carried in the voltage at node power grid during active experiment. This may be the use of tap changer, forcing excitation generators, power control of reactive power compensation devices.

The most important requirement to the object of measurement is the lack of additional sources power supply measured load.

ACTIVE EXPERIMENT

Active experiment used to determine the static load characteristics at the forced change in a wide range of load voltage or frequency. Thus active and reactive load power grid node are measured fully and, when it is appropriate, the measures are taken for individual consumer.

Voltage changes in a fairly narrow range carries no specific danger for power consumers. Lowering the voltage level in a wider range, to $(0,8 - 0,7) U_{base}$ can lead to disruption of power supply. Therefore, measures to restore normal operation of the consumers must be provided: the rapid rise of the voltage at the node, incorporation parallel lines, non-synchronous connection of isolated part of the power grid for the tests to main part of it.

To remove the static characteristics of the voltage it is possible to change the voltage at node load into two ways:

a.) By switching tap changer step-down transformers in the normal scheme of power grid. On the side of low voltage (6-10 kV) transformers, voltage changes in the range of 15-20%;

b.) By adjusting of the excitation system of the generators in the isolated part of the power grid. The voltage may vary widely in both upward and downward. It is necessary to ensure the reserve of available active and reactive power in an isolated part of the power grid (typically 20-30%).

Frequency is maintained constant, during test. If the load is supplied through a transformer with automatic voltage control device until the end the adjustment range, the voltage on the load buses remains nearly constant in automatic voltage regulation. Availability of automatic voltage regulation of transformer makes the feasibility of performing measurements twice after each change of the supply voltage:

1. Immediately after the change of the voltage level, before operation of automatic voltage regulator. Static characteristics of the load and its regulatory effects of voltage considering the automatic voltage regulation determined at this time.

2. After a period of time, large time delay automatic voltage regulation. Static characteristics of the load and its regulatory effects of voltage considering the automatic voltage regulation determined at this time.

Experiments to determine the static characteristics of voltage and frequency are carried out during periods of constant power load, for example, in the morning and evening peaks and night minimum loads.

Maintaining the voltage level of consumers' electricity within adjustment range, sufficient to compensate for voltage fluctuations allows us to consider the active and reactive power load constant. If the adjustment range is reached, the load changes on natural static load characteristic with further voltage deflection. This process changes, such as load reactive power, can be described by the following type of static load characteristic:

$$Q = \begin{cases} Q_n \left(B_0 + B_1 \left(\frac{U - \Delta U_+}{U_n} \right) + B_2 \left(\frac{U - \Delta U_+}{U_n} \right)^2 \right), & \text{if } U > (U_n + \Delta U_+) \\ Q_n, & \text{if } (U_n - \Delta U_-) \leq U \leq (U_n + \Delta U_+) \\ Q_n \left(B_0 + B_1 \left(\frac{U + \Delta U_-}{U_n} \right) + B_2 \left(\frac{U + \Delta U_-}{U_n} \right)^2 \right), & \text{if } U < (U_n - \Delta U_-) \end{cases} \quad (17)$$

where ΔU_- – compensated automatic voltage regulation of transformer and / or actions of operational personnel deviation in the direction of decreasing the voltage from the nominal value;

ΔU_+ – compensated automatic voltage regulation of transformer and / or actions of operational personnel deviation in the direction of increasing the voltage from the nominal value.

The natural characteristics usage is permissible if the automatic and rapid voltage regulation does not extend more than 20 - 30% of consumers.

PASSIVE EXPERIMENT

The essence of passive experiment is to use variations of voltage and frequency, which are always available in the system. By registering these variations and the appropriate response to them active and reactive load, the regression line $P(U)$ and $Q(U)$ can be determined as a result of statistical processing.

In passive experiment there must be sufficiently large variation of the measured voltage at the node loads caused by other loads.

If, for example, we select the object to be measured, as shown in Figure 5.a, more load will be covered at once, but the variation of external loads may be reduced by the variations of the measured load.

Another extreme case to the same part of the network is shown in Figure 5b. Here, the value of each of the measured load is less, hence there are less errors, but the amount of work is more, as it is necessary to process the data of five experiments. An approximate estimate of the expected error can be obtained if you run equivalent corresponding part of the circuit, and spread all of its load on the rule of moments in generating nodes and load measuring node. If the ratio of the total active power of all external loads (all loads, except measured) given to the subject node exceeds the measured active power load by more than 5 times, then the expected error is small. If this ratio is less than 2, the experiment would not give satisfactory results.

