

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Казанский государственный энергетический университет»

На правах рукописи

Грачева Елена Ивановна

РАЗВИТИЕ ТЕОРИИ И МЕТОДОВ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ
ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ НИЗКОВОЛЬТНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ
ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Диссертация
на соискание ученой степени
доктора технических наук

Специальность 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

Казань 2014

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ	7
ГЛАВА 1. АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ	17
1.1. Детерминированные методы	18
1.1.1. Методы расчета по данным об индивидуальной конфигурации графиков нагрузки и графического интегрирования	18
1.1.2. Метод среднеквадратичных параметров режима	20
1.1.3. Методы расчета потерь электроэнергии по времени наибольших потерь, потерь активной и реактивной мощности, по методу 2τ	23
1.1.4. Методы эквивалентных проводимостей и эквивалентного сопротивления	30
1.1.5. Метод расчета потерь в промышленной сети с учетом нагрева ...	36
1.2. Вероятностно-статистические методы расчета потерь электроэнергии	38
1.3. Классификация методов определения потерь электроэнергии во внутризаводских промышленных сетях	45
1.4. Области применения вероятностно-статистических методов расчета потерь электроэнергии	48
1.5. Постановка задачи исследования	50
1.6. Выводы по первой главе	53
ГЛАВА 2. ИССЛЕДОВАНИЕ ФАКТОРНОГО ПРОСТРАНСТВА СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ	54
2.1. Особенности принципов построения систем цехового электроснабжения	54
2.2. Анализ структуры систем цехового электроснабжения	59

2.3. Расчетное и экспериментальное определение потерь электроэнергии во внутризаводских сетях	66
2.4. Влияние основных эксплуатационных характеристик элементов систем цехового электроснабжения на величину потерь электроэнергии	75
2.5. Анализ потерь электроэнергии систем цехового электроснабжения	80
2.6. Влияние погрешностей детерминированных и вероятностно-статистических методов на величину потерь электроэнергии	86
2.6.1. Влияние погрешностей детерминированных методов на величину потерь электроэнергии	88
2.6.2. Влияние погрешностей вероятностно-статистических методов на величину потерь электроэнергии	101
2.7. Выводы по второй главе	114
ГЛАВА 3. КОМПЛЕКСНЫЙ ПОДХОД К ИССЛЕДОВАНИЮ ОБЩИХ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ КОНТАКТНЫХ СОЕДИНЕНИЙ СИСТЕМ ЦЕХОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ	115
3.1. Постановка задачи	115
3.2. Исследование законов изменения сопротивлений силовых цепей контактных систем низковольтных коммутационных аппаратов	118
3.2.1. Анализ и классификация низковольтных коммутационных аппаратов по конструктивным особенностям	118
3.2.2. Методика проведения эксперимента по определению сопротивлений контактных соединений коммутационных аппаратов . . .	122
3.2.3. Определение зависимости сопротивлений силовых цепей контактных систем аппаратов от их номинальных параметров	133
3.3. Сравнительный анализ теоретических и экспериментальных значений сопротивлений контактных соединений низковольтных	

аппаратов	138
3.3.1. Экспериментальная проверка достоверности расчетных значений сопротивлений контактных систем аппаратов	138
3.3.2. Сравнительное исследование сопротивлений главной цепи коммутационных низковольтных аппаратов российских и зарубежных производителей	147
3.4. Метод комплексной оценки эффективности функционирования контактных соединений низковольтных коммутационных аппаратов как элементов систем цехового электроснабжения	161
3.4.1. Критерий эффективности функционирования контактных соединений аппаратов, применяемых в системах цехового электроснабжения	161
3.4.2. Метод оценки функциональных параметров низковольтных аппаратов	165
3.4.3. Моделирование законов изменения характеристик эффективности функционирования низковольтных аппаратов	173
3.4.3.1. Магнитные пускатели	173
3.4.3.2. Контактторы	180
3.4.3.3. Автоматические выключатели	181
3.4.3.4. Оценка функциональных параметров некоторых российских и зарубежных аппаратов	182
3.5. Выводы по третьей главе	189
ГЛАВА 4. ПЛАНИРОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОГО ОПИСАНИЯ СИСТЕМ ЦЕХОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ НА БАЗЕ ДОСТОВЕРИЗАЦИИ СХЕМНО-РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ	191
4.1. Агрегированная форма представления цеховой сети для определения потерь электроэнергии	191
4.2. Выбор обобщенных параметров оборудования систем цехового	

электроснабжения	195
4.3. Методы планирования эксперимента для разработки математических моделей потерь электроэнергии в зависимости от основных параметров электрооборудования	200
4.4. Моделирование погрешности расчета эквивалентных сопротивлений цеховых сетей с использованием метода статистических испытаний.	210
4.5. Применение методики оценки величины потерь электроэнергии в низковольтных цеховых сетях	215
4.6. Выводы по четвертой главе	227
ГЛАВА 5. ПРИМЕНЕНИЕ МНОЖЕСТВЕННОЙ РЕГРЕССИИ ДЛЯ РАСЧЕТА И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В СИСТЕМАХ ЦЕХОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ	228
5.1. Общие положения и исходная информация	228
5.2. Отношение предпочтения и неразличимости решений оценки параметров систем электроснабжения	232
5.3. R-оптимальные планы для исследования регрессионных моделей функциональных характеристик систем цехового электроснабжения от основных параметров оборудования	235
5.4. Разработка алгоритма матричных преобразований при определении порога различения допустимых решений оценки параметров электрооборудования	238
5.5. Алгоритм и проверка условия неразличимости решений оценки параметров электрооборудования в зависимости от приращения факторов	241
5.6. Применение методов нечеткого регрессионного анализа для определения потерь электроэнергии в системах цехового электроснабжения	247

5.7. Выводы по пятой главе	272
Заключение	274
Литература	277
Приложение А	304
Приложение Б	306
Приложение В	320
Приложение Г	342
Приложение Д	354

Введение

Актуальность работы

Высокий уровень приоритетности энергосберегающей политики в современной России обусловлен целым рядом причин. Энергоемкость продукции страны в настоящее время остается довольно высокой – в 2 - 3 раза выше, чем в западных странах.

В некоторых отраслях промышленности доля суммарных энергозатрат в себестоимости продукции составляет более 55 %. Кроме того, в современных условиях наблюдается тенденция снижения производства энергоресурсов, в связи с чем происходит постоянное повышение значимости проблемы энергосбережения. При этом экономия ЭЭ может быть представлена как источник дополнительной прибыли промышленных и электросетевых компаний и осуществляться тогда, когда энергосберегающие технологии будут меньше, чем затраты на добычу первичных топливно-энергетических ресурсов.

По данным многочисленных исследований, при передаче ЭЭ от источников питания до потребителей теряется, примерно, 15–20 % отпущенной с шин источников питания ЭЭ. Поэтому задачи снижения потерь ЭЭ на ее транспорт являются достаточно современными, причем в современных условиях актуальность проблемы уменьшения потерь ЭЭ существенно подтверждается различными нормативными постановлениями и законодательными актами по энергосбережению.

Потери ЭЭ оказывают значительное влияние на технико-экономические показатели схем сетей, так как стоимость потерь включается в полную стоимость (приведенные затраты) и себестоимость (годовые эксплуатационные издержки) передачи ЭЭ. Составляющая стоимости потерь в стоимости передачи ЭЭ имеет [83] большой удельный вес (30–40 %). Задача рационального построения и развития электрификации в области электроснабжения состоит в установлении рационального соотношения между стоимостью ЭЭ и потерями ее в системах электроснабжения.

Выявление непроизводительных расходов ЭЭ обусловлено определением двух групп мероприятий, первая из которых способствует уменьшению объема расходуемой ЭЭ, а другая – ее увеличению. Первую группу представляют собой мероприятия по усилению учета и контроля электропотребления, внедрению энергосберегающей технологии и т. д., которые приводят к снижению уровня потребления ЭЭ. Во вторую группу входят мероприятия по механизации и автоматизации производственных процессов, замене в технологическом процессе топлива и пара на ЭЭ и т. д., приводящие к увеличению электропотребления. Поэтому энергосбережение становится особенно важным, тем более что резервы экономии ЭЭ значительны.

По данным отечественных специалистов можно рассмотреть три этапа экономии энергоресурсов, в том числе экономии и ЭЭ. Первые 10 % экономии представляют прямую экономию в результате борьбы с нерациональным ее использованием. При этом не нужно специальных затрат или они очень невелики. Следующие 10 % экономии даются с помощью технических и организационных мероприятий, требующих существенных вложений. Дальнейшее снижение нерациональных расходов ЭЭ диктует необходимость значительной технологической перестройки и является значительно более затратной.

В настоящее время осуществление энергосберегающей политики в промышленности дает возможность получить реальное снижение уровня электропотребления до 10 %.

Проблемами оценки эффективности функционирования систем электроснабжения и потерь ЭЭ в России занимались Д.А. Арзамасцев, А.Б. Власов, В.Э. Воротницкий, С.И. Гамазин, А.Г. Годжелло, Е.Г. Егоров, Ю.С. Железко, В.И. Идельчик, В.Н. Казанцев, Г.М. Каялов, Е.А. Конюхова, Б.И. Кудрин, В.А. Мантров, Г.А. Немцев, Г.А. Осипенко, В.Г. Пекелис, Г.Е. Поспелов, Г.П. Свинцов, Н.М. Сыч, О.В. Федоров, В.В. Шевченко, Ю.В. Щербина [5; 24–25; 82–96; 100–101; 112; 114; 118; 129–131; 138–140; 151;

173; 178–181; 244–249; 252–253] и другие ученые московской, ленинградской, киевской и других школ.

В связи с развитием рыночных отношений в стране, проблема точного расчета технических потерь и их детального исследования становится весьма актуальной.

Для решения проблемы снижения потерь в сетях разработано [83–87; 112; 175] множество мероприятий, которые обычно осуществляются на основе оценочных расчетов потерь. При этом следует отметить, что для цеховых сетей характерна низкая достоверность исходных данных для вычисления потерь. Однако в современных условиях в низковольтных сетях промышленных предприятий появилась тенденция существенного улучшения информационной базы вычисления потерь, т.к. внедряются автоматизированные системы учета ЭЭ; а также начинают производиться энергетические обследования промышленных предприятий, которые имеют высокую информационную обеспеченность [83–87].

В связи с большими затратами государственных средств на развитие электроэнергетики вследствие неуклонного роста потребления ЭЭ, с все более значительным ее внедрением в различные технологические процессы, важное значение имеет рациональное проектирование и эксплуатация внутризаводских сетей промышленных предприятий.

Информация о схемах и нагрузках цеховых сетей отличается низкой степенью достоверности. Расчет схемных и режимных параметров сетей является, по сути, одноразовым расчетом с дальнейшим периодическим внесением текущих изменений. Установка же на всех линиях 0,4 кВ счетчиков и обеспечение нормальной их эксплуатации вызывает существенные трудности. В связи с этим в современных условиях получение информации о расходе ЭЭ по каждой линии невозможно.

На данном этапе развития энергетики предъявляются все более жесткие требования к системе определения потерь ЭЭ, трудности в учете и контроле которых обусловлены вероятностно определенными или неопределенными

исходными данными. Все это делает приоритетным постоянное развитие методических подходов к решению данной проблемы. В связи с этим целесообразным является развитие теории и методов расчета потерь ЭЭ, а также методов планирования мероприятий по снижению потерь, методов расчета надежности элементов сетей 0,4 кВ.

Решение задачи повышения эффективности использования расходуемой ЭЭ на промышленном предприятии производится [4–7] по данным о реальном потреблении и о величине потерь ЭЭ в отдельных производственных подразделениях и цехах. Эти данные являются первоосновой проводимого анализа электропотребления и определяют характер мероприятий, проводимых с целью уменьшения уровня потерь ЭЭ во внутривоздушных промышленных сетях.

Одним из резервов улучшения качества работы систем цехового электроснабжения является обоснованный учет реальных значений потерь ЭЭ в низковольтных сетях, который необходим как для повышения точности балансовых расчетов ЭЭ, так и для выбора мероприятий и рекомендаций по уменьшению потерь.

Для получения данных о величине потерь ЭЭ разработаны [4–5; 58; 60; 63; 64; 84–87] различные способы и методики.

Неполнота информации и сложности при определении показателей качества функционирования и составляющих потерь ЭЭ заставляют использовать методы стандартного [1; 2] и нечеткого [13; 27; 70] регрессионного анализа.

Таким образом, основными аспектами предлагаемого системного подхода к точному учету потерь ЭЭ являются:

– **Экономический:**

1) решение вопроса о целесообразности проведения энергоаудита на предприятии;

2) выявление «очагов» наибольших потерь и, как следствие, повышение эффективности энергосберегающих мероприятий и снижение энергоемкости выпускаемой на предприятиях продукции;

3) уточнение величины удельного расхода ЭЭ на выпуск продукции с выделением расхода ЭЭ на технологию и потери;

4) уточнение себестоимости проектных работ;

5) повышение эффективности эксплуатации оборудования с устранением режимов недогрузки и перегрузки;

6) оптимизация мест установки приборов учета и контроля ЭЭ;

7) повышение эффективности борьбы с хищением ЭЭ;

8) повышение точности планирования расхода ЭЭ;

9) повышение качества тарифного регулирования стоимости передачи ЭЭ в электрических сетях.

– **Организационный:**

1) выявление узлов и элементов систем цехового электроснабжения с наибольшими потерями;

2) определение порядка последовательности замены оборудования с учетом количества циклов срабатываний.

Целью настоящей работы является развитие теоретических основ и совершенствование методов оценки эффективности функционирования систем цехового электроснабжения, обеспечивающих качественное проектирование, реконструкцию и эксплуатацию низковольтных электрических сетей промышленных предприятий.

В диссертационной работе поставлены и решены следующие научные и практические задачи:

– разработка информационной базы данных основных параметров оборудования низковольтных электрических сетей промышленных предприятий для расчета потерь ЭЭ;

– предложение классификации по потерям ЭЭ в контактах низковольтных коммутационных аппаратов;

– выявление зависимости величины сопротивлений контактных соединений низковольтных коммутационных аппаратов, применяемых в системах цехового электроснабжения, от номинальных данных аппаратов;

- разработка методов комплексной оценки эффективности функционирования аппаратов с учетом их технического состояния;
- разработка методов и математических моделей на базе стандартного регрессионного анализа для определения эквивалентного сопротивления и потерь мощности в низковольтных цеховых сетях, учитывающие структуру и динамику их изменения;
- разработка методов нечеткого регрессионного анализа для оценки потерь ЭЭ в случае неопределенности задания исходной информации.

Методы исследований

Основной фактический материал, используемый для получения расчетных соотношений и подтверждающий достоверность научных положений, выводов и практических рекомендаций, получен в объединениях ОАО «Москвич» (г. Москва) и Казанском ОАО «Органический Синтез» (г. Казань).

Методика исследований определялась содержанием каждой решаемой задачи и базировалась на использовании методов планирования эксперимента, методов стандартного и нечеткого регрессионного анализа, методов математической обработки результатов эксперимента, теории электрических цепей, статистической теории погрешностей, теории надежности, теории вероятностей и математической статистики, теории случайных функций, теории электрических аппаратов, положений и основ электроснабжения. Теоретические исследования сопровождались разработкой математических моделей в виде программных продуктов и их использованием при реализации программ энергосбережения.

Научная новизна результатов исследований, полученных в диссертационной работе, заключается в следующем:

- предложена классификация по потерям ЭЭ в контактах коммутационных аппаратов, применяемых в сетях низкого напряжения, в зависимости от конструктивных особенностей аппаратов;
- разработаны методы определения аналитических зависимостей

величины сопротивлений контактных соединений низковольтных коммутационных аппаратов от их номинальных параметров по результатам экспериментальных исследований;

– предложен критерий технического состояния и разработаны методы комплексной оценки параметров эффективности функционирования низковольтных аппаратов;

– определения основные закономерности изменения сопротивления контактных соединений низковольтных аппаратов по результатам экспериментальных исследований и моделирования, что позволяет эффективно управлять эксплуатационными режимами цеховых сетей;

– разработаны модели, позволяющие учитывать изменение сопротивлений контактных соединений низковольтных аппаратов в зависимости от сроков и режимов эксплуатаций и уточнять величину токов короткого замыкания по фактическому техническому состоянию цепей электрооборудования низковольтных сетей;

– разработан алгоритм оценки погрешности расчета эквивалентного сопротивления цеховых сетей с использованием метода статистических испытаний при моделировании режимов низковольтных сетей;

– разработаны стандартные регрессионные модели для определения эквивалентного сопротивления и потерь мощности в цеховых сетях с учетом основных параметров оборудования, позволяющие учитывать динамику развития сетей;

– формализована задача и разработаны математические модели нечеткого регрессионного анализа, используемые для оценки потерь ЭЭ в цеховых сетях в случае неопределенности задания исходной информации и позволяющий эффективно планировать мероприятия по энергосбережению.

Достоверность полученных результатов определяется корректностью поставленных задач, целесообразностью принятых допущений; адекватностью используемого математического аппарата и разработанных моделей исследуемым процессам; хорошей сходимостью данных теоретических

вычислений с результатами экспериментальных исследований и испытаний лабораторных и промышленных образцов в объединениях ОАО «Москвич» (г. Москва) и Казанском ОАО «Органический Синтез» (г. Казань), сопоставлением проведенных исследований с опубликованными материалами других авторов.

Практическая ценность работы

1. Определены области применения и выданы рекомендации по использованию методов расчета потерь ЭЭ в зависимости от исходной информации и требуемой точности вычислений.

2. Разработана информационная база исходных данных схемных и режимных параметров систем цехового электроснабжения, используемая для анализа, оценки и прогнозирования потерь ЭЭ.

3. Разработаны математические модели зависимости величины сопротивлений контактных соединений низковольтных коммутационных аппаратов от их номинальных параметров по результатам экспериментальных исследований, позволяющие определять основные технические характеристики низковольтных коммутационных аппаратов и уточнять оптимальные варианты установки энергоэффективных по потерям мощности в контактных системах низковольтных аппаратов и на линиях цеховых сетей.

4. Разработаны метод и алгоритмы, применяемые для комплексной оценки эффективности функционирования аппаратов в зависимости от их технического состояния в процессе эксплуатации, позволяющие определять их работоспособность и ресурс, а также планировать программу замены и ремонтов электрооборудования цеховых сетей.

5. Разработаны математические модели, позволяющие учитывать закономерности изменения сопротивления контактных систем низковольтных аппаратов в зависимости от сроков и режимов эксплуатации оборудования и уточнять величину токов короткого замыкания в низковольтных сетях.

6. Разработаны стандартные регрессионные модели для определения

эквивалентного сопротивления и потерь мощности в цеховых сетях с учетом основных параметров оборудования, позволяющие учитывать динамику развития сетей, уточнять составляющие балансов ЭЭ по предприятию, цехам и осуществлять контроль за расходом ЭЭ.

7. Разработаны методы и модели нечеткого регрессионного анализа, используемые для оценки потерь ЭЭ в случае неопределенности задания исходной информации, позволяющие эффективно внедрять мероприятия по энергосбережению, а также управлять режимами эксплуатации цеховых электрических сетей.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Области применения и рекомендации по использованию основных детерминированных и вероятностно-статистических методов расчета потерь ЭЭ в зависимости от исходной информации и требуемой точности вычислений.

2. Информационная база данных схемно-режимных параметров оборудования низковольтных электрических сетей промышленных предприятий, позволяющая обеспечить практическую реализацию методов расчета потерь ЭЭ.

3. Методы и алгоритмы определения сопротивлений контактных соединений низковольтных аппаратов с учетом их основных технических характеристик.

4. Методы комплексной оценки эффективности функционирования аппаратов, применяемых в системах цехового электроснабжения.

5. Стандартные регрессионные модели и методы определения потерь ЭЭ в системах цехового электроснабжения, учитывающие структуру и динамику развития цеховых сетей.

6. Методы нечеткого регрессионного анализа для оценки потерь ЭЭ в случае неопределенности задания исходной информации.