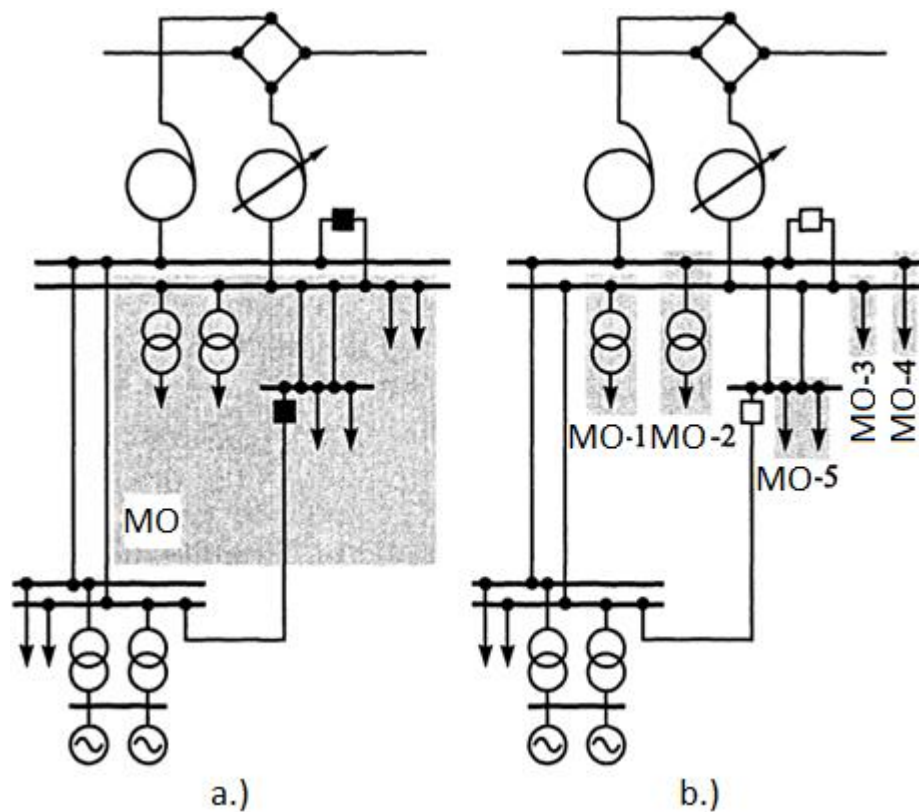


Figure 5 – Selecting the measurement object (MO) in the passive experiment
a.) errors are maximal; b.) errors are minimal

The dependence of $P(U)$ is represented by line A-B in Figure 6. If the quantity of power consumers and load are constant and the voltage is changed, the dependence of $P(U)$ will be located just as it is represented by black circles in Figure 6 a. Statistical processing of the data will result in the regression line, which coincides with the A-B yields the desired static voltage characteristic.

If in any mode (k_1 in Figure 6, a.), the number of power consumers will increase, or increase their power consumption at constant conditions of power supply, instead of the point k_1 is obtained point k_2 . The voltage at the point k_2 is lower than k_1 , since the voltage loss in the supply network are increasing.

If power supply conditions are strictly constant, and the number or power the measured load power consumers are changing, recorded measurements are arranged in a line parallel to $k_1 - k_2$ and indicated in Figure 6, used as a C-D. It is tilted toward the vertical axis, the stronger the greater the resistance to the mains.

Figure 6 shows the model of passive experiment with a. external conditions of the measured load power supply only change, its capacity varies with voltage deviations according to their static characteristics of the voltage, (b.) the conditions power supply are unchanged, changed the number and power consumers.