Апробация работы. Результаты и основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Повышение эффективности

электрического хозяйства потребителей в условиях ресурсных ограничений» (Москва, 16–20 ноября 2009 г.), научно-техническом форуме с международным участием «Высокие технологии – 2004», «Электрооборудование, электроснабжение, электросбережение» (Ижевск, 24–28 мая 2004 г.), Международной научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития энерготехнологии» (XII, XVI, XVII Бенардосовских чтениях, Иваново, 1–3 июня 2005 г., 1–3 июня 2011 г., 29-31 мая 2013г.), VIII Всероссийской конференции по проблемам науки и высшей школы (Санкт-Петербург, 2004 г.), XVI, XLII, XLIII Международных научно-практических конференциях «Федоровские чтения», Москва, 9–11 ноября 2011 г., 7–9 ноября 2012 г., 6–8 ноября 2013 г., МЭИ), Всероссийских заочных научно-технических конференциях (Computer-Based Conferences) II ВНТК «Современные промышленные технологии» (Нижний Новгород, апрель 2005 г.), Республиканских научных конференциях «Проблемы энергетики» (Казань, 1996 и 1998 гг.), научно-технических конференциях: «Электроснабжение, электрооборудование, энергосбережение» (Новомосковск, 2002 г.), «Электроснабжение, энергосбережение и электроремонт» (Новомосковск, 2000 г.), «Электрооборудование, электроснабжение, электропотребление» (Москва, 1995 г., МЭИ), 8-й Международной молодежной научно-технической конференции «Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций “РТ–2012”» (Севастополь, 2012), Региональной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых (с международным участием) (Иваново, 17–19 апреля 2012 г.), научно-практической конференции с международным участием (XLI неделя науки СПб ГПУ, Санкт-Петербург, 3–8 декабря 2012 г.), 10-ой Всероссийской научно-технической конференции «Вузовская наука – региону» (Вологда, 2012 г., ВоГТУ), Всероссийской молодежной научной конференции «Мавлютовские чтения» (Уфа, 2012 г. УГАТУ).

Глава 1. АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Расчетный, экспериментальный и другие способы определения потерь ЭЭ в системах электроснабжения промышленных предприятий подразделяются на две большие подгруппы: детерминированные и вероятностно-статистические, различающиеся в первую очередь неполнотой информации, количеством принятых допущений [1]. Точные данные о факторах, определяющих величину потерь ЭЭ в низковольтных сетях, получить трудно, зачастую невозможно [181; 184]. Так, например, данные, приводимые в справочной литературе о величине сопротивлений контактных соединений коммутационных аппаратов, весьма ограничены и приближены. А графики нагрузок приемников низковольтных сетей на предприятиях просто отсутствуют.

Отсутствие полной информации заставляет применять методы, содержащие различные допущения при расчетах [3–8; 11; 17; 22; 23; 25; 40; 245].

Естественно, что чем менее полная информация имеется в наличии, тем более простой метод расчета приходится применять и тем большая методическая погрешность вносится в расчет. Чем менее точна имеющаяся информация, тем большая информационная погрешность вносится дополнительно [36; 37; 39; 47; 84; 88; 94; 116; 196].

1.1. Детерминированные методы

1.1.1. Методы расчета по данным об индивидуальной конфигурации графиков нагрузки и графического интегрирования

Потери ЭЭ – это произведение потерь мощности и расчетного периода времени. На величину потерь ЭЭ существенно влияет характер изменения нагрузки в течение этого периода времени.

В элементе электрической сети, работающем с неизменной нагрузкой и имеющем потери активной мощности ΔP , потери ЭЭ за время t составят

$$\Delta W = \Delta P t. \quad (1.1)$$

В действительности нагрузки элементов сети не остаются постоянными, а изменяются в соответствии с графиками нагрузки потребителей, режимами работы отдельных электростанций [24; 191; 204].

В общем случае потери ЭЭ в элементе трехфазной электрической сети с неизменным сопротивлением R и напряжением U за промежуток времени T составят [28]

$$\Delta W = 3R \int_0^T I^2(t) dt = \frac{R}{U^2} \int_0^T S^2(t) dt, \quad (1.2)$$

где I , S – соответственно протекающие по элементу сети ток и мощность в момент времени t .

Расчет потерь ЭЭ по формуле (1.2) требует знания закона изменения тока или мощности во времени. Однако в общем случае этот закон математическому описанию не поддается. Поэтому для учета изменения тока или мощности во времени применяют различные математические и алгоритмические приемы, позволяющие упростить определение значения интеграла $\int_0^T I^2(t) dt$

или $\int_0^T S^2(t) dt$. Они определяют погрешность методов и ограничивают область

их применения.

В ряде наших поисковых работ [49; 53; 68] впервые дана оценка погрешностей с указанием основных причин, вызывающих эти погрешности расчета методов определения потерь ЭЭ.

Метод графического интегрирования [28; 108] основан на использовании графика нагрузки (рис. 1.1). Весь промежуток времени T делится на n равных частей длительностью Δt . Каждому i -му промежутку времени соответствует определенное значение тока I_j или мощности S_j . Выполнив интегрирование, получим

$$\Delta W = 3R \sum_{i=1}^n I_i^2 \Delta t = \frac{R}{U^2} \sum_{i=1}^n S_i^2 \Delta t = 3R \frac{T}{n} \sum_{i=1}^n I_i^2 = \frac{RT}{U^2 n} \sum_{i=1}^n S_i^2. \quad (1.3)$$

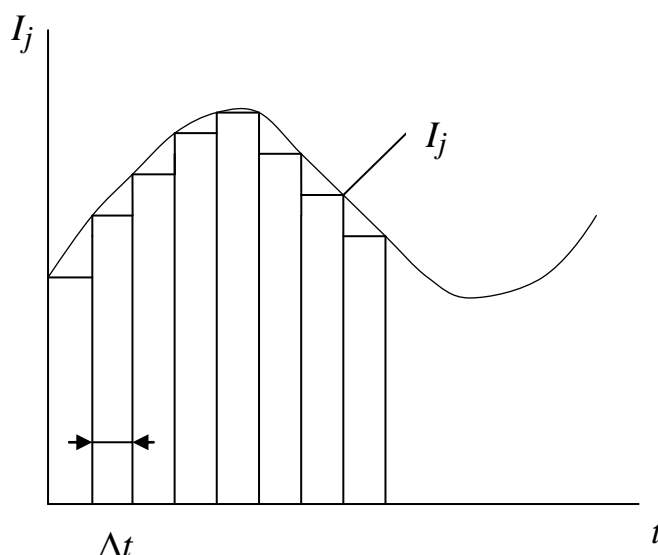


Рис. 1.1. График нагрузки

Данный метод обладает высокой точностью, но весьма трудоемок. Он хорошо реализуется при расчетах потерь ЭЭ за небольшой промежуток времени, например по суточным графикам нагрузки. Однако оценка потерь ЭЭ за большой промежуток времени на основании найденных потерь по характерным суточным графикам не обеспечивает [7] нужной точности, так как режимные параметры характерных суток не являются неизменными

на протяжении всего периода. Тем не менее, иногда пользуются этим методом для вычисления годовых потерь энергии, применяя формулу [176]

$$\Delta W = \Delta W_3 n_3 + \Delta W_{\text{л}} n_{\text{л}},$$

где $n_3, n_{\text{л}}$ – соответственно число зимних и летних суток в году; $\Delta W_3, \Delta W_{\text{л}}$ – потери ЭЭ за характерные зимние и летние сутки.

В работах [52; 53; 55] нами подтверждается высокая точность метода графического интегрирования и обосновывается возможность его применения при рассмотрении оптимизационных задач систем промышленного электроснабжения.

1.1.2. Метод среднеквадратичных параметров режима

Метод среднеквадратичного тока базируется на введении понятия условного неизменного тока $I_{\text{ск}}$, который называется среднеквадратичным (рис. 1.2, а). При его протекании по элементу сети за время T в нем выделяются такие же потери ЭЭ, как и при протекании за это же время действительного тока в соответствии с графиком нагрузки. На рис. 1.2, а эти потери энергии в определенном масштабе соответствуют площадкам *О-а-в-г* и *О-д-ж-г*. На основании этого определения можно записать соотношение [89]

$$3RI_{\text{ск}}^2 T = 3R \int_0^T I^2(t) dt,$$

откуда

$$I_{\text{ск}} = \sqrt{\frac{\int_0^T I^2(t) dt}{T}}. \quad (1.4)$$

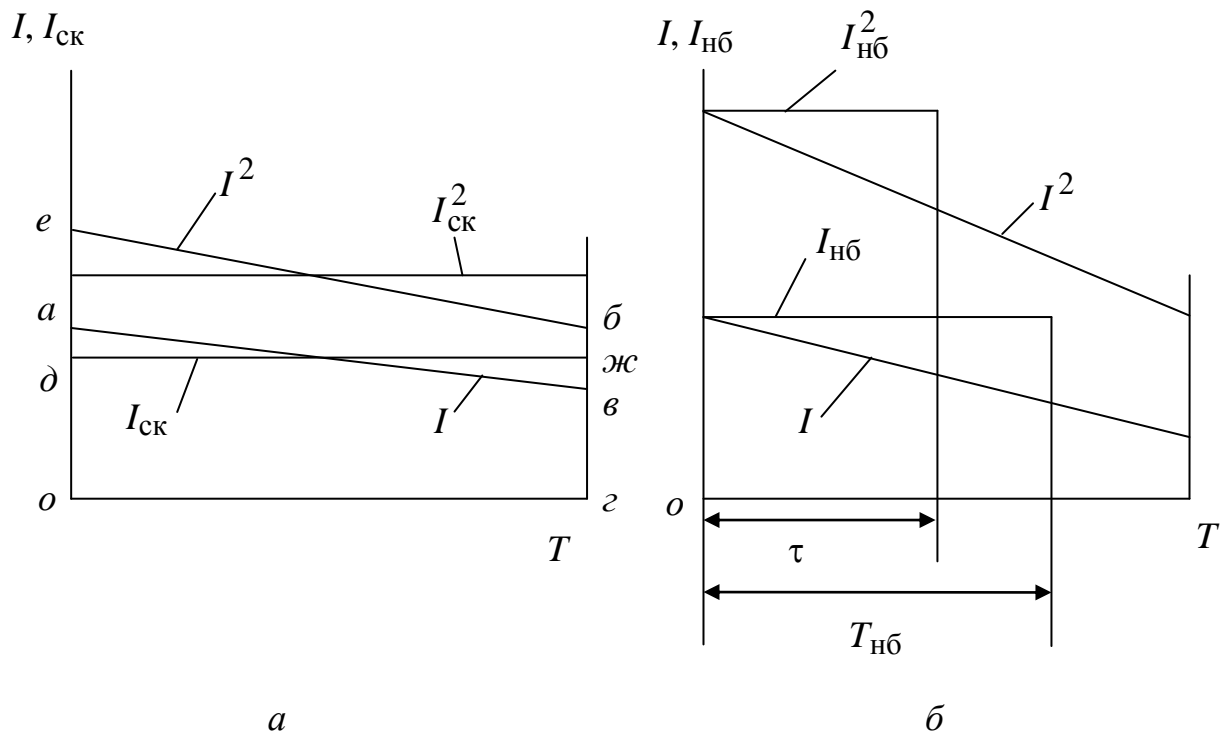


Рис. 1.2. Годовые графики нагрузки по продолжительности для определения:
 а – среднеквадратичного тока; б – времени максимальных потерь

Исходя из метода среднеквадратичного тока, потери ЭЭ в сопротивлении R за промежуток времени T можно найти по формуле

$$\Delta W = 3RI_{СК}^2 T. \quad (1.5)$$

Если расчет выполняется в мощностях, то используют аналогичное понятие среднеквадратичной мощности

$$S_{СК} = \sqrt{\frac{\int_0^T S^2(t) dt}{T}}.$$

Тогда годовые потери энергии определяются в виде

$$\Delta W = \frac{S_{СК}^2}{U^2} RT.$$

При нахождении среднеквадратичного тока используют ряд приемов, которые определяют точность данного метода расчета потерь ЭЭ.

Среднеквадратичный ток можно найти по суточному ступенчатому графику

нагрузки, аналогичному рис. 1.1, с длительностью ступени, например, 1 ч [108]

$$I_{\text{ск}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{24} I_i^2}{24}}. \quad (1.6)$$

Тогда потери ЭЭ

$$\Delta W = 3RI_{\text{ск}}^2 T = 3R \frac{T}{24} \sum_{i=1}^{24} I_i^2,$$

что соответствует формуле (1.3). Следовательно, расчет среднеквадратичного тока по графику нагрузки эквивалентен расчету потерь методом графического интегрирования и имеет те же недостатки.

В практике расчетов для типовых графиков нагрузки [107] величину $I_{\text{ск}}$ находят по наибольшему току $I_{\text{нб}}$, используя эмпирическую формулу А.М. Залесского

$$I_{\text{ск}} = I_{\text{нб}} \left(0,124 + T_{\text{нб}} \cdot 10^{-4} \right) \quad (1.7)$$

где $T_{\text{нб}}$ – время использования наибольшей нагрузки. Значение, найденное по данной формуле, можно использовать только при расчете годовых потерь ЭЭ. При этом наибольший ток можно определить по количеству активной W_P и реактивной W_Q ЭЭ, переданной за год

$$I_{\text{нб}} = \sqrt{\frac{W_P^2 + W_Q^2}{\sqrt{3}UT}}. \quad (1.8)$$

Среднеквадратичный ток также можно рассчитать по среднему току $I_{\text{ср}}$ и коэффициенту формы графика нагрузки $k_{\text{ф}}$ [216]:

$$I_{\text{ск}} = k_{\text{ф}} I_{\text{ср}}. \quad (1.9)$$

Здесь величина среднего тока за время T равна

$$I_{\text{ср}} = \frac{\sqrt{W_P^2 + W_Q^2}}{\sqrt{3}UT}. \quad (1.10)$$

Значения величин $T_{\text{нб}}$ и $k_{\text{ф}}$ в формулах (1.7) и (1.9) носят вероятностный характер. Поэтому результаты расчета потерь ЭЭ по найденным с их использованием значениям $I_{\text{ск}}$ определяются достоверностью задания величин $T_{\text{нб}}$ и $k_{\text{ф}}$.

Определять потери ЭЭ по среднеквадратичному току, вычисленному по формулам (1.7) и (1.9), рекомендовано в радиальных распределительных сетях [54; 119; 130].

1.1.3. Методы расчета потерь электроэнергии по времени наибольших потерь, потерь активной и реактивной мощности, по методу 2τ

Потери ЭЭ по этому методу рассчитываются по выражению [108]

$$\Delta W = \Delta P_{\text{нб}} \tau, \quad (1.11)$$

где $\Delta P_{\text{нб}}$ – наибольшие потери мощности; τ – эквивалентное время наибольших потерь.

Потери ЭЭ в этом случае

$$\Delta W = \Delta P_1 \cdot \Delta t_1 + \Delta P_2 \cdot \Delta t_2 + \dots + \Delta P_n \cdot \Delta t_n = \Delta P_{\text{нб}} \cdot \tau, \quad (1.12)$$

где n – число ступеней графика нагрузок.

Значение τ определяется на основании времени наибольшей нагрузки $T_{\text{нб}}$.

Зависимость между потерями ЭЭ и электроэнергией, полученной потребителем, выражается следующим образом.

Энергия, полученная потребителем за год, вычисляется как

$$W = P_1 \cdot \Delta t_1 + P_2 \cdot \Delta t_2 + \dots + P_n \cdot \Delta t_n = \Sigma P_i \cdot \Delta t_i = P_{\text{нб}} \cdot T_{\text{нб}}, \quad (1.13)$$

где $P_{\text{нб}}$ – наибольшая потребляемая нагрузкой мощность.

Время наибольшей нагрузки

$$T_{\text{нб}} = \frac{\sum P_i \Delta t_i}{P_{\text{нб}}}. \quad (1.14)$$

Значение коэффициента мощности потребителей цеховых сетей приводится в справочных данных [205].

Каждая группа потребителей имеет характерный для нее график нагрузки и соответствующее значение $T_{\text{нб}}$.

Так, например, для односменных предприятий $T_{\text{нб}}$ составляет от 2000 до 3000 часов, для двухсменных – от 3000 до 4500 часов, для трехсменных – от 4500 до 8000 часов.

Для ряда характерных графиков различных нагрузок можно построить расчетным путем зависимости $\tau = f(\cos\varphi, T_{\text{нб}})$, откуда по известным $T_{\text{нб}}$ и $\cos\varphi$ можно определить τ (рис. 1.3) [108].

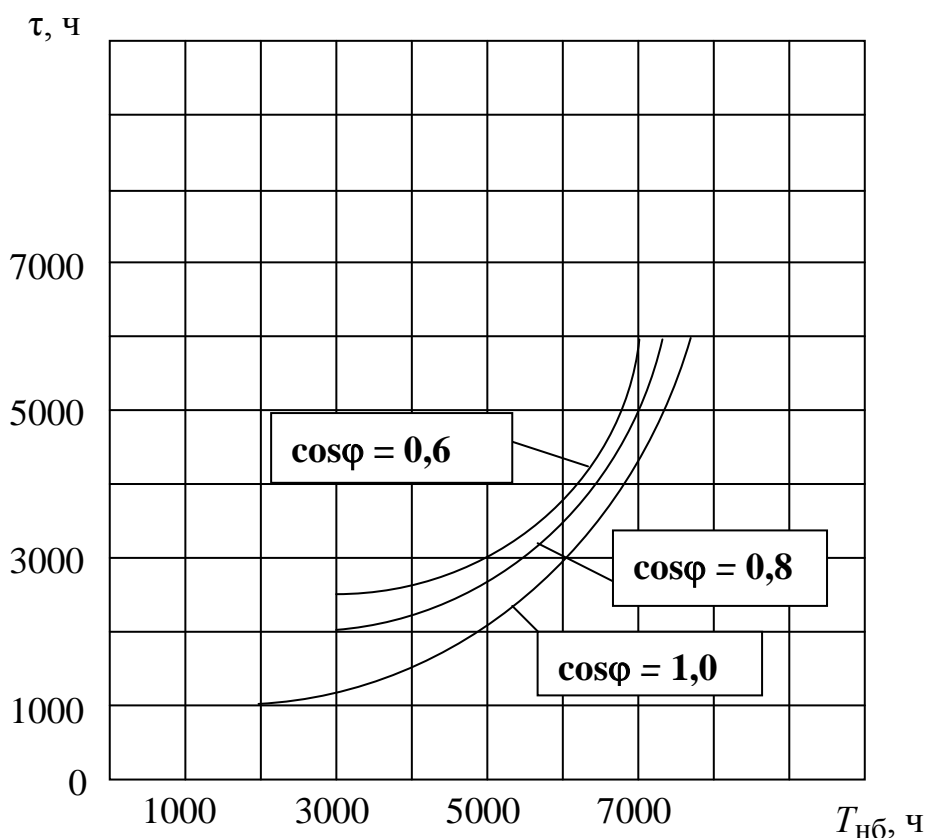


Рис. 1.3. Графики зависимостей $\tau = f(\cos\varphi, T_{\text{нб}})$

Расчет потерь ЭЭ по времени наибольших потерь производится в следующем порядке [108]:

1) определяется время наибольшей нагрузки $T_{нб}$ при использовании годового графика нагрузки;

2) из графиков зависимостей $\tau = f(\cos\varphi, T_{нб})$, приводимых в справочной литературе (рис. 1.3), при известных $\cos\varphi$ и $T_{нб}$ находится время наибольших потерь τ ;

3) определяются потери мощности $\Delta P_{нб}$ в режиме наибольшей нагрузки;

4) по формуле (1.12) рассчитываются потери ЭЭ за год.

Основой метода расчета по времени наибольших потерь является предположение о том, что наибольшие потери ЭЭ в сети определяются в максимум ее нагрузки и графики активных и реактивных мощностей подобны [86; 100]. Сделанные предположения приводят к большим погрешностям данного метода [86; 92; 94]. Для определения времени наибольших потерь могут использоваться эмпирические зависимости [96] $\tau = f(\cos\varphi, T_{нб})$, частично учитывающие конфигурацию графиков нагрузки.

В работах [244; 246; 249] соискателем в соавторстве впервые разработана и опубликована методика, позволяющая учитывать такие параметры электрооборудования систем внутривольтового электроснабжения, как температура нагрева проводников, обусловленная токовой нагрузкой и температурой цехов, а также число низковольтных аппаратов, установленных на линии. Все это позволяет существенно снизить погрешности методов по времени потерь и значительно повысить точность расчетов.

В ряде других исследований [36; 50; 51] нами впервые обосновывается применение методов по времени потерь для определения расхода ЭЭ и оперативного прогнозирования электропотребления.

При оценке потерь энергии в условиях эксплуатации желательно, чтобы среднестатистическая погрешность не носила систематического характера. Для

этого при определении времени потерь τ необходимо учитывать конфигурации графиков нагрузки, динамику коэффициентов мощности и предполагаемое несовпадение максимумов активной и реактивной мощности по времени в пределах расчетного периода [220]. Это можно выполнить при раздельном учете потерь энергии от протекания активной и реактивной мощностей [178]

$$\Delta W = \Delta P_P \tau_P + \Delta P_Q \tau_Q, \quad (1.15)$$

где ΔP_P , ΔP_Q – составляющие потерь активной и реактивной мощности сети; τ_P , τ_Q – интервал времени потерь P и Q :

$$\Delta P_P = \frac{P_{\text{нб}}^2}{U_{\text{нб}}^2} \cdot r; \quad (1.16)$$

$$\Delta P_Q = \frac{Q_{\text{нб}}^2}{U_{\text{нб}}^2} \cdot r, \quad (1.17)$$

где в свою очередь $P_{\text{нб}}$, $Q_{\text{нб}}$ – значения наибольшей активной и реактивной мощности, протекающей по сети сопротивлением r , $U_{\text{нб}}$ – величина наибольшего напряжения сети.