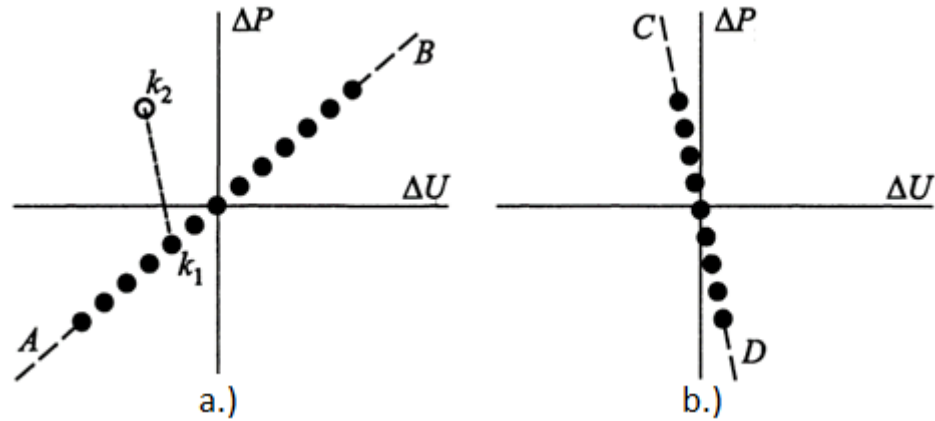


Figure 6 – Passive Experiment at change of:

a.) external power supply conditions; b.) the parameters power consumers

Passive experiment to determine static characteristics is only possible in stationary load (for example the daily maximum or minimum). At this time, load fluctuations in the different nodes are uncorrelated. If the changes power supply conditions and changes the parameters for power consumers in the measured load is not correlated, then the combined action of these two factors (Figure 7) measurement data in the coordinates $P(U)$ to form a spot.

If these changes are subject to the normal distribution law, that spot forms an ellipse. In the first of these cases, the definition of the linear regression gives a result close to the line A-B corresponding to the static characteristic of the measured load, but in the second case, the result of the linear regression does not correspond to the static characteristic. Load change at different, but each time the constant power supply conditions match the parallel lines C-D, C'-D', C''-D''.

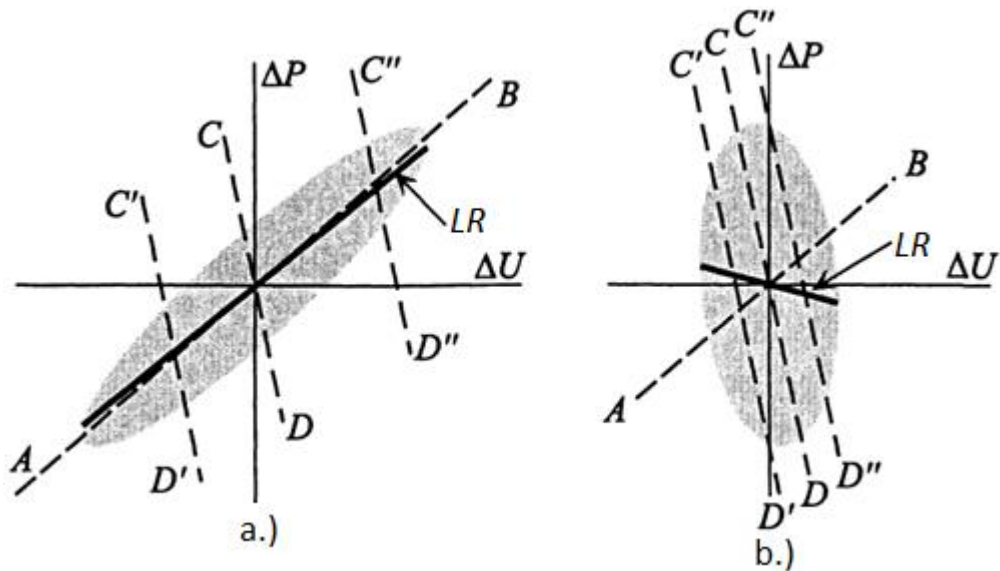


Figure 7 – passive experiment:

- a.) highly variable power supply conditions, load changes little;
- b.) little changed the conditions of power supply, the load varies greatly

If the voltage change is large enough then the static characteristic can be represented in the form of a parabola by a regression analysis. The problem of the experimental data in the form of spot remain.

ACCURACY ESTIMATION OF THE EXPERIMENTALLY OBTAINED POWER SYSTEM STATIC LOAD CHARACTERISTICS

The research objective is to calculate the accuracy of the static load characteristics, obtained experimentally, depending on parameters of the experiment. The parameters of the experiment influencing the accuracy of the static load characteristics include the following: the range in which voltage changed in the course of the experiment ($\Delta u_{\%}$); the number of measured values of voltage and power (N); standard deviation of load change random process ($\sigma_{p\%}$).

RESEARCH METHODS

It is difficult to estimate the accuracy of the static load characteristics because the reference to which the result obtained in the experiment could be

compared is lacking. Taking into account the last circumstance, the authors have decided to use a computing experiment instead of full-scale one to estimate accuracy of the static load characteristics.

The initial reference static load characteristic was defined in relative units by polynomial of 2 degree equation 18 with known coefficients a'_0 , a'_1 , a'_2 .

$$P_{orig}(U) = a'_0 + a'_1 \cdot U + a'_2 \cdot U^2 \quad (18)$$

It is necessary to obtain initial data for modeling the process of determination of the experimental static load characteristic. The initial data includes the following: arrays of voltage values $U_{(i)}$ and real power $P_{(i)}$, where $i = 1, 2, \dots, N$ is the index of reading. The values $U_{(i)}$ have been obtained in relative units on the assumption of that in the course of the experiment voltage increases regularly within the limits $\pm \frac{\Delta u_{\%}}{2}$ from the rated voltage according to the Equation 19.

$$U_{(i)} = 1 - \frac{\Delta u_{\%}}{2 \cdot 100\%} + i \cdot \frac{\Delta u_{\%}}{N \cdot 100\%} \quad (19)$$

Load power changes by two reasons in the course of the experiment. Firstly, load responds to changes in supply voltage. Secondly, random power fluctuations take place. These fluctuations are caused by the process of the equipment operation, changes in working conditions, turning on-off power consumers, etc. It is impossible to predict such fluctuations, so probabilistic characteristics are used to describe them. The error, with which power is measured, also has 2 components: systematic and random. The systematic error is not critical to the accuracy of the obtained static load characteristics because the obtained results are subsequently translated to the relative units. The influence of the random error of measurements and random fluctuations of load power on the accuracy of the obtained static load characteristics may be generalized by taking into account one random normally distributed value with standard deviation $\sigma_{P\%}$:

$$P_{(i)} = (a'_0 + a'_1 \cdot U_{(i)} + a'_2 \cdot U_{(i)}^2) \cdot error(\sigma_{P\%}) \quad (20)$$

where $error(\sigma_{P\%})$ is the random normally distributed value with standard deviation and mean value of 1.

The experimental static load characteristic of the form of Equation 21 has been constructed from the initial data $U_{(i)}$ and $P_{(i)}$ obtained in results.

$$P_{TEST}(U) = a_0 + a_1 \cdot U + a_2 \cdot U^2 \quad (21)$$

The coefficients a_0, a_1, a_2 are determined with the aid of solving the over determined system of equation Equation 22 by ordinary least squares method.

$$\begin{pmatrix} 1 & U_{(1)} & U_{(1)}^2 \\ 1 & U_{(2)} & U_{(2)}^2 \\ \dots & \dots & \dots \\ 1 & U_{(N)} & U_{(N)}^2 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} P_{(1)} \\ P_{(2)} \\ \dots \\ P_{(N)} \end{pmatrix}. \quad (22)$$

The results of one experiment are shown in figure 8. Voltage was varied within the range $\Delta u_{\%}$ in the course of the experiment. A comparison of the reference static load characteristic $P_{ORIG}(U)$ and the static load characteristic $P_{TEST}(U)$ obtained by solving the system of equation 22 is performed within the predetermined range ($U_{min} \div U_{max}$) that was chosen on the basis of deviation of voltage variation in normal and post-emergency conditions (0,8/1,2 from the rated voltage). The maximum deviation of the characteristics $\Delta P(U) = |P_{ORIG}(U) - P_{TEST}(U)|$ within the predetermined range ($U_{min} \div U_{max}$) of ΔP_{max} has been used to obtain the numerical value of the error of the static load characteristics.