Время потерь от протекания активной и реактивной мощностей находят из уравнений

$$\tau_P = 2T_{\text{нб}} - T + \frac{T - T_{\text{нб}}}{1 + \frac{T_{\text{нб}}}{T} - \frac{2P_{\text{нм}}}{P_{\text{нб}}}} \cdot \left(1 - \frac{P_{\text{нм}}}{P_{\text{нб}}}\right)^2; \quad (1.18)$$

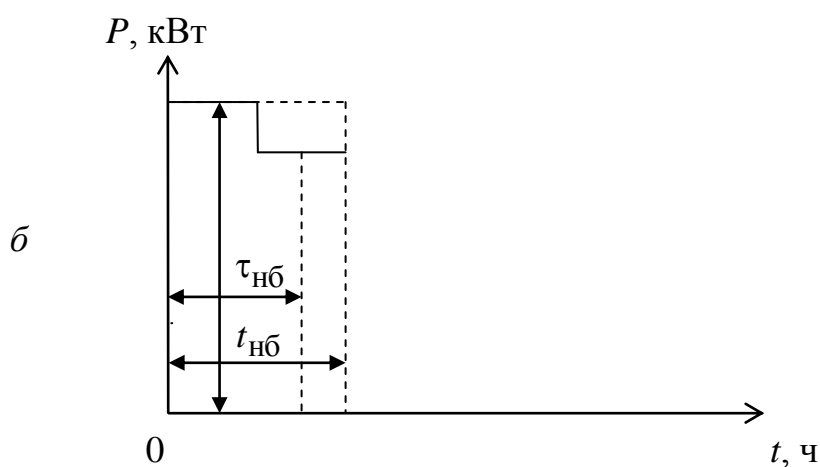
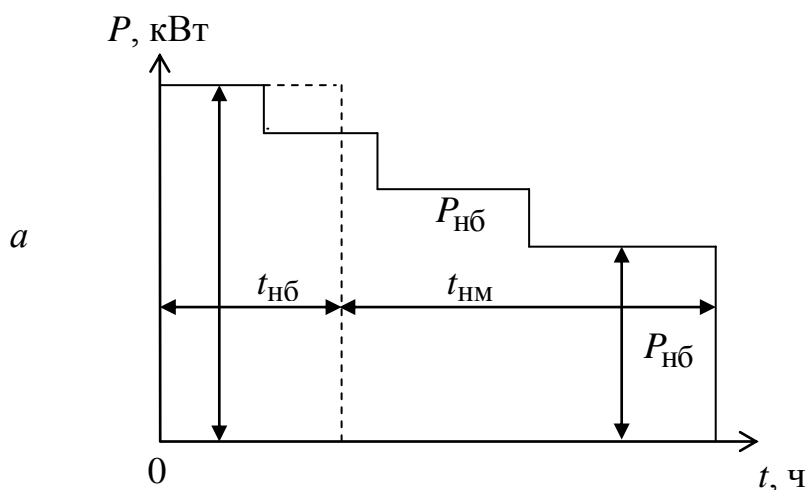
$$\tau_Q = 2T_{\text{нб}} - T + \frac{T - T_{\text{нб}}}{1 + \frac{T_{\text{нб}}}{T} - \frac{2Q_{\text{нм}}}{Q_{\text{нб}}}} \cdot \left(1 - \frac{Q_{\text{нм}}}{Q_{\text{нб}}}\right)^2, \quad (1.19)$$

где $P_{\text{нм}}$, $Q_{\text{нм}}$ – значения наименьшей активной и реактивной мощности, протекающей по сети, T – величина расчетного периода.

Данный метод расчета уточняет искомое значение потерь энергии, но при этом требуются дополнительные данные о графиках реактивной

нагрузки, которые, как правило, бывают известны гораздо менее достоверно, чем графики активной мощности, или вообще не известны [83; 119; 128].

Использование метода 2τ [108] позволяет снизить погрешность от недоучета внутрисуточной неоднородности графика нагрузок. Для определения потерь ЭЭ этим методом первоначально требуется рассчитать режимы максимальных и минимальных нагрузок. На суточном графике нагрузок по продолжительности (рис. 1.4, а) фиксируют две части, соответствующие данным режимам. Разделим график на два продолжительностью соответственно $t_{\text{Нб}}$ (рис. 1.4, б) и $t_{\text{Нм}}$ (рис. 1.4, в). Величины $t_{\text{Нб}}$ и $t_{\text{Нм}}$ представляют собой длительность двух частей одного графика нагрузок – максимальной и минимальной.



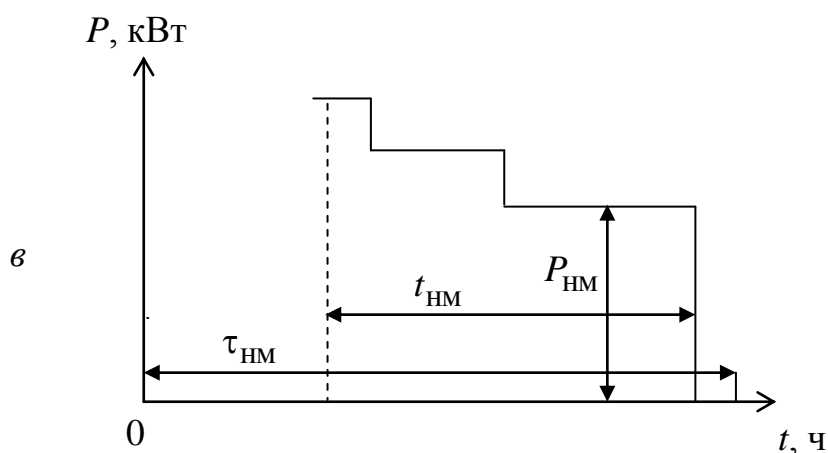


Рис. 1.4. Суточный график нагрузок по продолжительности:

a – график продолжительностью $t_{H6} + t_{HM}$; *б* – график

продолжительностью t_{H6} ; *в* – график продолжительностью t_{HM}

Потребленную за сутки ЭЭ W_c можно представить в виде

$$W_c = P_{H6} \cdot t_{H6} + P_{HM} \cdot t_{HM}, \quad (1.20)$$

где P_{H6} и P_{HM} – соответственно наибольшая и наименьшая потребляемая нагрузкой мощность; t_{H6} и t_{HM} – времена максимума и минимума нагрузки, связанные соотношением в часах

$$t_{H6} + t_{HM} = 24. \quad (1.21)$$

Суточная ЭЭ рассчитывается по формуле

$$W_c = \sum_1^{24} P_i \cdot t_i, \quad (1.22)$$

где индекс i соответствует текущему часу суток.

Из условий (1.20) и (1.21) следует

$$t_{H6} = \frac{W_c - 24P_{HM}}{P_{H6} - P_{HM}}; \quad (1.23)$$

$$t_{HM} = 24 - t_{H6}. \quad (1.24)$$

Используя для каждого графика правило площадей, можно вычислить времена потерь для каждой части из условий

$$P_{\text{НБ}}^2 \tau_{\text{НБ}} = \sum_1^{t_{\text{НБ}}} P_i^2 \cdot \Delta t_i ; \quad (1.25)$$

$$P_{\text{НМ}}^2 \tau_{\text{НМ}} = \sum_1^{t_{\text{НМ}}} P_i^2 \cdot \Delta t_i . \quad (1.26)$$

В выражениях (1.25) и (1.26) считаем, что $\cos\varphi = \text{const}$ и $P_i \equiv S_i$.

При этом

$$\tau_{\text{НБ}} = \sum_1^{t_{\text{НБ}}} \left(\frac{P_i}{P_{\text{НБ}}} \right)^2 \cdot \Delta t_i ;$$

$$\tau_{\text{НМ}} = \sum_1^{t_{\text{НМ}}} \left(\frac{P_i}{P_{\text{НМ}}} \right)^2 \cdot \Delta t_i .$$

Потери ЭЭ за расчетный период ΔT находятся по формуле

$$\Delta W_{\text{с}} = \Delta P_{\text{НБ}} \cdot \tau_{\text{НБ}} + \Delta P_{\text{НМ}} \cdot \tilde{t}_{\text{НМ}} . \quad (1.27)$$

Определение потерь ЭЭ за расчетный период ΔT осуществляется по равенству

$$\Delta W_{\text{с}} = \Delta W \cdot \left(\frac{W_{\text{ср.с}}}{W_{\text{с}}} \right)^2 \cdot \Delta T , \quad (1.28)$$

где $W_{\text{ср.с}}$ – средний суточный отпуск энергии; $W_{\text{с}}$ – суточный отпуск за расчетные сутки.

Использование данного метода требует большого количества исходных данных. В наших работах [57; 58] показаны возможные погрешности метода 2τ и уточнены причины, их вызывающие.

1.1.4. Методы эквивалентных проводимостей и эквивалентного сопротивления

Типовая схема внутрицеховой сети напряжением до 1000 В изображена на рис. 1.5, а [152].

Метрологическое обеспечение основных радиальных линий и отдельных электроприемников практически отсутствует. Активная энергия, пропущенная через трансформатор, как правило, контролируется по счетчику, установленному на стороне высокого напряжения питающей линии. По сути, на основе эксплуатационных данных в распределительной сети низкого напряжения не представляется возможным оценить среднюю величину тока в отдельных ее элементах, а следовательно, рассчитать потери активной мощности в каждом элементе внутрицеховой распределительной сети. Поэтому, исходя из имеющейся режимной информации, потери ЭЭ цеховой сети при постоянной рабочей температуре токопроводящих жил 65 °С можно определить по выражению [152]

$$\Delta W = 3k_{\phi}^2 \cdot I_{\text{ср}}^2 \cdot R_{\Sigma} \left(1 + 0,18 \frac{I_{\text{ср}}^2}{I_{\text{max}}^2} \right) \cdot T, \quad (1.29)$$

где R_{Σ} – эквивалентное сопротивление сети; $I_{\text{ср}}$ – средняя величина тока нагрузки трансформатора за расчетное время T ; I_{max} – результирующий максимально допустимый ток всех линий, отходящих от секции шин трансформаторной подстанции; k_{ϕ} – коэффициент формы графика потребления активной энергии трансформатором, который находится по месячным показаниям счетчика активной энергии из выражения

$$k_{\phi} = \sqrt{n} \cdot \frac{\sqrt{\sum_{kn}^n P_{kn}^2}}{\sum_{kn}^n P_{kn}}, \quad (1.30)$$

где P_{kn} – среднее значение мощности, рассчитанное по показаниям счетчика за n -й месяц; n – количество месяцев за рассматриваемое время T .

Средняя величина тока нагрузки трансформатора за рассматриваемое время T рассчитывается по формуле

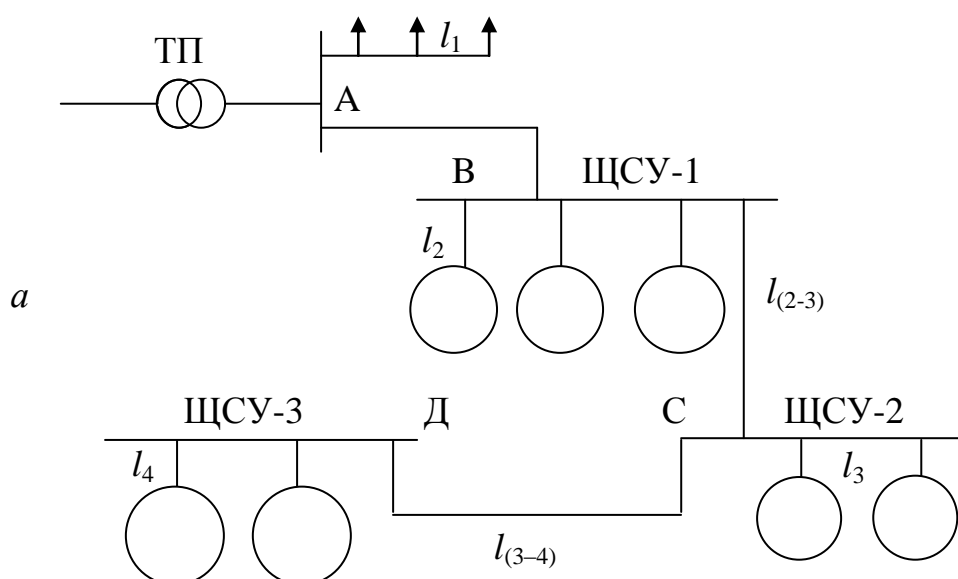
$$I_{\text{ср}} = \frac{\sqrt{W_{\text{а}}^2 + W_{\text{р}}^2}}{\sqrt{3}U_{\text{ср}}T}, \quad (1.31)$$

где $W_{\text{а}}$, $W_{\text{р}}$ – количество соответственно активной и реактивной энергии за время T ; $U_{\text{ср}}$ – средняя величина линейного напряжения на шинах трансформаторной подстанции, полученная по данным регистрации напряжения на шинах трансформаторной подстанции в режимные дни, т. е.

$$U_{\text{ср}} = 0,5 (U_{\text{ср(з)}} + U_{\text{ср(л)}}), \quad (1.32)$$

где $U_{\text{ср(з)}}$, $U_{\text{ср(л)}}$ – средние величины напряжения на шинах трансформаторной подстанции в зимние и летние режимные дни.

Эквивалентное сопротивление реальной сети R_3 (рис. 1.5, а) находится посредством ее преобразования и свертывания к одному сопротивлению относительно точки А (рис. 1.5, б) типовой внутрицеховой сети.



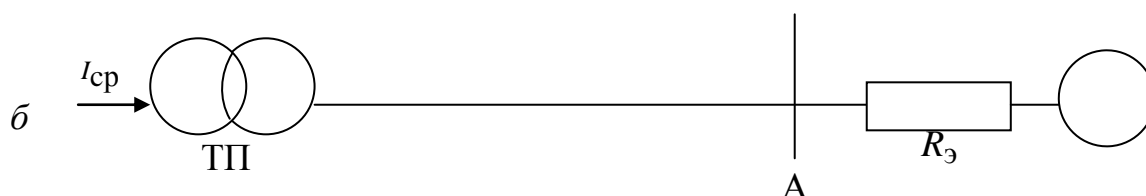


Рис. 1.5. Схема цеховой сети: *a* – реальная сеть; *б* – преобразованная относительно точки *A*: ТП – трансформаторная подстанция, ЩСУ – щит станции управления

Для данной сети:

l_1 – линии первого радиуса, их число равно m ; l_2 – линии второго радиуса с числом, равным n ; l_3 – линии третьего радиуса с числом, равным k ; l_4 – линии четвертого радиуса с числом, равным t .

Преобразование и расчет схемы осуществляется путем последовательного определения эквивалентного сопротивления линий, отнесенных к шинам соответствующих ЩСУ. Так, эквивалентное сопротивление линий четвертого радиуса, питающихся от ЩСУ-3, будет равно

$$R_{э4} = \frac{1}{\sum_1^t G_{4(i)}} + R_{(3-4)}, \quad (1.33)$$

где $\sum_1^t G_{4(i)}$ – проводимости всех линий четвертого радиуса; $R_{(3-4)}$ – сопротивление линии, соединяющей третий и четвертый радиусы.

Аналогично – эквивалентное сопротивление линий третьего радиуса, питающихся от ЩСУ-2,

$$R_{э3} = \frac{1}{\sum_1^t G_{3(i)}} + R_{(2-3)} \quad (1.34)$$

и эквивалентное сопротивление линий второго радиуса, питающихся от ЩСУ-1,

$$R_{\text{э}2} = \frac{1}{\sum_1^t G_2(i)} + R_{(1-2)}, \quad (1.35)$$

где $R_{(1-2)}$, $R_{(2-3)}$ – сопротивления линий, соединяющих первый и второй, второй и третий радиусы.

Величина сопротивления линий первого радиуса, входящая в (1.33)–(1.35), в общем случае равна

$$R_{1(i)} = r_{1(i)} + R_{\text{э}2(i)}, \quad (1.36)$$

где $r_{1(i)}$ – сопротивление i -й линии первого радиуса; $R_{\text{э}2(i)}$ – эквивалентное сопротивление линий второго радиуса, подключенных через соответствующие ЩСУ к i -й линии первого радиуса.

Очевидно, что для тупиковых линий первого радиуса

$$R_{1(i)} = r_{1(i)}. \quad (1.37)$$

Эквивалентное сопротивление всей сети низкого напряжения, отнесенное к шинам трансформаторной подстанции,

$$R_{\text{э}} = \frac{1}{\sum_1^m G_1(i)}, \quad (1.38)$$

где $\sum_1^m G_1(i)$, $\sum_1^n G_2(i)$, $\sum_1^k G_3(i)$, $\sum_1^t G_4(i)$ – проводимости линий первого, второго, третьего и четвертого радиусов.

Величина результирующего максимально допустимого тока всех линий первого радиуса определяется

$$I_{\text{max}} = \sum_1^m I_{\text{max}}(i), \quad (1.39)$$

где I_{\max} – максимально допустимый ток для сечения проводников i -й линии первого радиуса, принимается по справочным данным.

Вышеизложенная методика имеет ряд существенных недостатков, впервые наиболее полно выявленных в наших исследованиях [53; 58], а именно:

- коэффициент формы графика потребления активной ЭЭ дается для всей сети, на практике эта величина меняющаяся;

- не учитываются потери мощности в сопротивлениях контактных соединений;

- не учитывается температура окружающей среды и весь расчет ведется для статического состояния схемы.

При определении потерь ЭЭ в цеховых сетях методом эквивалентного сопротивления необходимо располагать достоверной информацией о таких параметрах, как среднеквадратичный ток и эквивалентное сопротивление сети [216; 217].

Среднее значение тока какого-либо участка сети легко определяется с помощью показаний счетчиков, имеющих на данном участке сети.

Отличие среднеквадратичного тока, по которому должны рассчитываться потери энергии, от среднего учитывается коэффициентом формы графика $k_{\text{ф}}$:

$$I_{\text{СК}} = k_{\text{ф}} \cdot I_{\text{СР}}, \quad (1.40)$$

где $I_{\text{СК}}$ – среднеквадратичный ток участка сети; $I_{\text{СР}}$ – средний ток участка сети.

Для электрических нагрузок большинства промышленных предприятий значение $k_{\text{ф}}$ обычно находится в пределах 1,01–1,1. При этом меньшие значения $k_{\text{ф}}$ соответствуют электрическим нагрузкам с большим числом приемников (например, вся электрическая нагрузка цеховой заводской подстанции); большие значения относятся к электрическим нагрузкам с меньшим числом приемников (например, какая-либо линия, отходящая от подстанции) [216].

Потери ЭЭ цеховой сети определяются по выражению

$$\Delta W = 3k_{\Phi}^2 I_{\text{ср}}^2 R_{\text{э}} T_{\text{р}}, \quad (1.41)$$

где $R_{\text{э}}$ – эквивалентное сопротивление сети; $T_{\text{р}}$ – расчетный период определения потерь ЭЭ.

Эквивалентным сопротивлением какой-либо сети считается сопротивление некоторой условной неразветвленной линии, ток которой равен току головного участка сети и потери ЭЭ равны потерям в сети, т. е.

$$R_{\text{э}} = \frac{\Delta W}{3I_{\text{ск}}^2 T_{\text{р}}}. \quad (1.42)$$

Так как определять эквивалентные сопротивления с помощью показаний приборов в общем случае (для сложной схемы) трудно, то они находятся расчетным путем через номинальные значения токов и потерь мощности, т. е. приближенно, но с поправкой, учитывающей отличие действительно протекающих токов в линии от расчетных (номинальных) [216]. Поэтому в случае сложной сети эквивалентное сопротивление определяется по выражению

$$R_{\text{э}} = \frac{\sum \Delta P'_{\text{у}}}{3I_{\text{л.н}}^2} + \frac{\sum \Delta P''_{\text{у}}}{3I_{\text{л.н}}^2} \cdot \frac{I_{\text{ср}}^2}{I_{\text{л.н}}^2}. \quad (1.43)$$

Здесь: $I_{\text{ср}}$ – средний за расчетный период ток головного участка линии;

$I_{\text{л.н}}$ – номинальный ток головного участка линии;

$\sum \Delta P'_{\text{у}} = \sum 3I_{\text{н}}^2 \cdot R_{\text{у}20}$ – сумма номинальных активных потерь мощности всех участков данной линии, сопротивления которых взяты при температуре 20 °С;

$\sum \Delta P''_{\text{у}} = \sum 3I_{\text{н}}^2 \cdot \Delta R_{\text{у}}$ – сумма дополнительных активных потерь мощности, получающихся за счет увеличения сопротивления участка $\Delta R_{\text{у}}$ при протекании по нему номинального тока; $I_{\text{н}}$ – номинальный ток одного участка линии; $R_{\text{у}20}$ – сопротивление одного участка линии при 20 °С.