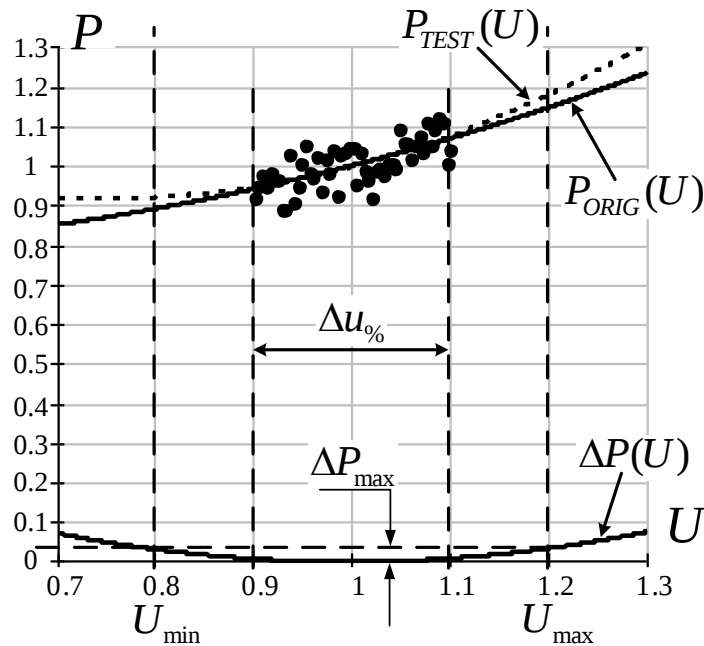


Figure 8 – Comparison of reference and experimental static load characteristics

The random values $P_{(i)}$ were used as the initial data so the obtained result $P_{\max}$ is also random with the same values $\Delta u_{\%}$, N , and $\sigma_{P\%}$. The results of the set of experiments are presented on figure 9.

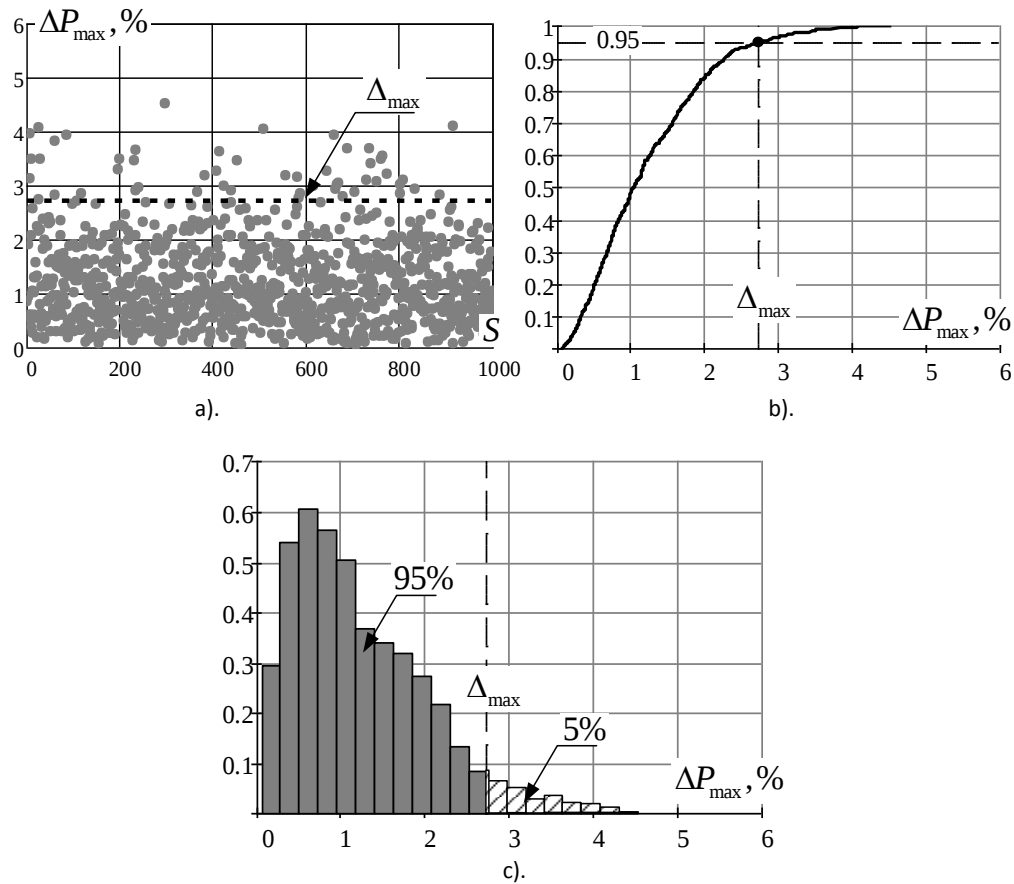


Figure 9 – Processing of the set of experiments

a) the results of the set of computing experiments; b) probability

The values $\Delta P_{\max}$ obtained in the set of $S = 1000$ computing experiment are shown in figure 9 a. by dots. The probability-distribution and probability-density functions of the values $\Delta P_{\max}$ are shown in figure 9 b. and 9 c. respectively. The value of the quantile $\Delta_{\max}$ is taken as the final value of the error of the static load characteristics. This value will not exceed with probability of 0,95.