Увеличение сопротивления участка сети ΔR_y определяется по выражению

$$\Delta R_y = K \frac{I_H^2}{I_M^2}, \quad (1.44)$$

где $K = \Delta\theta \cdot K_{y.c}$ – максимально допустимый перегрев провода; $K_{y.c}$ – коэффициент увеличения сопротивления от нагревания; I_M – допустимый по нагреву ток одного участка линии; $\Delta\theta$ – разность температур провода и окружающей среды.

При таком расчете потерь энергии эквивалентное сопротивление определяется на основании данных о потерях. Определение величины эквивалентного сопротивления сети по детерминированной зависимости (1.43) сопряжено с известными трудностями информационного характера, связанными со сбором и обработкой данных по каждому участку цеховой сети.

Этот метод имеет ряд существенных недостатков, и в первую очередь это, как показали наши исследования, неполный учет физических параметров сетей и режимов их работы [54; 134].

В ряде других поисковых работ [63; 64; 248] впервые показана возможность применения уточненного метода расчета эквивалентного сопротивления при учете основных влияющих характеристик оборудования.

1.1.5. Метод расчета потерь в промышленной сети с учетом нагрева

Как известно, нагрузочные потери активной мощности в любом элементе оборудования сети вычисляются по выражению

$$P_{\text{пот}} = 3I^2 \cdot R, \quad (1.45)$$

где R и I – эквивалентное сопротивление и ток рассматриваемого элемента.

Потери ЭЭ ΔW при этом определяются по выражению

$$\Delta W = P_{\text{пот}} \cdot T,$$

где T – время расчетного периода.

Общеизвестно, что омическое сопротивление проводника зависит от температуры [168; 169; 178]:

$$R = R_0 \cdot [1 + \alpha(\theta_{\text{окр}} + \theta_{\text{п}})], \quad (1.46)$$

где R_0 – сопротивление линии при 0°C ; α – коэффициент увеличения сопротивления; $\theta_{\text{окр}}$ – температура помещения цехов; $\theta_{\text{п}}$ – превышение температуры линии над температурой помещения цеха (перегрев проводника).

Однако, температура при вычислениях потерь энергии практически не учитывается, поскольку точное определение температур обычно является достаточно сложной задачей [120; 179].

Так как диапазон изменения температуры кабеля или провода, зависящий от изменения тока, обычно составляет чуть больше половины диапазона его рабочих температур [186; 237], то в этом интервале сопротивление изменяется практически на 25 %.

Определим производную потерь по току

$$\frac{dP_{\text{НОМ}}}{dI} = 6IR + 3I^2 \frac{dR}{dI}. \quad (1.47)$$

Введем переменные w и b и вычислим их значения из формул

$$w = \alpha R_0 / U^2; \quad (1.48)$$

$$b = 1/\alpha + \theta_{\text{окр}}, \quad (1.49)$$

где U – напряжение.

Тогда средние потери мощности можно представить выражением

$$P_{\text{пот}} = \frac{1}{t_2 - t_1} w \int_{t_1}^{t_2} S_2 (b + \theta_{\text{п}}) dt. \quad (1.50)$$

Перегрев провода или кабеля определяется нагрузкой [15; 38; 42]. Если не учитывать скорость изменения температуры помещений цехов, то справедливо соотношение

$$S^2_w(b + \theta_{\Pi}) = C \frac{d\theta_{\Pi}}{dt} + A_T \theta_{\Pi}, \quad (1.51)$$

где C – теплоемкость проводника сети; A_T – коэффициент теплоотдачи.

В результате получим, что потери можно вычислить путем решения уравнения (1.51) и интегрирования (1.50). В общем случае решение может быть получено с использованием численных методов. Но если мощность и температура помещения цехов не изменяется, то выражение (1.50) можно преобразовать к более удобному виду

$$P_{\text{пот}} = S^2_w \left(b + \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} \theta_{\Pi} dt \right) = S^2_w (b + \theta_{\Pi, \text{cp}}), \quad (1.52)$$

где $\theta_{\Pi, \text{cp}}$ – средний перегрев в расчетном диапазоне.

В ряде наших работ [63; 64; 246] показана необходимость учета нагрева линий систем внутривозовского электроснабжения и обоснована высокая точность вычисления потерь ЭЭ при таком учете.

1.2. Вероятностно-статистические методы расчета потерь электроэнергии

Факторами обычно называют внешние условия, влияющие на эксперимент. Согласно предлагаемой классификации (см. рис. 1.6) указанные методы включают в себя:

1. Метод наименьших квадратов.
2. Планирование эксперимента.
3. Метод регрессионных зависимостей.
4. Факторный анализ.

1. В условиях эксплуатации цеховых сетей не всегда возникает необходимость в поэлементном анализе сети. При определении основных направлений по снижению потерь можно пользоваться обобщенными технико-экономическими показателями по потерям ЭЭ, полученными на основе вероятностно-статистических оценок.

Наиболее распространенными характеристиками случайных величин X , Y являются статистические математические ожидания (средние значения) m_x , m_y и статистическое среднеквадратичное отклонение [19]

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum (x_i - m_x)^2}{n-1}}, \quad (1.53)$$

где x_i – значение величины X ; n – число значений.

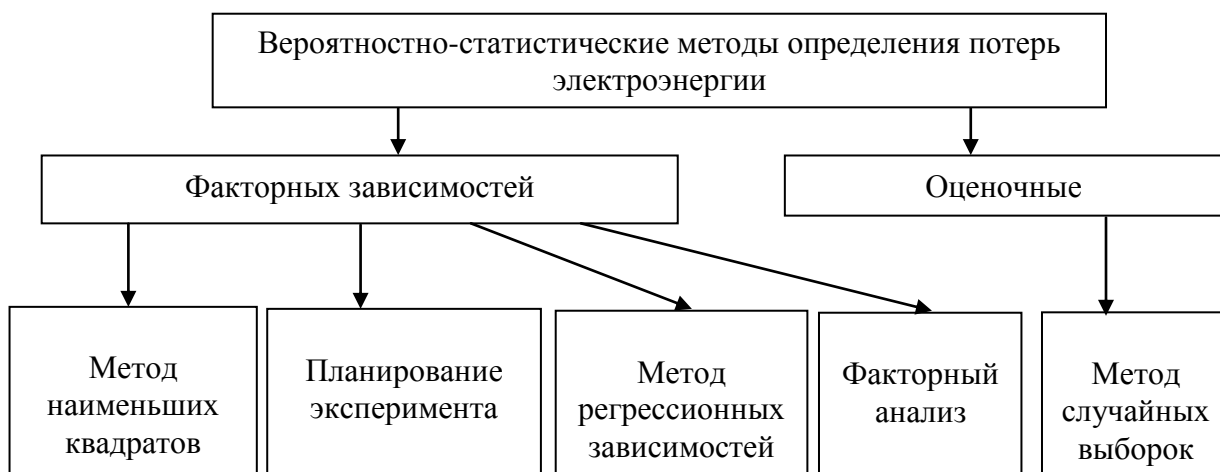


Рис. 1.6. Классификация вероятностно-статистических методов определения потерь ЭЭ

Для характеристики тесноты линейной связи между двумя случайными величинами X и Y используют коэффициент корреляции [20]

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - m_x)(y_i - m_y)}{\sigma_x \cdot \sigma_y (n-1)}, \quad (1.54)$$

который может принимать значения в диапазоне ± 1 . Чем ближе r_{xy} к 1 или -1 , тем существеннее связаны между собой величины X и Y и появляется возможность показать регрессионную зависимость $Y = b + aX$, где a – коэффициент пропорциональности. В формуле (1.54) σ_x, σ_y – среднеквадратичные отклонения.

Выбор наилучшего значения коэффициента a зависит от того, что мы условимся считать наилучшим. Можно выбрать коэффициент a так, чтобы среднее отклонение величин ax от y было минимальным.

Возможны и другие способы. На практике наиболее часто используют так называемый метод наименьших квадратов, в котором наилучшим считается коэффициент, обеспечивающий минимум суммы квадратов отклонений [104],

$$F = \sum_{i=1}^n (y_i - ax_i)^2 - \min. \quad (1.55)$$

Единственным обоснованием такого понимания наилучшего коэффициента является то, что полученная при этом зависимость является наиболее вероятной (т. е. является математическим ожиданием зависимости) в случае, если величина Y распределена по нормальному закону. Для обеспечения условия (1.55) необходимо производную по коэффициенту a приравнять нулю:

$$\frac{dF}{da} = -\sum_{i=1}^n 2(y_i - ax_i)x_i = 0. \quad (1.56)$$

Тогда коэффициент a можно определить из соотношения

$$a = \frac{\sum_{i=1}^n y_i x_i}{\sum_{i=1}^n x_i^2}. \quad (1.57)$$

В практических расчетах, как правило, приходится определять коэффициенты зависимости случайной величины Y (результатирующего признака) не от одной, а нескольких величин (факторов) [33]:

$$Y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + \dots + a_nx_n. \quad (1.58)$$

При расчетах потерь ЭЭ в цеховых сетях в качестве факторов могут выступать такие величины, как средневзвешенный коэффициент мощности нагрузок сети, масса проводникового материала сетей, количество питающих линий на участке сети и т. д.

В работах [41; 48; 225; 226] впервые опубликовано, что факторы потерь ЭЭ могут выступать в качестве одного из критериев оценки эффективности функционирования систем промышленного электроснабжения.

2. Планирование эксперимента в системах промышленных предприятий начинают с выбора факторного пространства, которое изучается с целью решения задач оценки функциональных характеристик систем и электрооборудования и отыскания оптимальных условий эксплуатации [13; 21; 136; 219].

Повышение эффективности и качества работы промышленных предприятий тесным образом связано с определением технологического расхода ЭЭ в сетях различного номинального напряжения. Сложность решения подобных оптимизационных задач возрастает по мере снижения уровня напряжения в сетях, где сказывается многочисленность и неоднозначность параметров элементов сетей, ограниченность [29], а часто и неопределенная достоверность режимной информации. Это в первую очередь относится к распределительным сетям низкого напряжения, число элементов в которых на крупных предприятиях достигает десятков тысяч. Все это неизбежно приводит к необходимости эквивалентирования параметров схем сетей в целях уменьшения числа данных, необходимых для выполнения расчетов и принятия обоснованных рекомендаций [75; 97; 156].

Применение методов планирования эксперимента [174; 185] эффективно в случае, когда математическое описание объекта (или явления) неизвестно либо имеет сложный и труднообозримый вид, а все параметры (факторы), от которых зависит значение функции, известны и при зафиксированных

их величинах значение функции легко определяется из опыта. Эксперимент может быть как физическим, так и вычислительным. В последнем случае значение функции определяется расчетом на ЭВМ. Статистические методы планирования эксперимента позволяют значительно интенсифицировать труд исследователя, сократить сроки и затраты на эксперимент, повысить достоверность выводов по результатам исследования [2; 233].

В качестве примера использования метода планирования эксперимента можно привести расчет зависимости потерь ЭЭ в цеховой сети от обобщенных характеристик электрооборудования. В то же время для конкретных значений нагрузок и параметров электрооборудования потери энергии ΔW легко определяются расчетом.

Однако для того чтобы получить зависимость

$$\Delta W = f(x_1, x_2, \dots, x_n), \quad (1.59)$$

где x_1, x_2, \dots, x_n – обобщенные параметры электрооборудования системы цехового электроснабжения, в качестве которых могут рассматриваться такие величины, как отпуск ЭЭ в сеть с шин цеховой подстанции, количество, длина сечения участков сети и т. д., необходима информация о диапазонах изменения этих величин.

При этом число сочетаний значений факторов может быть сколь угодно большим. Расчет величины потерь ЭЭ необходимо произвести для каждого сочетания.

Поэтому не теряют актуальности вопросы разработки новых методов оценки схемных и режимных параметров систем цехового электроснабжения как основы математического обеспечения решения задач расчета, анализа и планирования потерь ЭЭ, что утверждается в наших исследованиях [39; 40; 246].

3. В цеховых сетях 0,4 кВ для прогнозирования потерь ЭЭ также используют вероятностно-статистические методы в виде уравнений регрессии [82; 95; 153; 178]

$$y = b_0 \left(\prod_{i=1}^m X_i b_i \right) \varepsilon, \quad (1.60)$$

где m – число факторов; b_0, b_i – коэффициенты регрессии; ε – случайная ошибка.

Существенным преимуществом применения вероятностных моделей служит доступность сбора параметрической информации [232].

При этом становится возможной разработка методов комплексной оценки и анализа потерь ЭЭ [13; 27].

Для решения задачи управления потерями важным является вопрос выбора базовой структурной единицы, для которой строится исходная математическая модель, ведется анализ. С этой целью по данным конкретных схем проводятся пассивные эксперименты и в дальнейших исследованиях система цехового электроснабжения преобразовывается в стилизованную, в которой фиксируются радиальные и магистральные участки.

Условием преобразования реальной схемы цеховой сети в стилизованную является равенство потерь ЭЭ до и после преобразования; эквивалентированию при этом подлежат «зоны» магистралей и ответвлений и радиальные участки, причем в значительной степени сохраняется информация о параметрах и топологии сети. Выделение перечисленных «зон» и участков, отражая существующие в настоящее время методы расчетов, позволяет при анализе структуры потерь выявить «очаги» наибольших потерь ЭЭ, на основе использования универсальных математических моделей, впервые проиллюстрированные наиболее полно в наших исследованиях [44; 47; 60; 70].

4. В задачах оценки функциональных параметров систем электроснабжения в основе математических моделей могут рассматриваться обобщенные параметры электрооборудования распределительных сетей низкого напряжения. Использование таких параметров значительно упрощает анализ результатов расчетов, а также сокращает объем последующих вычислений [26].

В условиях физического эксперимента или расчета факторы могут варьироваться, благодаря чему можно исследовать влияние контролируемого фактора на функцию цели. В этом случае говорят, что фактор варьируется на разных уровнях или имеет несколько уровней. В зависимости от количества факторов, включенных в анализ, различают квалификацию по одному признаку – однофакторный анализ, по двум признакам – двухфакторный анализ и многостороннюю классификацию – перекрестную классификацию, изучением которой занимается многофакторный анализ [80; 104; 188].

Иногда величины X_1, X_2, \dots, X_n известны из физических представлений об их взаимосвязи с величиной Y . Часто эта связь только предполагается. Для выявления значимых факторов из числа намеченных как раз и применяют методы факторного анализа. Аппарат факторного анализа позволяет выполнить эту операцию, используя определенные критерии, учитывающие как коэффициенты корреляции между факторами, так и долевого вклад каждого из слагаемых в величину Y . Незначимые факторы отбрасываются, а коэффициенты при оставшихся факторах определяют с помощью описанного выше метода наименьших квадратов [192].

Такой статистический метод анализа результатов наблюдений, зависящий от различных, одновременно действующих факторов, выбор наиболее важных факторов и оценка их влияния – все это составляет дисперсионный анализ [193].

Для проведения дисперсионного анализа необходимо соблюдать следующие условия: результаты наблюдений должны быть независимыми случайными величинами, имеющими нормальное распределение и одинаковую дисперсию. Для определения уровня потерь ЭЭ в системах цехового электроснабжения в качестве обобщенных параметров (факторов) могут быть приняты такие параметры, как средняя длина линий сети, их количество, коэффициент загрузки оборудования, сечение линий и т. д. В сущности, обобщенные характеристики отражают совокупное влияние на величину потерь ЭЭ различных схемных и режимных параметров сети.

При этом универсальность математических моделей, основанных на использовании обобщенных характеристик, заключается в том, что относительная простота расчета обобщенных характеристик позволяет использовать их для обоснованного прогноза и планирования потерь ЭЭ при изменениях схемных и режимных параметров сети. Таким образом, полученные в результате расчетов универсальные математические модели дают возможность реализовать комплексный подход к решению задач управления потерями ЭЭ в системах электроснабжения, рассмотренных в ряде наших поисковых исследований [10; 40; 103].

1.3. Классификация методов определения потерь электроэнергии во внутризаводских промышленных сетях

Как следует из предлагаемой (рис. 1.7) классификации методов, случайный характер процесса электроснабжения потребителей не всегда позволяет получить детерминированные зависимости для его интегральных характеристик – таких как пропуск энергии или потери энергии в сети.

Основной трудностью на этом пути, как отмечалось ранее, является отсутствие достоверной и полной информации. Потери активной энергии во внутризаводских промышленных сетях вычисляют для учета в расходной части электробаланса предприятий разного уровня.

Эта статья расходной части электробаланса не может быть определена непосредственными измерениями, и поэтому ее приходится находить прямым расчетом по величинам фактических нагрузок, пользуясь общеизвестными формулами. Потери ЭЭ можно также определять с использованием вероятностно-статистических методов. При этом расчет потерь мощности усложняется тем, что для их вычисления требуется знание закона изменения нагрузки в расчетный период времени [138; 144].

В настоящее время, как мы видим, разработано большое количество методов расчета потерь ЭЭ в сетях различных напряжений. Совершенствование

этих методов идет в основном в двух направлениях: максимального уточнения их с учетом возможно большего числа факторов и облегчения практического использования методов путем введения упрощений и, следовательно, снижения точности расчета.

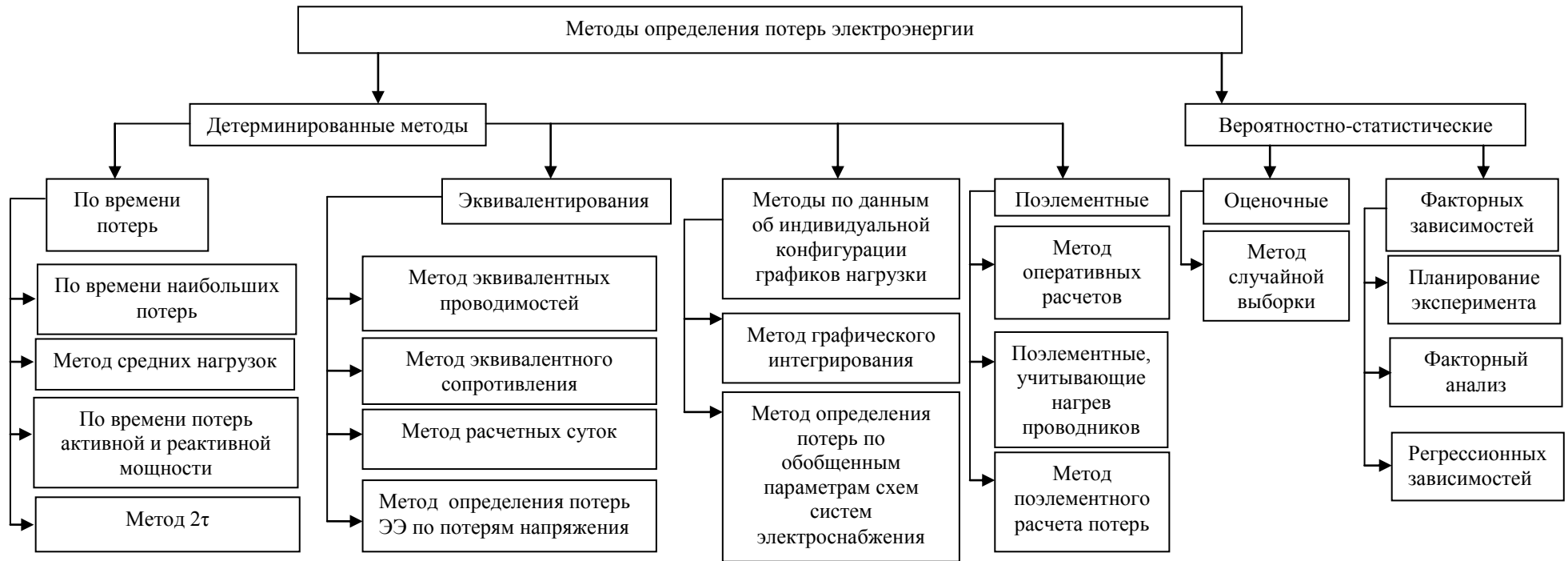


Рис. 1.7. Классификация методов определения потерь ЭЭ в системах промышленного электроснабжения

При этом можно указать следующие области применения и некоторые особенности детерминированных методов расчета потерь ЭЭ, показанных соискателем впервые в работах [39; 54; 57].

1. Среди детерминированных методов можно указать методы расчета по времени потерь, эквивалентирования и поэлементные методы.

2. Использование методов по времени потерь требует большого количества исходных данных.

3. Методы эквивалентирования имеют погрешности при «сворачивании» схемы сети.

4. Метод $K_{M/H}$ требует проведения одновременных измерений напряжений и токов. Неучет конфигурации схемы, распределения нагрузок, коэффициента мощности может снизить достоверность результатов.

5. Методы поэлементных расчетов имеют высокую точность расчетов, но для практических расчетов они требуют современного информационного обеспечения [49].

1.4. Области применения вероятностно-статистических методов расчета потерь электроэнергии

Как следует из вышеизложенного, все вероятностно-статистические методы расчета позволяют получить определенные сведения о параметре, зависящем от комплекса других параметров. Причем аналитический вид искомой зависимости либо неизвестен, либо настолько сложен, что использование ее в дальнейших расчетах может быть затруднено. В этом случае приходится использовать способы упрощенного, более наглядного представления зависимости. Естественным желанием является выявить оптимальные упрощения, вносящие как можно меньшую погрешность при как можно большей простоте и наглядности получаемой формулы [243].

При выборе метода решения задачи можно пользоваться следующими рекомендациями, впервые детально рассмотренными в [58].

1. Если известен ряд значений результирующего параметра и соответствующие им значения факторов, от которых зависит результирующий параметр, а из физических представлений об их зависимости можно предположить ее вид (линейная, квадратичная, полиномиальная т. п.), то наилучшие значения коэффициентов этой зависимости выявляют методом наименьших квадратов.

2. При использовании метода наименьших квадратов предполагается, что зависимость строится от всех намеченных факторов. На практике может встречаться задача, в которой ряды значений результирующего параметра и факторов известны, однако неизвестно, все ли факторы оказывают существенное влияние на значение результирующего параметра и все ли их стоит учитывать в упрощенной зависимости. Выбор значимых факторов осуществляет аппарат факторного анализа. Существенным аспектом является то, что этот аппарат анализирует значимость только линейной связи. После выбора значимых факторов (они, как правило, удовлетворяют условию независимости) значения коэффициентов линейной зависимости параметра от этих факторов определяют методом наименьших квадратов.

3. Если ряды соответствующих друг другу значений неизвестны, то встает задача об их получении. Если значения каждого ряда взаимно независимы, то получение этих значений не вызывает трудностей – необходимо произвести столько расчетов, сколько нужно для получения искомой величины с заданной точностью и достоверностью.

Например, если ставится задача выявления зависимости потерь в линиях разомкнутых сетей от суммарной длины участков линий и установленных коммутационных аппаратов на линии, то ясно, что потери в конкретной линии не зависят от количества коммутационных аппаратов в другой линии. Поэтому для каждой линии отдельно рассчитывают три величины: потери, суммарную длину участков и количество коммутационных аппаратов, из физических представлений устанавливают вид зависимости и затем определяют численные значения входящих в нее коэффициентов методом наименьших квадратов. Если однозначных представлений о виде зависимости нет, то может быть

намечено несколько разновидностей формул. Коэффициенты в каждой из них определяют методом наименьших квадратов, вычисляют среднеквадратичные ошибки каждой формулы и выбирают формулу с наименьшим значением ошибки.

4. В ряде задач факторы оказываются существенно зависимыми друг от друга, что не позволяет осуществлять их отдельный анализ.

Например, если необходимо выявить зависимость потерь ЭЭ в конкретной сети от нагрузок потребителей, то ясно, что зависимость их от нагрузки любого конкретного потребителя будет различной при различных нагрузках других потребителей. Необходимым условием этой задачи является учет взаимного влияния факторов. В этом случае получение исходных рядов наталкивается на необходимость расчета бесконечного количества сочетаний различных значений факторов. Использование же ограниченного количества расчетов, проведенных при сочетаниях, установленных волевым порядком, не гарантирует того, что эти сочетания достаточно хорошо отражают всю возможную совокупность сочетаний. В такого рода задачах следует использовать метод планирования эксперимента, который как раз и определяет, какие сочетания значений факторов следует рассмотреть, чтобы выявить закономерности, характерные для всей совокупности сочетаний. К таким задачам относится и задача определения потерь ЭЭ в цеховых сетях, для которых характерно наличие большого числа параметров, влияющих на потери ЭЭ.

1.5. Постановка задачи исследования

В рыночных условиях страны достоверный учет потерь ЭЭ и их снижение до оптимальных значений приобретает существенное значение [236; 260; 261].

Для определения технических потерь ЭЭ применяется большое число методов и методик [90; 112; 206; 210; 255].

Поскольку применение оценочных методов не учитывает значительное число факторов, влияющих на реальную структуру потерь ЭЭ, их численное

значение по уровням напряжения, для обоснования уточненных потерь в зависимости от имеющейся информации допускается использование точных схемно-технических методов [58].

Основными задачами расчета и исследования потерь являются обоснование факторов, их вызывающих и способов уменьшения потерь до оптимальных значений [143; 165; 173; 198].

Количество ЭЭ, поступившей на то или иное предприятие, всегда равно сумме ЭЭ, ушедшей с предприятия и израсходованной внутри него. Небалансы же являются следствием неточного измерения приборами составляющих баланса, а также имеющимся расходом, который вообще не измеряется приборами: технических потерь на предприятии, значение которых вычисляют расчетным путем, и коммерческих потерь, которые зависят не от характеристик объекта, а от воздействия внешних сил [84; 85; 87].

Известно, что важным условием правильного расчета допустимых небалансов является учет технических потерь на предприятии. Как известно, эти потери вычисляются расчетным путем с присущими любому расчетному методу погрешностями.

Фактические (отчетные) потери в экономическом плане являются строго детерминированными величинами, жестко связанными с денежными средствами, полученными за проданную энергию [165].

В опытах прошлых лет было показано, что на родственных предприятиях (производствах, цехах) ряда министерств, выпускающих однотипную продукцию в примерно равных объемах, но с различными удельными расходами ЭЭ на ее производство, фактические потери ЭЭ коррелировали с размерами удельных затрат: с ростом удельных энергозатрат, как правило, увеличивались и фактические потери ЭЭ, и наоборот (при тождестве качества готовой продукции) [10; 187].

Известно, что нагрузочные потери связаны с электропотреблением квадратичной зависимостью. Так как электрические сети высоких и средних напряжений, построенных в прошлом в расчете на гораздо больший уровень

электропотребления, чем имеющийся в настоящее время, еще долгое время будут оставаться неизменными, наблюдающийся ежегодный рост электропотребления также будет приводить к объективному росту нагрузочных потерь [252; 253].

Потери холостого хода на эксплуатируемом оборудовании будут практически постоянными.

Вместе с тем возможно определенное развитие сетей 0,4 кВ, обусловленное расширением малого бизнеса. Строительство новых линий 0,4 кВ приводит к некоторому снижению роста нагрузочных потерь по сравнению с квадратичной зависимостью, а увеличение протяженности существующих линий 0,4 кВ – к росту, превышающему квадратичный характер [84; 85; 87].

Сопротивления и потери мощности в элементах систем цехового электроснабжения исследованы недостаточно, что требует дальнейшего совершенствования методических подходов к указанной проблеме. Таким образом, становятся очевидными задачи исследования:

- проведение анализа методов и алгоритмов определения потерь ЭЭ в системах электроснабжения промышленных предприятий;
- разработка классификации по потерям ЭЭ в контактах низковольтных коммутационных аппаратов;
- выявление зависимости величины сопротивлений контактных соединений коммутационных аппаратов, применяемых в системах цехового электроснабжения, от номинальных данных аппаратов;
- разработка методов комплексной оценки эффективности функционирования низковольтных коммутационных аппаратов;
- разработка методов и математических моделей для определения эквивалентного сопротивления и потерь мощности в цеховых сетях, учитывающих структуру и динамику их изменения с использованием стандартного регрессионного анализа;
- разработка методов нечеткого регрессионного анализа для определения потерь ЭЭ при неопределенности исходной информации.

1.6. Выводы по первой главе

Анализ современных методов определения потерь ЭЭ позволяет сделать следующие выводы.

1. Проанализировано, что существующие в настоящее время детерминированные методы имеют большие погрешности в расчетах потерь ЭЭ.

2. Предложена классификация в зависимости от используемых для расчета исходных данных детерминированных методов, которые могут подразделяться на методы расчета по данным об индивидуальной конфигурации графиков нагрузки, методы расчета по времени потерь, эквивалентирования и методы, основанные на поэлементном расчете сетей.

3. Предложена классификация вероятностно-статистических методов, которые включают в себя оценочные методы и методы факторных зависимостей, применяемые для оценочных расчетов в целом по сети на основе обобщенных показателей.

4. Подтверждено, что применение вероятностно-статистических методов усложняется в случае многовариантного выполнения расчетов. При структурных изменениях схемы необходимо периодическое исследование погрешностей разработанных регрессионных зависимостей, применяемых для расчета потерь.

5. Показано, что при выборе метода определения потерь ЭЭ необходимо соблюдать условие соответствия методической и информационной погрешностей.

6. Определены области применения и выданы рекомендации по использованию детерминированных и вероятностно-статистических методов расчета потерь ЭЭ в зависимости от исходной информации и требуемой точности вычислений.

Глава 2. ИССЛЕДОВАНИЕ ФАКТОРНОГО ПРОСТРАНСТВА СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

2.1. Особенности принципов построения систем цехового электроснабжения

В настоящее время при расчете стоимости ЭЭ целесообразным является повышение достоверности величины расчета потерь ЭЭ при прогнозировании, контроле и анализе технико-экономических показателей работы промышленных объектов [102; 115; 121].

Передача, распределение и потребление ЭЭ на промышленных объектах должны производиться с высокой эффективностью, надежностью и требуемым качеством ЭЭ [129; 141; 146].

В цеховых сетях низкого напряжения широко используются комплектные распределительные устройства, комплектные трансформаторные подстанции, а также комплектные силовые и осветительные токопроводы [155; 159]. Применение комплектного электрооборудования и выбор его рациональной компоновки, а также конструктивного выполнения цеховых сетей обеспечивает безопасное обслуживание и ремонт, необходимую степень локализации повреждений и высокую эксплуатационную надежность [151; 199; 257].

Кроме того, в современных условиях при построении схемы электроснабжения необходимо учитывать следующие задачи, стоящие сегодня перед энергетической отраслью:

1. Надежность применяемого оборудования, направленную на обеспечение постоянно возрастающих потребностей в энергоснабжении.
2. Экологические требования.
3. Потребность в замене оборудования по причине его старения.
4. Либерализация процессов в цепи создания добавочной стоимости.
5. Внедрение новых информационных технологий и технологий связи.

Эти же задачи ставятся и перед производителями современного электрооборудования.

Показатели, определяющие тип линий цеховых сетей участков заводской сети, приведены нами в табл. 2.1.

Таблица 2.1

Факторы, влияющие на выбор типа линий

№ п/п	Показатели	Ориентировочные критерии наибольшей целесообразности	
		Радиальные линии	Магистральные линии
1	Число потребителей	менее 3	более 3
2	Потребляемые токи приемников ЭЭ	свыше 8 А	до 8 А
3	Отношение эквивалентной мощности к сумме расчетных нагрузок приемников ЭЭ	более 0,6	менее 0,6
4	Диапазон расчетных мощностей отдельных приемников ЭЭ	любой	3:1
5	Отношение $r_{ц} / \Delta r$ ($r_{ц}$ – расстояние центра установленных мощностей от источника ЭЭ; Δr – расстояние между наиболее удаленными нагрузками в направлении r)	менее 0,5	более 0,5

Выбор типа линий внутрицеховых сетей и способов их прокладки обусловлен следующими [215]:

– число, плотность, характер размещения и единичные мощности приемников; при малом числе, неравномерном размещении и большой

единичной мощности приемников целесообразным может оказаться применение проводов и кабелей, в противном случае – применение шинопроводов;

– схема сети, характер и длина линий (если они не выбираются одновременно с типом линий по предыдущему критерию); в магистральных сетях может оказаться целесообразным применение шинопроводов, в длинных неразветвленных линиях – кабелей, в коротких линиях – изолированных проводов;

– температура окружающей среды и наличие источников теплового излучения;

– подвижность приемников, приводящая к прокладке троллейных шинопроводов.

Сопротивления контактных соединений низковольтных аппаратов, согласно проведенным исследованиям, оказались соизмеримы с сопротивлениями линий цеховых сетей [36; 134]. Учет сопротивлений низковольтных аппаратов необходим как при расчетах переходных процессов, так и при определении потерь ЭЭ в цеховых сетях, что впервые обосновано в наших поисковых работах [244; 246].

В табл. 2.2 приводятся данные о потерях мощности в контактных соединениях некоторых российских и зарубежных низковольтных коммутационных аппаратов, устанавливаемых в системах цехового электроснабжения.

Таблица 2.2

Некоторые технические данные низковольтных аппаратов

Тип аппарата	Номинальный ток, А	Потери мощности, Вт	Общее сопротивление, мОм
1	2	3	4
Автоматические выключатели	50	52,5	7
	70	57,5	3,5
	100	64,5	2,15
	140	76,4	1,3

1	2	3	4
	200	132	1,1
	400	312	0,65
	600	442,8	0,41
	1000	750	0,25
Рубильники	100	3	0,5
	200	16	0,4
	400	32	0,2
	600	54	0,15
	1000	80	0,08
Разъединители	400	32	0,2
	600	54	0,15
	1000	80	0,08
	2000	120	0,03
	3000	180	0,02
Предохранители	100	5	1,26
	250	18,8	0,6
	400	32	0,3

Классификация сетей напряжением до 1 кВ по конструктивным особенностям представлена на рис. 2.1.

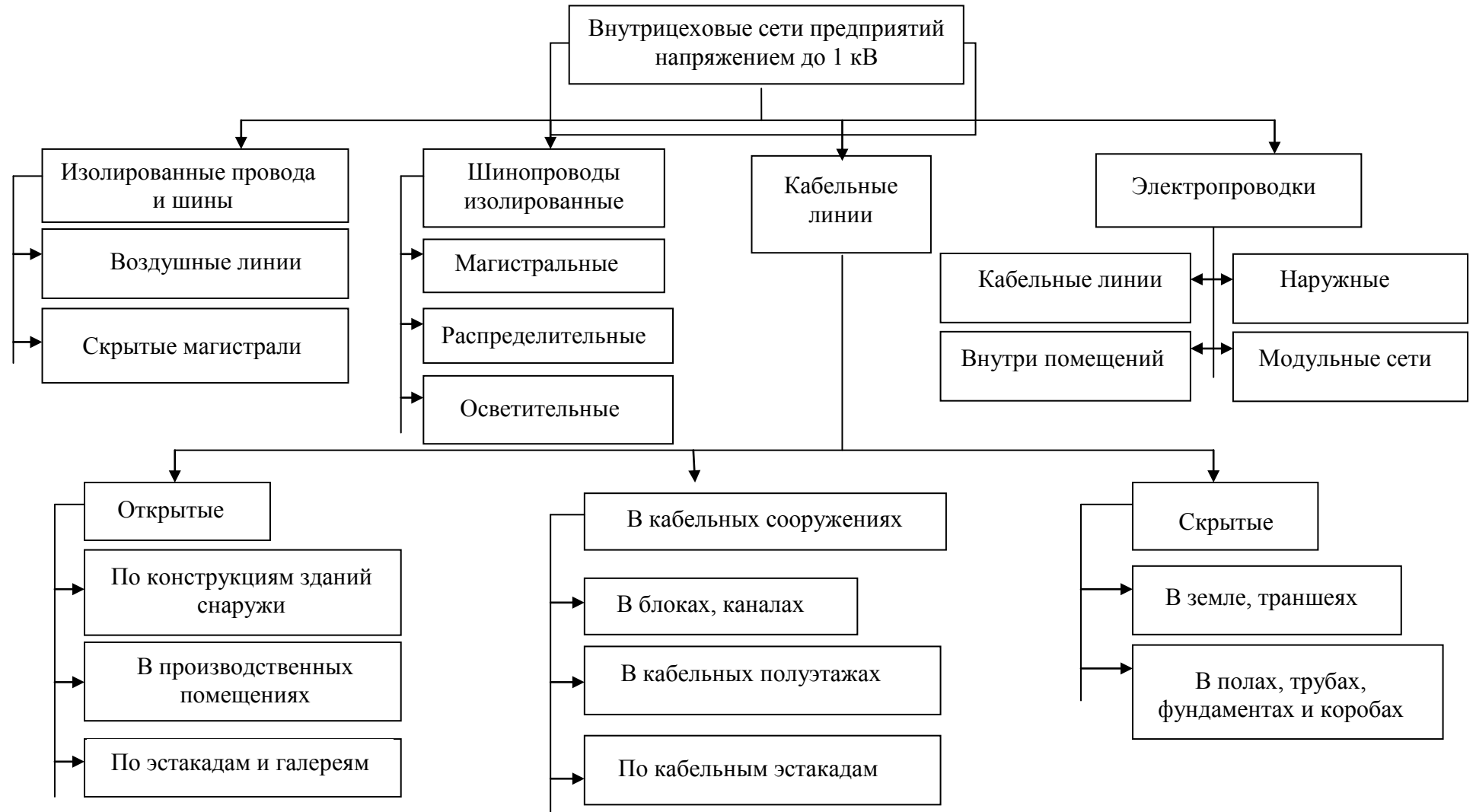


Рис. 2.1. Классификация сетей напряжением до 1 кВ по конструктивным особенностям

2.2. Анализ структуры систем цехового электроснабжения

В качестве объекта исследования проанализированы схемы цехового электроснабжения 0,4 кВ с различными типами и числом коммутационных аппаратов. Известно [244; 246], что сопротивление коммутационных аппаратов, установленных на линии, оказывает влияние на величину потерь ЭЭ в цеховых сетях.

Представлялось целесообразным исследовать цеховые сети напряжением 0,4 кВ некоторых предприятий с учетом их конструктивных и эксплуатационных особенностей. Предлагается следующая классификация схем цеховых сетей (рис. 2.2) по эксплуатационным особенностям.

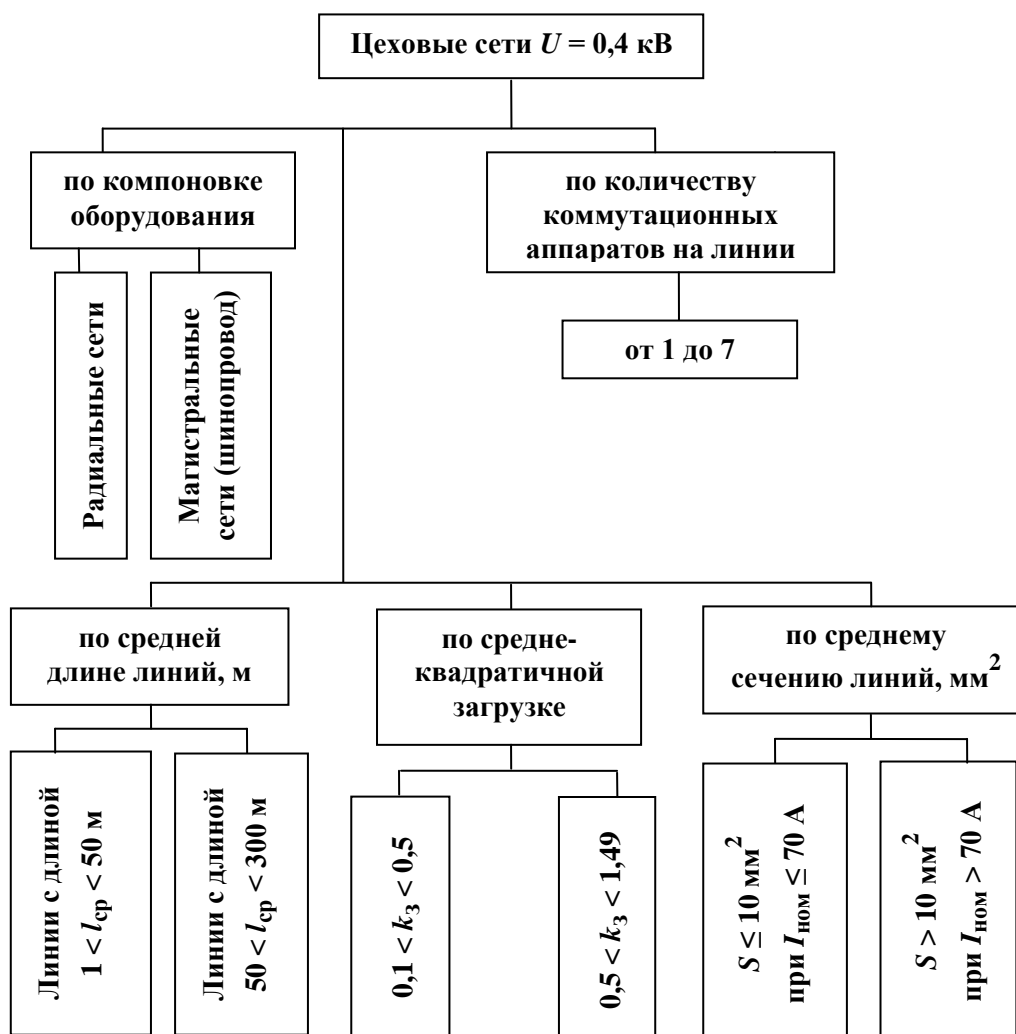


Рис. 2.2. Классификация схем цеховых сетей

Как показал анализ схем некоторых промышленных предприятий г. Казани цеховые сети напряжением 0,4 кВ можно классифицировать по конструктивным и эксплуатационным признакам (табл. 2.3). При этом отдельно указано оборудование отечественных и некоторых зарубежных фирм – производителей коммутационных аппаратов. Отечественные производители: ОАО «Ангарский электромеханический завод», ОАО «ДЗНВА» (Дивногорский завод низковольтных аппаратов), Октябрьский завод низковольтной аппаратуры, ЗАО ЗЭТА г. Кемерово, КЗЭА г. Кашин. Зарубежные производители: SIEMENS, Schneider Electric.