OBTAINED RESULTS

The described sets of experiments were carried out for the following values:

- the range of voltage variation $\Delta u_{\%} = 1, 3, 5, 10, 15, 20\%$;
- the number of measured values $N = 10, 33, 100, 333, 10^3, 3333, 10^4$,

33333, 10^5 .

- the standard deviation of load power $\sigma_{P\%} = 1, 2, 5, 10, 15, 20\%$;

The dependences of the static load characteristics error Δ_{max} on the number of measurements N for the various values $\Delta u_{\%}$ with $\sigma_{P\%} = 1\%$ are shown in Fig. 3.

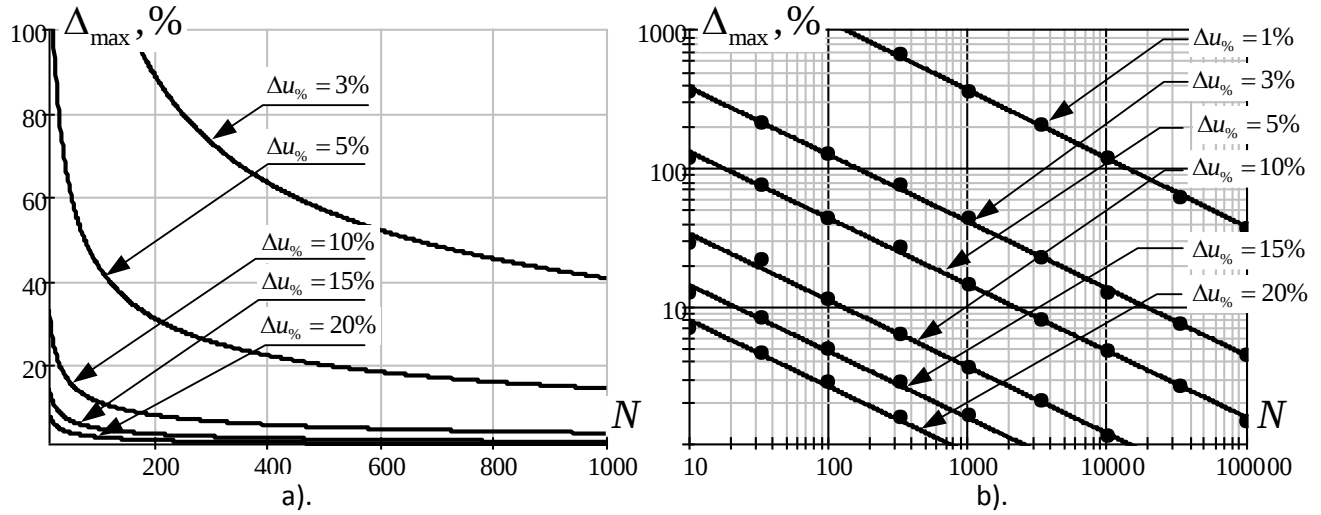


Figure 10 – Values of the static load characteristics error with $\sigma_{P\%} = 1\%$

a) linear scales; b) logarithmic scales

As these dependences are linear on the logarithmic scales (Figure 10 b), so it can be approximated by the linear functions

$$\ln(\Delta_{max}) = (A_{\Delta}) \cdot \ln(N) + \ln(B_{\Delta})$$

$$\ln(\Delta_{max}) = (A_N) \cdot \ln(\sigma) + \ln(B_N) \quad (23)$$

$$\ln(\Delta_{max}) = (A_{\sigma}) \cdot \ln(\Delta) + \ln(B_{\sigma})$$

or after conversion

$$\Delta_{max} = A \cdot \Delta U^{A_{\Delta U}} \cdot \sigma_{P\%}^{B_{\sigma}} \cdot N^{C_N}, \quad (24)$$

where $A_{\Delta U} = -2,017$;

$B_{\sigma} = 0,996$;

$C_N = -0,482$.

SUMMARY

According to results of the literature review, it was decided to calculate errors of static load characteristics based on the results of computational experiment. It was decided to stop the choice at only static active power load characteristics.