Таблица 2.3

Классификация анализируемых схем цехового электроснабжения

Фирма-производитель оборудования	Количество аппаратов на одной линии	Количество линий сети	Пределы изменения длины линии, м	Пределы изменения сечения линии, мм ²	Пределы изменения мощности приемника ЭЭ, питающегося от линии, кВт	Пределы коэффициента загрузки линии сети
1	2	3	4	5	6	7
Отечественный производитель	1	344	1 ÷ 100	2,5 ÷ 185	0,18 ÷ 140,7	0,16 ÷ 1,1
	2	396	25 ÷ 100	10 ÷ 185	37,8 ÷ 120	0,11 ÷ 0,78
	3	338	3 ÷ 100	2,5 ÷ 185	4,5 ÷ 68	0,72 ÷ 0,9
	4	240	3 ÷ 300	2,5 ÷ 240	4,5 ÷ 378	0,72 ÷ 0,91
	5	200	20 ÷ 120	2,5 ÷ 185	6 ÷ 350	0,73 ÷ 0,9
	6	220	20 ÷ 150	6 ÷ 150	10 ÷ 380	0,7 ÷ 0,91
	7	210	50 ÷ 300	6 ÷ 240	10 ÷ 420	0,73 ÷ 0,93

1	2	3	4	5	6	7
SIEMENS	1	177	20 ÷ 120	6 ÷ 120	27,7 ÷ 150	0,48 ÷ 1,49
	2	238	50 ÷ 120	2,5 ÷ 150	0,56 ÷ 158	0,1 ÷ 1,05
	3	190	10 ÷ 250	2,5 ÷ 120	0,7 ÷ 342,9	0,43 ÷ 0,9
	4	220	3 ÷ 250	2,5 ÷ 185	8 ÷ 381,1	0,3 ÷ 0,9
	5	210	30 ÷ 150	2,5 ÷ 150	6 ÷ 390	0,47 ÷ 0,92
	6	180	50 ÷ 200	6 ÷ 185	8 ÷ 410	0,48 ÷ 0,91
	7	195	40 ÷ 250	6 ÷ 240	8 ÷ 440	0,4 ÷ 0,92
Schneider Electric	1	117	10 ÷ 90	6 ÷ 240	21,1 ÷ 125	0,1 ÷ 1,56
	2	121	35 ÷ 100	2,5 ÷ 150	2 ÷ 305	0,14 ÷ 0,92
	3	94	5 ÷ 200	2,5 ÷ 120	3 ÷ 202	0,48 ÷ 0,95
	4	120	5 ÷ 170	2,5 ÷ 150	3 ÷ 1060,5	0,45 ÷ 0,93
	5	110	20 ÷ 100	2,5 ÷ 120	4 ÷ 920	0,46 ÷ 0,92
	6	115	30 ÷ 150	6 ÷ 150	22 ÷ 950	0,47 ÷ 0,93
	7	122	35 ÷ 250	6 ÷ 240	18 ÷ 1000	0,48 ÷ 0,96

Данные табл. 2.3 показывают основные схемные и режимные характеристики оборудования систем цехового электроснабжения. Графически пределы изменения этих характеристик представлены на диаграммах (рис. 2.3–2.6).

Из диаграммы (рис. 2.3) и табл. 2.3 видно, что на исследованных российских предприятиях установлены коммутационные аппараты производителей различных стран, но, в основном, применяется коммутационная аппаратура отечественного производства (коммутационные аппараты отечественных производителей встречаются на линиях, число которых колеблется от 240 до 396, фирмы SIEMENS – 177 ÷ 238, фирмы Schneider Electric – 94 ÷ 121).

Число низковольтной коммутационной аппаратуры зависит от назначения, длины линий (рис. 2.4), а также от мощности приемника ЭЭ, питающегося от этих линий (рис. 2.5). Один коммутационный аппарат установлен, как правило, на коротких радиальных линиях, от которых питаются приемники ЭЭ

небольшой мощности. А 3 или 4 коммутационных аппарата представляют собой сумму всей коммутационной аппаратуры, установленной на линии. При этом приемник ЭЭ, который питается от этой линии, может быть либо большой мощности, тогда на радиальной линии установлен 1 автоматический выключатель + 1 предохранитель + 1 рубильник, или эта линия является ответвлением от шинпровода, тогда к сумме коммутационной аппаратуры добавляется еще 1 автоматический выключатель перед шинпроводом.

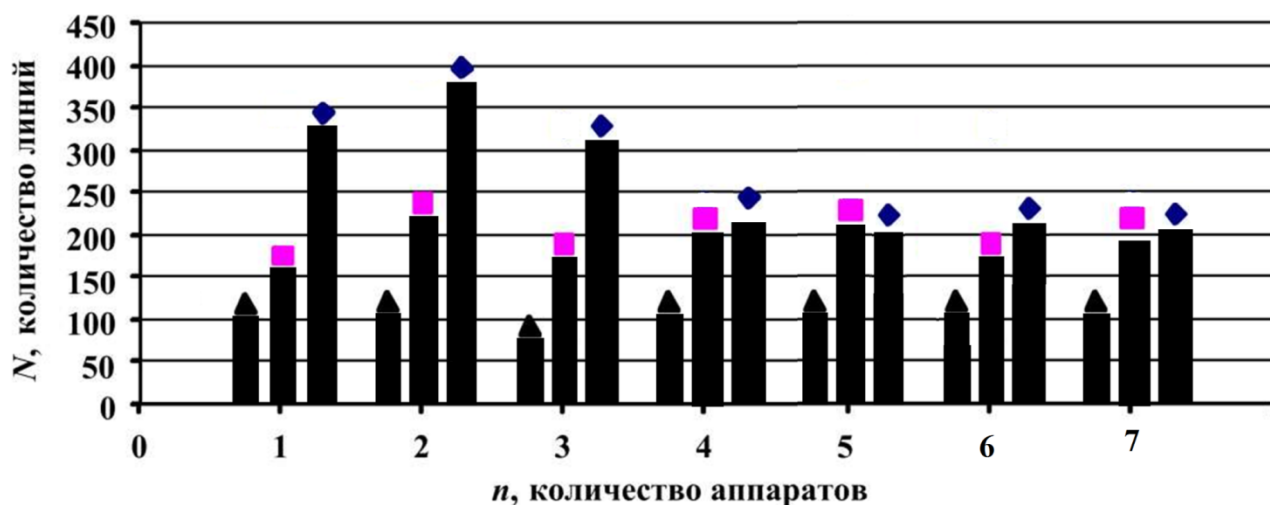
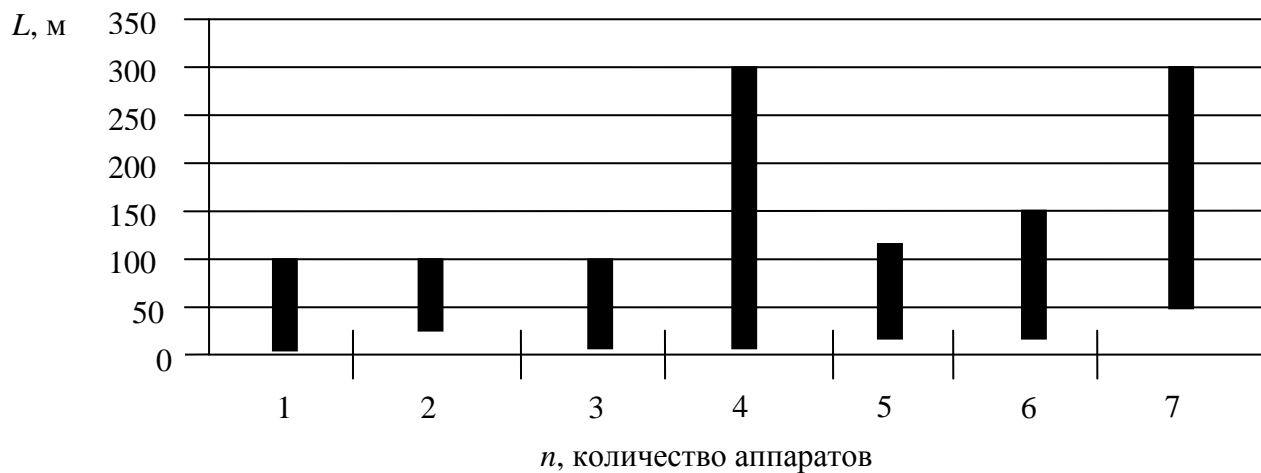
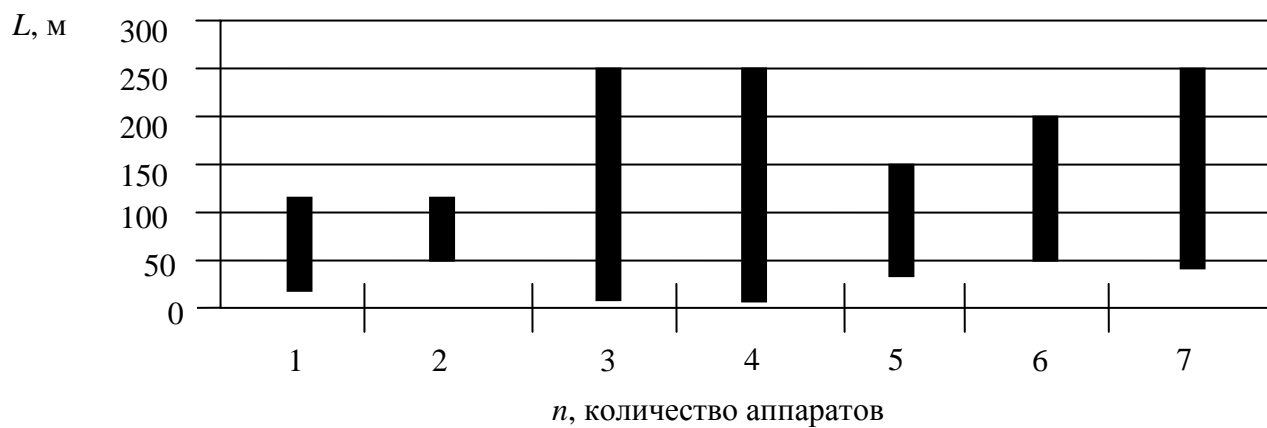


Рис. 2.3. Диаграмма соотношения количества линий и аппаратов, установленных на линиях:

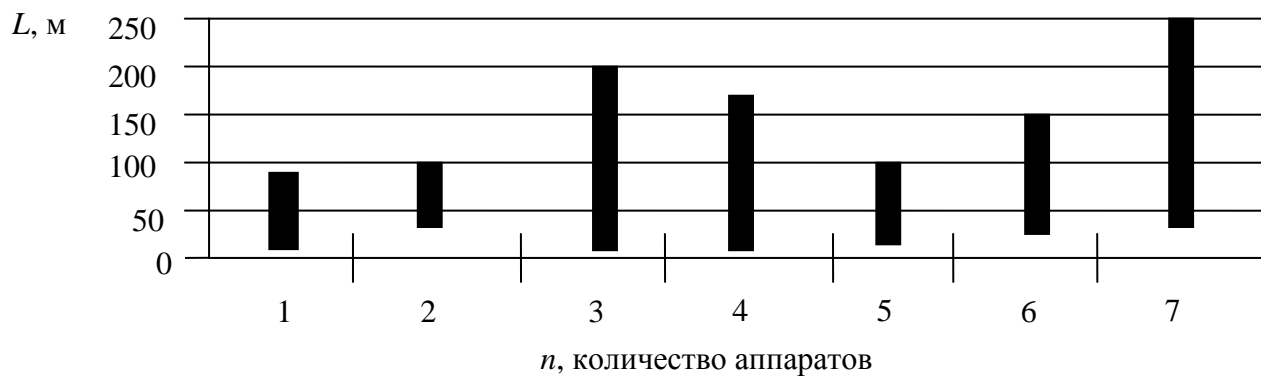
- ◆ – коммутационные аппараты отечественных производителей;
- – коммутационные аппараты фирмы SIEMENS;
- ▲ – коммутационные аппараты фирмы Schneider Electric



a

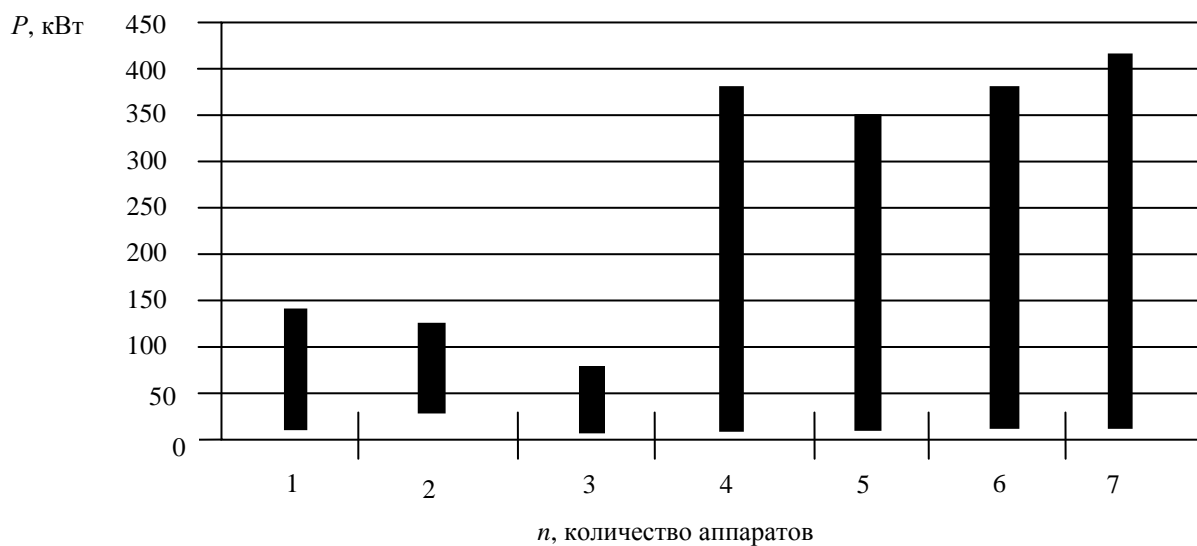


б

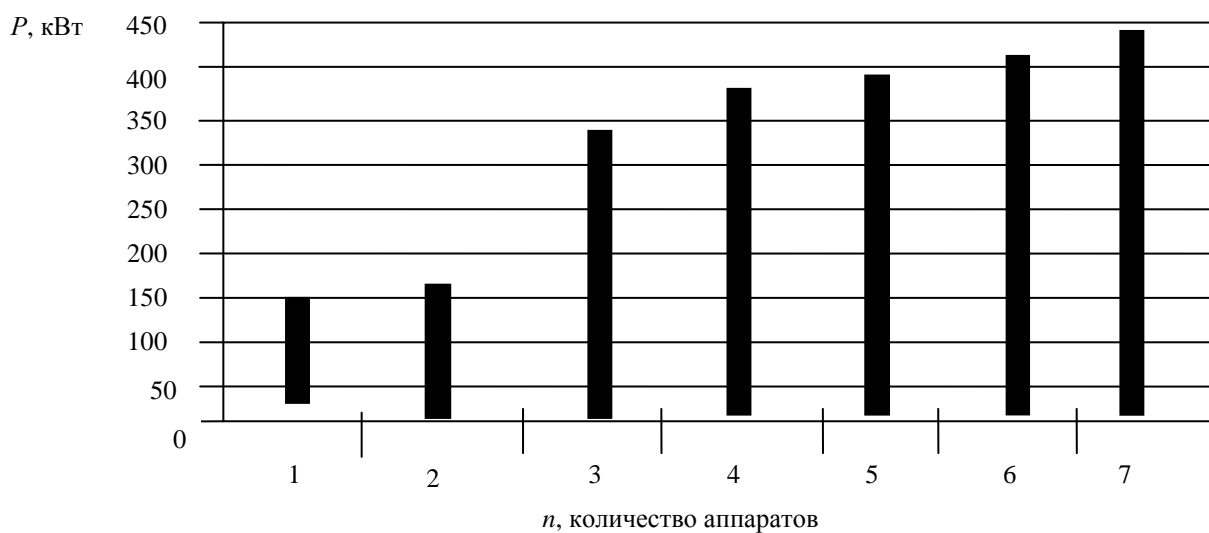


в

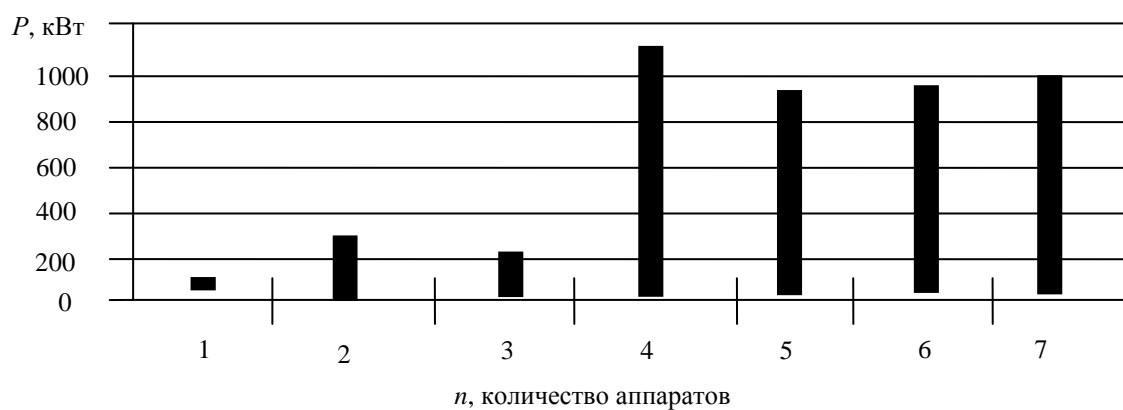
Рис. 2.4. Диапазон изменения длин линий, на которых установлены аппараты отечественных производителей (*a*), SIEMENS (*б*), Schneider Electric (*в*)



a



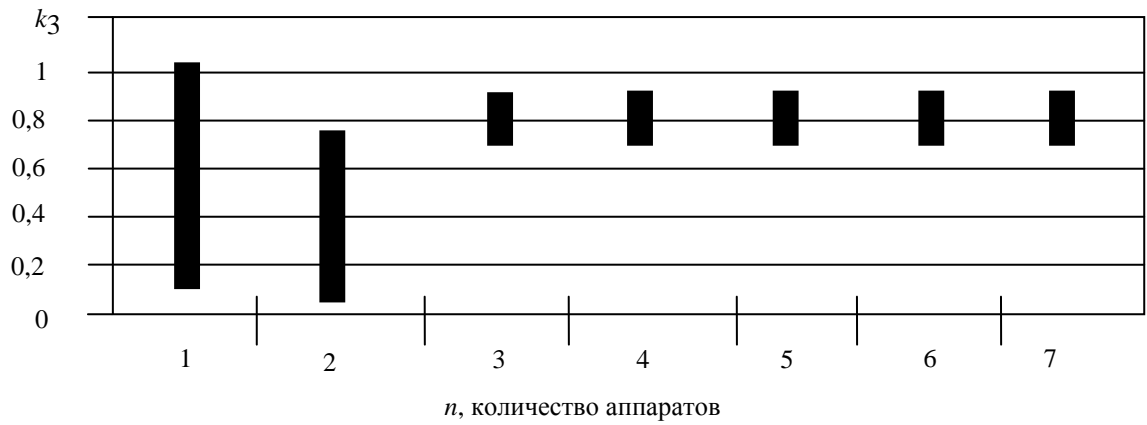
б



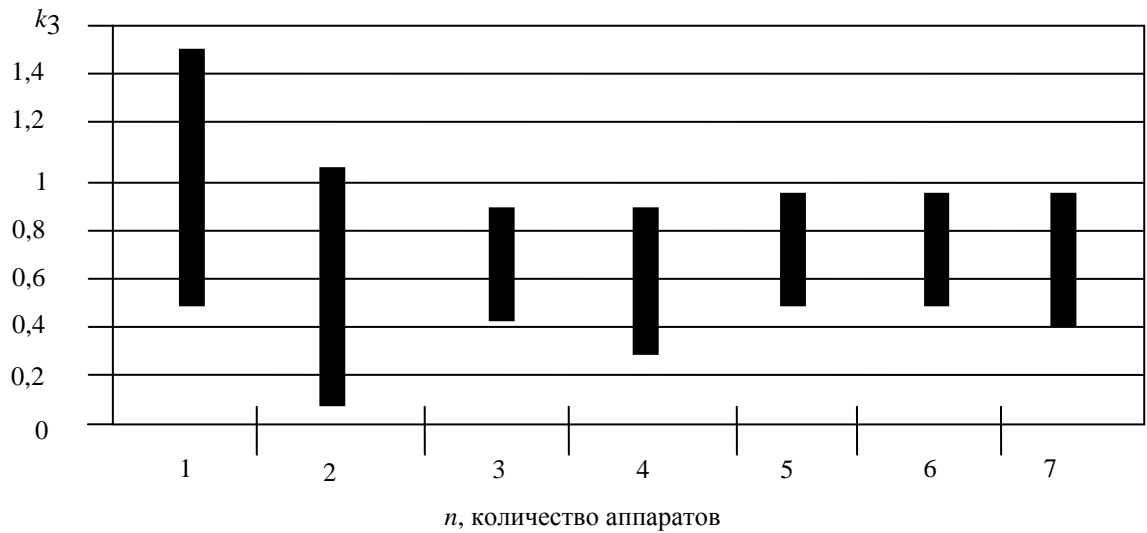
в

Рис. 2.5. Диапазон изменения мощности приемника ЭЭ P , питающегося от линий, на которых установлены аппараты отечественных производителей (*a*), SIEMENS (*б*), Schneider Electric (*в*)

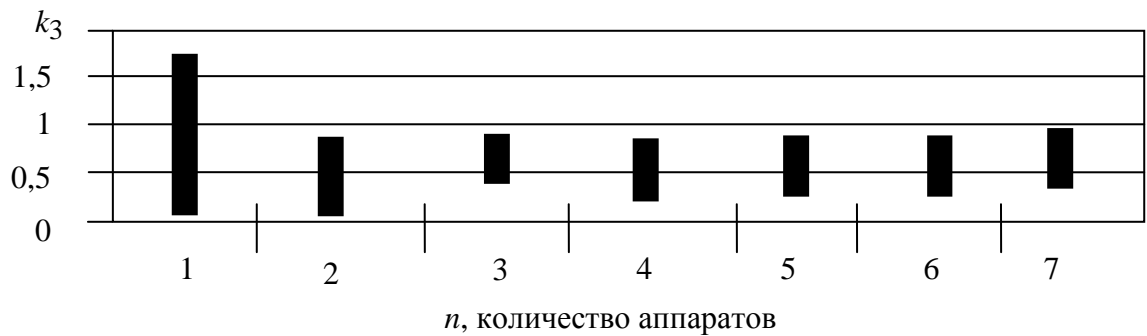
Изменение же коэффициента загрузки линии носит вероятностный характер, что показано на рис. 2.6.



a



б



в

Рис. 2.6. Диапазон изменения коэффициента загрузки линий k_3 , на которых установлены аппараты отечественных производителей (*a*), SIEMENS (*б*), Schneider Electric (*в*)

1. Таким образом, в результате анализа схем цехового электроснабжения выявлены основные конструктивные и эксплуатационные особенности характеристик электрооборудования: фирма-производитель низковольтных аппаратов, их число, длина, сечение, нагрузка и коэффициент загрузки линии.

2. Показано, что данные параметры схемы носят статистический характер и определяются технологическими условиями и конструктивными характеристиками оборудования.

3. Выявлено, что данные диаграмм пределов изменения длин линий, коэффициента загрузки линий, мощности приемников ЭЭ и количества аппаратов, установленных на линии, отражают наиболее полную статистическую информацию о параметрах цеховых сетей для достоверного вычисления потерь ЭЭ.

2.3. Расчетный и экспериментальный способы вычисления потерь электроэнергии во внутризаводских сетях

В работах [10; 31; 50; 51; 68; 103; 118; 126; 131; 180; 239] показана особая значимость исследований общезаводских структур путем составления и анализа энергетических балансов – важнейших элементов энергетического менеджмента и аудита предприятия.

Известно, что основным условием работы электрической сети с минимальными потерями является ее рациональное построение.

Поступление ЭЭ и ее расход по цехам и другим производственным подразделениям, по группам электроприемников, а также потери ЭЭ в сетях и оборудовании отражаются в электробалансе цеха или предприятия в целом [139; 140; 183].

Важное значение для оценки рационального использования ЭЭ имеет потребление ЭЭ, отнесенное к единице продукции, – удельный расход ЭЭ [103].

Изменяющаяся во времени электрическая нагрузка наглядно представляется, как известно, графиками нагрузки: сменными, суточными,

годовыми и другими – по охватываемому периоду времени; активной, реактивной и полной мощностей, а также тока – по рассматриваемой величине [145; 148; 251].

Использование спектральных методов позволяет не только учесть все особенности графиков нагрузок, а также процессы нагрева, влияющие на сопротивление проводников, но и получить значение эквивалентного тока, отвечающее фиксированному значению температуры перегрева с требуемой вероятностью [146, 149].

Уравнение нагрева проводника можно считать линейным, несмотря на зависимость коэффициента теплоотдачи от температуры нагрева, если одновременно сделать допущение о том, что сопротивление проводника с нагревом остается неизменным.

Нагрев проводника определяется графиком квадрата тока нагрузки $I^2(t)$. Установившаяся температура процесса изменения перегрева пропорциональна эквивалентному току [149]

$$I_{\text{э}}^2 = \sqrt{m_{y_B}^2 + \beta G_{y_B}^2}, \quad (2.1)$$

где $y_B = I_B^2$; m_{y_B} и G_{y_B} – математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение процесса $I_B^2(t)$ на выходе динамического звена ($Dз$), характеризующее во времени нагрев проводника; β – коэффициент, определяемый требуемой вероятностью получения значения $I_{\text{э}}$.

Для нахождения установившегося значения дисперсии квадрата тока на выходе $Dз$ $D_{y_B} = G_{y_B}^2$. Воспользуемся известным выражением

$$D_{y_B} = \int_{-\infty}^{\infty} G_{I^2}(\omega) g^2(\omega) d\omega, \quad (2.2)$$

где $G_{I^2}(\omega)$ – энергетический спектр квадрата тока; $g^2(\omega)$ – амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) D_3

$$g(\omega) = \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega\tau)^2}}, \quad (2.3)$$

где τ – постоянная времени нагрева проводника.

Влияние дополнительного нагрева на сопротивление проводника можно учесть введением в (2.1) дополнительного коэффициента [149]

$$\gamma_t = 1 + \varepsilon_\theta \Delta\theta_{\text{п}}, \quad (2.4)$$

где ε_θ – температурный коэффициент сопротивления; $\Delta\theta_{\text{п}}$ – допустимый перегрев проводника.

Выражение D_{y_B} получается просто, если известно соотношение эффективных полос частот спектров функций $G_{I^2}(\omega)$ и $g^2(\omega)$. Во втором случае эта полоса

$$\Omega = \frac{\int_0^\infty g^2(\omega) d\omega}{g_{\text{max}}^2(\omega)} = \frac{\pi}{2\tau}. \quad (2.5)$$

Для проводов, кабелей и шин напряжением 0,4 кВ значение τ составляет, как правило, свыше 10–15 мин, поэтому $\Omega_{\text{д}} = 0$. Дисперсия эквивалентного греющего тока [149]

$$D_{y_B} = G_{I^2}(0) \int_{-\infty}^{\infty} g^2(\omega) d(\omega). \quad (2.6)$$

Для целей практики наибольшее значение имеют графики нагрузки, характеризующиеся экспоненциально-косинусной или экспоненциальной корреляционной функцией, как имеющие преимущественное распространение. Применительно к первому случаю [149]

$$G_{I^2} = \frac{4G_I^4}{\pi[4a^2 + 2(\omega_0 - \omega^2)]} + 4m_I^2 \cdot \frac{G_I^2}{\pi[a^2 + (\omega - \omega_0^2)]}; \quad (2.7, \text{а})$$

$$D_{y_B} = G_I^4 \frac{a}{\tau(a^2 + \omega_0^2)} + 4G_I^2 m_I^2 \cdot \frac{a}{\tau(a^2 + \omega_0^2)}. \quad (2.7, \text{б})$$

где a и ω_0 – коэффициент затухания и собственная частота корреляционной функции.

Поскольку для нормального стационарного процесса [149]

$$4m_I^2 G_I^2 + 2G_I^4 = D_{I^2}, \quad (2.7, \text{в})$$

где m_I , G_I – математическое ожидание и среднее квадратическое отклонение процесса $I(t)$, то

$$D_{y_B} = \frac{a}{\tau(a^2 + \omega_0^2)} \cdot (D_{I^2} - D_I^2). \quad (2.7, \text{г})$$

В случае экспоненциальной корреляционной функции

$$D_{y_B} = \frac{1}{a\tau} (D_{I^2} - D_I^2). \quad (2.8)$$

На основании (2.1) окончательно [149]

$$I_{\text{э}} = \gamma_t \sqrt{m_I^2 + \beta \sqrt{\frac{a}{\tau(a^2 + \omega_0^2)} (D_{I^2} - D_I^2)}}; \quad (2.9, \text{а})$$

$$I_{\text{э}} = \gamma_t \sqrt{m_I^2 + \beta \sqrt{\frac{1}{a\tau} (D_{I^2} - D_I^2)}}. \quad (2.9, \text{б})$$

Анализ показывает, что для групповых графиков и в большинстве случаев для индивидуальных графиков значение первого слагаемого под радикалом существенно меньше второго ρ , т.е. $m_{I^2} > \rho$. Учитывая, что

$$m_{I2} = m_I^2 + G_I^2,$$

$$\text{то } I_3 \approx \gamma_t \left(m_I + \frac{\sqrt{G^2 + \rho}}{2} \right).$$

Выражения (2.7, в), (2.8), (2.9, а), (2.9, б) могут быть упрощены, когда $m_I > G_I$. В этом случае величиной D_I^2 можно пренебречь [149].

Поскольку ширина спектра сигнала $I^2(t)$ больше соответствующей ширины для апериодического звена, то процесс нагрева будет нормальным вне зависимости от вида закона распределения $I^2(t)$. Погрешность определения значения I_3 определяется погрешностями оценки m_I и G_I или D_I , ω_θ , a .

Если шаг квантования по времени для нахождения m_I , G_I , a , ω_θ выбирают из условия, чтобы среднеквадратическая ошибка не превышала 5 %, то погрешность оценки I_3 составит не более 10 % [149].

Одной из важнейших современных задач в промышленном производстве является экономия ЭЭ в условиях эксплуатации [18; 162; 167], которая может быть достигнута за счет проведения технологических и электротехнических мероприятий [91; 133; 135].

На современном этапе развития энергетики выдвинуты новые требования к учету потерь, обусловленные в основном трудностями получения параметрической и режимной информации о сети.

Цеховые сети напряжением до 1000 В характеризуются меньшими достоверностью и полнотой исходной информации, чем сети более высоких напряжений. Известные в настоящее время методики определения потерь ЭЭ в низковольтных сетях имеют большие погрешности расчетов [58; 71; 84; 93; 178].

На промышленных предприятиях потери ЭЭ определяются как разность показаний счетчиков, установленных на питающих шинах энергосистемы,

и счетчиков потребителей на распределительных подстанциях. Известно, что интегральный учет потерь измерительными приборами в большей части приводит к определенным ошибкам [98]. Неудовлетворительно обстоит дело и с учетом потерь в отдельных элементах и узлах системы электроснабжения, в которых определенные неувязки в показаниях даже современных счетчиков вводных и отходящих линий искажают реальную картину потерь в сетях. Выработка реактивной мощности компенсирующими устройствами предприятия (цеха) также связана с затратами ЭЭ, которые, как правило, вообще не учитываются, так как полностью входят в баланс электропотребления источников реактивной мощности [128].

Установка специальных счетчиков потерь ЭЭ в разветвленных распределительных сетях могла бы улучшить учет, но неизбежно привела бы к определенному удорожанию эксплуатации систем электроснабжения.

Значительно больше возможностей дают расчетные методы определения потерь ЭЭ. Некоторые из них получили свое развитие в наших исследованиях [37; 248; 249], где впервые обоснован учет таких факторов, как техническое состояние оборудования и величина сопротивлений низковольтных коммутационных аппаратов. Применительно к цеховым сетям анализ систем электроснабжения и потерь также впервые был рассмотрен в наших работах [36; 134; 244].

Выше отмечалось, что наиболее точный расчет потерь можно получить, используя реальные графики нагрузки каждого элемента сети за соответствующий период времени [140; 142]. Однако практически возможность использования таких графиков весьма ограничена. Поэтому приходится использовать графики нагрузок для характерных режимов, которые учитывают естественное изменение нагрузки (суточные, сезонные) [105; 256; 258].

Как известно, потери ЭЭ ΔW в элементе трехфазной сети определяются по выражению

$$\Delta W = 3I_3^2 R_3 \tau, \quad (2.10)$$

где I_3 – эффективный ток, R_3 – эффективное сопротивление элемента сети, τ – время потерь.

Эквивалентное сопротивление цеховой сети R_3 вычисляется [244]

$$R_3 = R_{20} l [1 + \alpha(\theta - 20)] + \sum_1^K R_K, \quad (2.11)$$

где R_{20} – удельное сопротивление проводника при 20 °С мОм/м; l – длина линии, м; α – температурный коэффициент увеличения сопротивления материала проводника линии, 1/°С; θ – температура проводника линии, °С;

$\sum_1^K R_K$ – суммарное сопротивление контактных соединений низковольтных коммутационных аппаратов, включенных в линию, мОм.

Температура жилы проводника определяется по выражению [205]

$$\theta = \theta_0 + \theta_T, \quad (2.12)$$

где θ_0 – температура помещений цехов; θ_T – перепад температур проводника над температурой помещений цехов.

Перепад температур соответствует уравнению теплового баланса

$$\Delta P d\theta = C d\theta + G_\theta (\theta - \theta_0) dt, \quad (2.13)$$

где ΔP – потери мощности в проводнике; C – теплоемкость проводника; G_θ – тепловая проводимость.

В нашем случае

$$\Delta P = I^2 r + I^2 \cdot r \cdot \alpha \cdot (\theta - 20). \quad (2.14)$$

Следовательно

$$I^2 \cdot r + I^2 \cdot r \cdot \alpha \cdot (\theta - 20) = C d\theta + G_\theta (\theta - \theta_0), \quad (2.15)$$

решением этого уравнения будет выражение

$$\theta_y = \theta_T (1 - e^{-\frac{t}{T_3}}) + \theta_0 e^{-\frac{t}{T_3}}, \quad (2.16)$$

где θ_T – перепад температуры жилы проводника, вызванный изменением мощности нагрузки; θ_y – установившееся превышение температуры, которого достигнет проводник, если данная нагрузка будет продолжаться длительно,

$$\theta_y = \frac{I^2 r}{B - I^2 r \alpha}; \quad (2.17)$$

T_3 – эквивалентная постоянная времени нагревания проводника,

$$T_3 = \frac{C}{B - I^2 r \alpha}; \quad (2.18)$$

t – время, от начала изменения мощности нагрузки; r – сопротивление проводника.

Общеизвестно, что

$$\frac{\theta}{\theta_H} = \left(\frac{I}{I_H} \right)^2, \quad (2.19)$$

где I_H – номинальный ток линии; θ_H – длительно допустимая температура нагрева проводника; θ – температура нагрева при токе I , так как

$$\frac{r_I}{r_{I_H}} = \tau_H \left(\frac{I}{I_H} \right)^2. \quad (2.20)$$

Здесь r_I – сопротивление проводника, соответствующее величине тока I ; r_{I_H} – сопротивление проводника соответствующее величине тока I_H . Как показано в работах [224; 229; 231], учет нагрева элементов цеховых сетей при определении потерь ЭЭ позволяет значительно снизить погрешность методов расчета потерь.

Для экспериментального определения потерь ЭЭ в линиях цеховых сетей требуется измерение мощности в зависимости от времени (см. рис. 2.7).

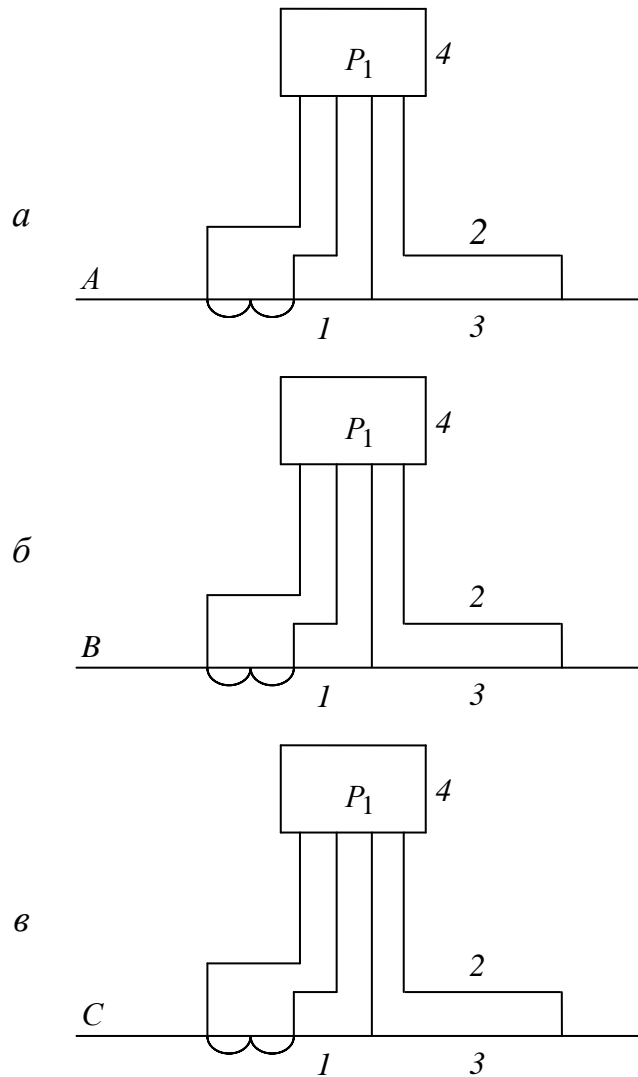


Рис. 2.7. Экспериментальная схема учета потерь ЭЭ

1 – трансформаторы тока; 2 – измерительные проводники;

2 – исследуемая линия; 3 – линия цеховой сети; 4 – приборы измерения мощности

В этом случае потери ЭЭ определяются по выражению

$$\Delta W = \int_0^t P_1 dt + \int_0^t P_2 dt + \int_0^t P_3 dt, \quad (2.21)$$

где P_1, P_2, P_3 – показания ваттметров.

Требование измерения потерь в каждом проводнике, по нашему мнению, необходимо по следующим причинам:

- наличия разной длины проводников;
- наличия несимметричной нагрузки по фазам;
- наличия различного количества включенных контактных элементов.

Такой метод измерения имеет значительную погрешность, что достаточно подробно описано в наших исследованиях [49; 53; 58].

2.4. Влияние основных эксплуатационных характеристик элементов систем цехового электроснабжения на величину потерь электроэнергии

Цеховые сети напряжением до 1000 В вследствие их большой протяженности характеризуются довольно высокими потерями ЭЭ. В настоящее время, когда наблюдается рост стоимости ЭЭ, повышение точности расчетов потерь в этих сетях является актуальной задачей. Непосредственное их измерение вызывает определенные трудности и дает большую ошибку в результатах. Поэтому более точный способ определения потерь ЭЭ – расчетный, который широко применяется на практике.

Потери ЭЭ для участка трехфазной сети определяются по выражению

$$\Delta W = 3I^2 R\tau, \quad (2.22)$$

где I и R – эффективный ток и сопротивление кабеля или провода участка сети; τ – время потерь.

Расчетному вычислению произведения $I^2\tau$ посвящено достаточно много работ [86; 96; 100; 178; 182; 220]. В то же время, как показывают исследования [53; 58; 95; 134; 230; 244; 248], определение сопротивления участка цеховой сети оказывается достаточно затруднительным, и возможная при этом ошибка может быть выше ошибки определения произведения $I^2\tau$.

Сопротивление участка сети зависит от марки, сечения и длины провода, температуры его токопроводящей жилы, являющейся функцией температуры окружающей среды и нагрузки провода.

При расчете сопротивления R участка сети необходимо учитывать влияние температуры токопроводящих жил и сопротивлений контактных соединений коммутационных аппаратов (2.2).

При изменении температуры в диапазоне от 30 до 90 °С сопротивление участка сети принимает значения от 104 до 120 % от начального r_{20} . Дополнительные погрешности обусловлены неточным учетом длин линий, старением проводов и т. п.

Температура жилы провода будет зависеть от его токовой нагрузки и температуры окружающей среды и может быть определена по зависимостям на рис. 2.8.