Simulated load has been greatly simplified and is represented by a polynomial of the second degree. Computing experiment has been repeated many times for statistical reliability. Experimental parameters and experimental data which introduce a decisive influence on the accuracy of the calculation and which factors of errors were identified and the establishment of an algorithm for calculating error.

The obtained results, depending on the factors of errors were approximated and represented as a formula.

Computational experiments were performed to assess the magnitude of errors of calculation of the regulatory effect of voltage on the basis of computational experiment on the calculation errors the static load characteristics.

During the research the question of the voltage range comparison actual and static characteristics received from the experiment has resolved not uniquely.

According to the results of computational experiment by comparison range the formula of errors' dependence was obtained.

Advanced computer experiment was performed to assess the errors in comparing the characteristics within the range of voltage change during the experiment. The results showed no effect of voltage variation range during the experiment on the accuracy errors calculation provided within range.

The results were applied to the static characteristic obtained by the results of active experiment. The question of the applicability of the calculation formula directly to the experimental data or data passed primary processing and filtering was not uniquely resolved. Obtained results greatly differ, depending on the application of the calculation formula and range of comparing .

Obtained formulas can not accurately calculate the error, but it allows us to estimate the upper limit.

More research, based on a more accurate simulation of the experiment, load and the power system as a whole is needed to find the ratio of the maximum errors to the expected, most probable.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Алгоритм расчета погрешности

```

Pr := for j ∈ 0..S
    err ← morm(N + 1, 1, σ)
    for i ∈ 0..N
        Pi ← erri · (Pçää(Ui))
    B ← pol_reg (U, P, 2)
    Aj,0 ← B0
    Aj,1 ← B1
    Aj,2 ← B2
    Pðän÷(u) ← Aj,2 · u2 + Aj,1 · u + Aj,0
    Δσj ←  $\sqrt{\frac{\int_{U_{\min}}^{U_{\max}} (P_{ðän÷}(u) - P_{çää}(u))^2 du}{U_{\max} - U_{\min}}}$ 
    Δ2 maxj ← max  $\left( \left| \frac{P_{ðän÷}(U_{\min}) - P_{çää}(U_{\min})}{P_{çää}(U_{\min})} \right|, \left| \frac{P_{ðän÷}(U_{\max}) - P_{çää}(U_{\max})}{P_{çää}(U_{\max})} \right| \right)$ 
    Δ3 maxj ← max  $\left( \Delta_{2 \max_j}, \left| \frac{P_{ðän÷}\left(-0.5 \frac{a_1 - A_{j,1}}{a_2 - A_{j,2}}\right) - P_{çää}\left(-0.5 \frac{a_1 - A_{j,1}}{a_2 - A_{j,2}}\right)}{P_{çää}\left(-0.5 \frac{a_1 - A_{j,1}}{a_2 - A_{j,2}}\right)} \right| \right)$ 
    Δmaxj ← if  $\left( U_{\min} < -0.5 \frac{a_1 - A_{j,1}}{a_2 - A_{j,2}} \wedge -0.5 \frac{a_1 - A_{j,1}}{a_2 - A_{j,2}} < U_{\max} \right) \Delta_{3 \max_j}, \Delta_{2 \max_j}$ 
    Aj,3 ← Δσj
    Aj,4 ← Δmaxj

```

A

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Алгоритм применения квантиля вероятности

$$\text{Iskl_Max}(S) := \left| \begin{array}{l} \text{MaxS} \leftarrow \max(S) \\ j \leftarrow 0 \\ b \leftarrow 1 \\ \text{for } i \in 0..\text{last}(S) \\ \quad \left| \begin{array}{l} N_j \leftarrow S_i \\ j \leftarrow j + 1 \\ \text{if } (S_i = \text{MaxS}) \wedge b \\ \quad \left| \begin{array}{l} b \leftarrow 0 \\ j \leftarrow j - 1 \end{array} \right. \end{array} \right. \\ N \end{array} \right.$$

$$\Delta_{\max} := \left| \begin{array}{l} N \leftarrow \text{Pr}^{\langle 4 \rangle} \\ \text{for } i \in 0..\text{round}[S \cdot (1 - \text{dov})] \\ \quad N \leftarrow \text{Iskl_Max}(N) \\ N \end{array} \right.$$