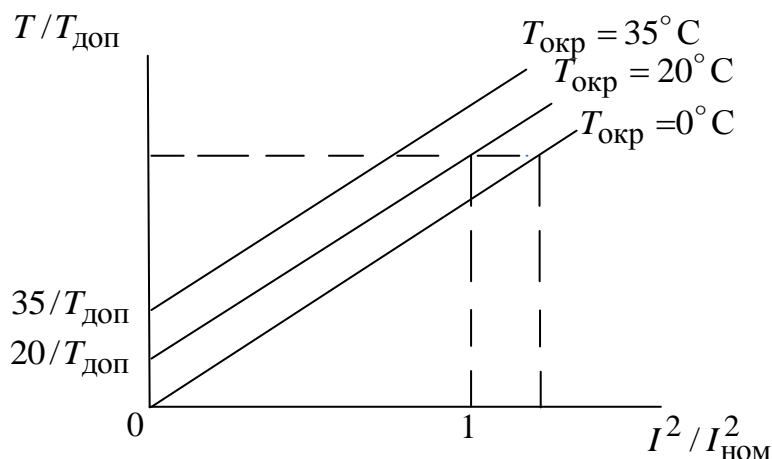


Рис. 2.8. Зависимости температуры жилы провода $T/T_{\text{доп}}$ от квадрата коэффициента загрузки $I^2 / I_{\text{НОМ}}^2$ и температуры помещений цехов $T_{\text{окр}}$

Другим важным моментом при определении сопротивления участка сети является учет влияния сопротивлений контактных соединений коммутационных аппаратов. В литературе приводятся данные о значениях этих сопротивлений, но весьма приблизительные [205].

Для экспериментального измерения сопротивлений контактных соединений методом амперметра и вольтметра были использованы автоматические и пакетные выключатели различных типов, предохранители,

магнитные пускатели при протекании по ним тока $0,5I_{\text{НОМ}}$, $I_{\text{НОМ}}$, $1,3I_{\text{НОМ}}$ ($I_{\text{НОМ}}$ – номинальный ток аппарата). Замер сопротивлений проводился через 10 мин протекания тока каждого значения. Одновременно выполнялись измерения на постоянном токе. Результаты экспериментов показали, что сопротивления контактных соединений оказались примерно равными при протекании переменного и постоянного токов и практически не зависимыми от их значения, что показано в наших опытах [244; 247].

Для исследований были использованы различные типы коммутационных аппаратов. Измеренные значения сопротивления контактных соединений автоматических выключателей типа АЕ2056 с номинальным током 15 А составили $24 \cdot 10^{-3}$ Ом, магнитных пускателей типа ПМЕ-211 с номинальным током 25 А – $33 \cdot 10^{-3}$ Ом. Расчеты, проведенные по результатам измерений, показали, что составляющая сопротивления контактных соединений автоматического выключателя АЕ2056 в общем сопротивлении участка цеховой сети оказалась равной примерно 31 % при длине линии 5 м, 26 % – при длине 10 м и т. д. Доля сопротивления контактов магнитного пускателя ПМЕ-211 в общем сопротивлении участка сети составила примерно 40 % при длине линии 5 м, 30 % – при длине 10 м и т. д.

Рассмотрим участок цеховой сети от трансформаторной подстанции ТП до потребителей ЭЭ Н (рис. 2.9) с коммутационными аппаратами низкого напряжения: автоматическими выключателями АВ1–АВ3, предохранителями ПР1, ПР2, контактными разъединителями КР1, КР2. Для данной схемы цеховой сети были определены потери ЭЭ по выражениям (2.2), (2.13) без учета и с учетом сопротивлений контактных соединений коммутационных аппаратов и нагрева проводов. Результаты расчетов показали, что при учете нагрева проводов и сопротивлений контактных соединений потери ЭЭ оказались на 30 % больше, чем без их учета [224; 229; 231; 247].

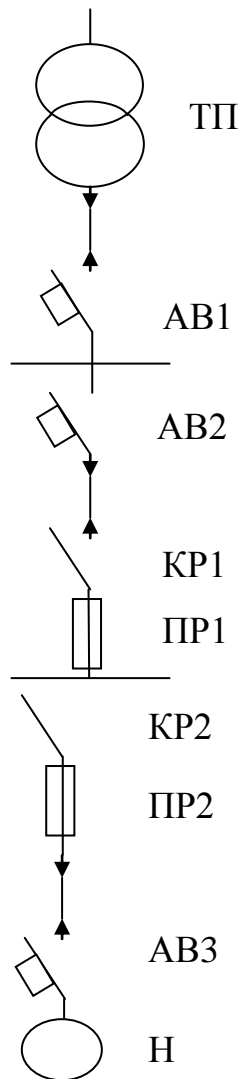


Рис. 2.9. Схема низковольтной сети от трансформаторной подстанции до потребителя

Для вычисления потерь ЭЭ цеховой сети предлагается следующий алгоритм расчета, впервые изложенный в нашей работе [244]:

1) вычислить дополнительный нагрев проводов линии по зависимости $T/T_{\text{доп}} = f(I^2/I_{\text{ном}}^2)$ на рис. 2.8, где $T_{\text{доп}}$ – допустимая температура жилы провода или кабеля;

2) определить дополнительную длину линии Δl , зависящую от квадрата коэффициента загрузки длины линии L и количества низковольтных аппаратов N на линии, для данной допустимой температуры нагрева проводов, используя номограмму на рис. 2.10.

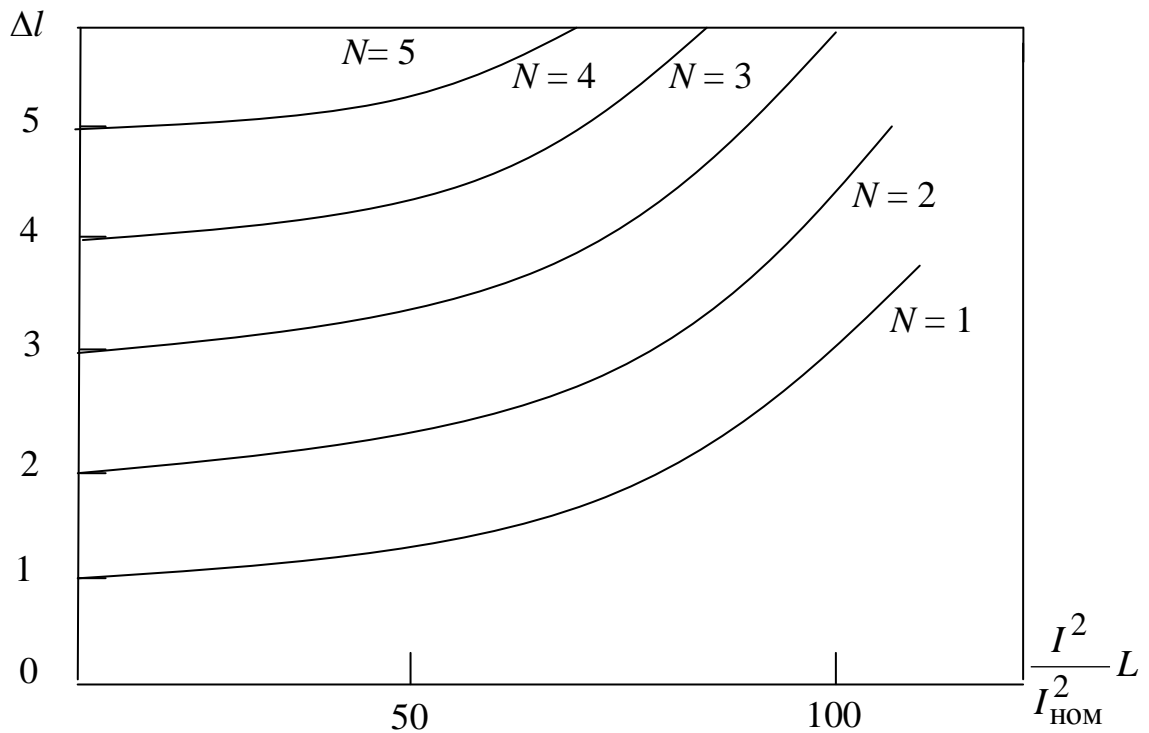


Рис. 2.10. Номограмма зависимости дополнительной длины линии Δl от квадрата коэффициента загрузки линии $I^2 / I_{НОМ}^2$, длины линии L , м, количества низковольтных аппаратов на линии для данной допустимой температуры нагрева проводов

3) рассчитать сопротивление линии R_3 с учетом дополнительной длины и нагрева проводов по формуле

$$R_3 = r_{20} [1 + \alpha(T - 20)](l + \Delta l); \quad (2.23)$$

4) определить потери ЭЭ

$$\Delta W = 3I^2 R_3 \tau. \quad (2.24)$$

По программе, соответствующей данному порядку расчета, были определены потери ЭЭ для наиболее распространенных схем электроснабжения потребителей на напряжении до 1000 В. При этом были использованы

номограммы, по которым можно определить увеличение длины линии на дополнительную длину Δl . Результаты расчета подтвердили их высокую точность.

Таким образом, при определении потерь ЭЭ в цеховых сетях до 1000 В следует учитывать добавочные потери за счет нагрева проводов и за счет сопротивлений контактных соединений коммутационных аппаратов [244].

2.5. Анализ потерь электроэнергии систем цехового электроснабжения

На величину потерь ЭЭ влияет большое число различных факторов. Снижение уровня потерь в электрических сетях промышленных предприятий – одна из наиболее важных эксплуатационных задач. Для определения содержания и порядка проведения мероприятий по снижению потерь необходимо предварительно выявить основные недостатки построения и функционирования сети.

Оценим влияние на величину потерь ЭЭ в сетях низкого напряжения таких параметров, как нагрев проводов и кабельных линий, сопротивления контактных соединений коммутационных аппаратов, температуры окружающей среды на основе исследованных схем промышленных предприятий. В качестве примера рассмотрим участок механического цеха.

Система цехового электроснабжения участка механического цеха представляет собой смешанную схему, состоящую из радиальных и магистральных линий (из 4 распределительных шинопроводов). В табл. 2.4 показаны основные схемные и режимные характеристики оборудования участка механического цеха с учетом числа коммутационных аппаратов, установленных на линиях.

Схемные и режимные характеристики оборудования механического цеха

Фирма-производитель оборудования	Количество коммутационных аппаратов на одной линии	Количество линий сети	Пределы изменения длины линии, м	Пределы изменения сечения линии, мм ²	Пределы изменения мощности приемника ЭЭ, питающегося от линии, кВт	Пределы коэффициента загрузки линии сети
Отечественный производитель	1	48	3 ÷ 10	10 ÷ 185	17 ÷ 150	0,66 ÷ 0,82
	2	4	8 ÷ 10	185 ÷ 240	202 ÷ 680	0,78 ÷ 1
	3	1	10	35	40	0,72

Как известно, нагрузочные потери $\Delta W_{\text{н}}$ ЭЭ в элементе трехфазной сети сопротивлением R находят по известному выражению (2.1).

Точное определение потерь ЭЭ за интервал времени T возможно при известных значениях параметра R и функции тока от времени $I(t)$ на всем интервале.

Примечательно, что сопротивление проводов ответвлений от шинопроводов вычисляется как сопротивление радиальных сетей и затем учитывается в выражении для эквивалентного сопротивления шинопровода [216; 58]:

$$R_{\text{эш}} = \left[r_{20} \cdot l \cdot \frac{1}{6} \left(1 + \frac{1}{n} \right) \left(2 + \frac{1}{n} \right) + \frac{r_{\text{п}}}{n} \right] \cdot [1 + \alpha(\theta - \theta_0)] + \frac{r_{\text{к}}}{n}, \quad (2.25)$$

где r_{20} – сопротивление 1 м шинопровода при 20 °С, мОм; l – длина шинопровода, м; n – количество приемников, присоединенных к шинопроводу; $r_{\text{п}}$ – сопротивление провода ответвления от шинопровода, мОм; $r_{\text{к}}$ – сопротивление коммутационного аппарата ответвления, мОм;

α – температурный коэффициент увеличения сопротивления, $1/^\circ\text{C}$;
 θ – температура шинпровода, $^\circ\text{C}$; θ_0 – температура окружающей среды, $^\circ\text{C}$.

Известно, что сопротивление радиальных сетей, в том числе и ответвлений от шинпровода, зависит от его температуры [244]:

$$R = \frac{\rho}{s} \cdot l [1 + 0,004(\theta - 20)] + \sum r_k, \quad (2.26)$$

где ρ – удельное электрическое сопротивление проводника $\text{мОм} \cdot \text{м}$; l – длина проводника, м ; s – поперечное сечение проводника, мм^2 ; θ – температура нагрева проводника, $^\circ\text{C}$; $\sum r_k$ – сумма сопротивлений контактов коммутационных аппаратов, установленных на линии.

Сопротивление контактов автоматических выключателей, установленных на линии [247]:

$$\begin{aligned} r_k &= 307/I_H \text{ (для } I_H > 60 \text{ А);} \\ r_k &= 349/I_H \text{ (для } I_H < 60 \text{ А),} \end{aligned} \quad (2.27)$$

где I_H – номинальный ток выключателя.

С учетом того, что на линии к крану установлен 1 автоматический выключатель, рубильник и предохранитель, тогда [247]:

$$r_k = 125/I_H \text{ (для рубильников);}$$

$$r_k = 68/I_H \text{ (для предохранителей).}$$

Кроме того, на линиях к токарному и фрезерному станкам установлены магнитные пускатели, для которых сопротивление контактов определяются по выражениям [247]:

$$R = 825/I_H \text{ для токарных станков (} I_H < 70 \text{ А);}$$

$$R = 760/I_H \text{ для фрезерных станков (} I_H \geq 70 \text{ А).}$$

Средняя длина линии:

$$l_{\text{cp}} = \frac{\sum_{i=1}^n l_i}{n}. \quad (2.28)$$

Величина, равная эквивалентному удельному сопротивлению линий сети $r_{\text{э}20}$ при 20 °С:

$$r_{\text{э}20} = 31,3 \frac{\sum_{i=1}^n l_i}{\sum_{i=1}^n S_i l_i}, \quad (2.29)$$

где S_i – сечение i -й линии, мм²; $31,3/S_i$ – сопротивление 1 м алюминиевой линии сечением S_i при 20 °С, Ом/м.

Квадрат среднеквадратичного коэффициента загрузки линий сети

$$k_3^2 = \frac{\sum_{i=1}^n k_{3i}^2}{n}, \quad (2.30)$$

где $k_{3i} = I_i/I_{\text{ном}i}$ – коэффициент загрузки i -й линии; I_i – ток в i -й линии, А; $I_{\text{ном}i}$ – номинальный ток в линии S_i -го сечения, А.

Таким образом, эквивалентное сопротивление радиальных сетей, в том числе и ответвлений от шинпровода, вычисляем по выражению

$$R = \{r_{\text{э}20} \cdot l [1 + 0,004(\theta_{\text{ж}} - 20)] + \sum r_{\text{к}}\} \cdot 1/n; \quad (2.31)$$

$$\theta_{\text{ж}} = k_3^2 (80 - \theta_0) + \theta_0, \quad (2.32)$$

где $\theta_{\text{ж}}$ – температура жилы кабеля; 80 – допустимая температура нагрева жилы кабеля.

Затем находим общее сопротивление разветвленной сети с учетом числа шинпроводов:

$$R_{об} = \frac{R_{э} \cdot 1/m \cdot R_{эш}}{R_{э} + 1/m \cdot R_{эш}}, \quad (2.33)$$

где m – число магистральных линий.

Электрическая нагрузка участка механического цеха имеет переменный характер, поэтому потери мощности и ЭЭ в линиях зависят от изменения нагрузки [24; 75]. Суточный график электрических нагрузок участка механического цеха представлен на рис. 2.11 и 2.12. Потери ЭЭ определяются по величине среднеквадратичного тока $I_{ск}$, который представляет собой эквивалентный ток, проходящий по линии за интервал времени T , и вызывает те же потери мощности и ЭЭ, что и фактически изменяющийся за тот же интервал времени ток.

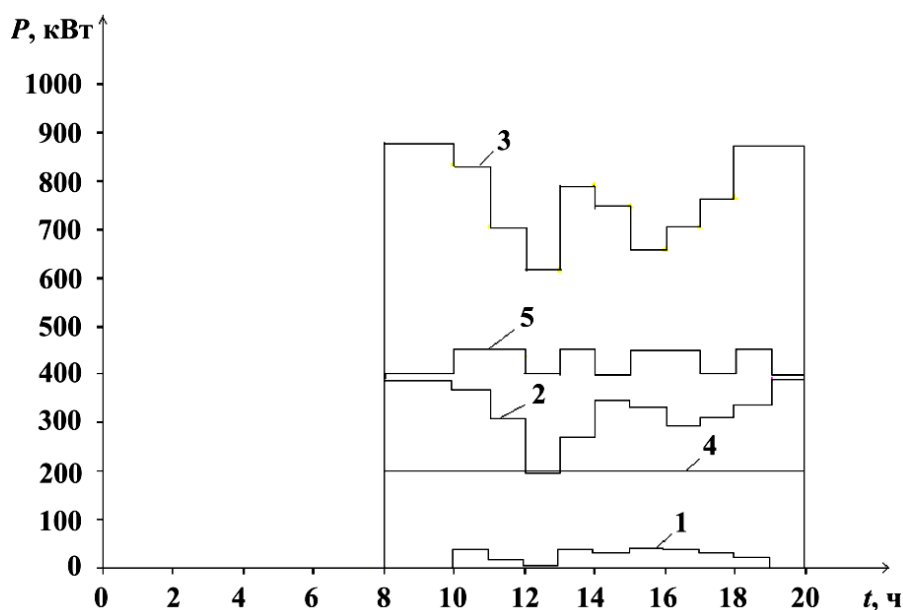


Рис. 2.11. Суточный график нагрузок электроприемников механического цеха:

- 1 – кран; 2 – токарные станки; 3 – фрезерные станки; 4 – вентиляторы;
5 – компрессоры

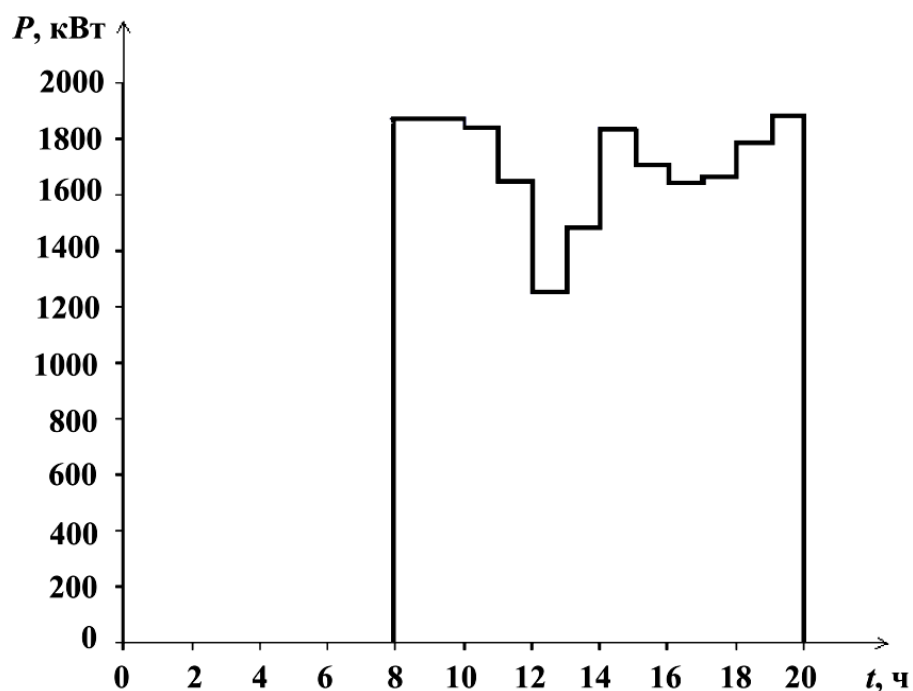


Рис. 2.12. Суммарный суточный график электрических нагрузок механического цеха

Результаты расчетов представим в табл. 2.5, где также указана погрешность определения потерь ЭЭ без учета таких параметров, как нагрев проводов и кабельных линий, сопротивления контактных соединений коммутационных аппаратов, температура окружающей среды.

1. Таким образом, при анализе систем цехового электроснабжения выявлено, что необходим учет следующих конструктивных и эксплуатационных характеристик: количество коммутационных аппаратов, установленных на линии, длина, сечение, нагрузка и коэффициент загрузки линии.

2. Как показали исследования, для повышения точности вычислений и снижения погрешности, потери ЭЭ необходимо определять с учетом таких параметров, как нагрев проводов и кабельных линий, сопротивления контактных соединений коммутационных аппаратов, температура окружающей среды.

Возможные погрешности определения потерь ЭЭ механического цеха

Режим определения потерь ЭЭ в сетях низкого напряжения механического цеха	$R_{\text{э}}$, мОм	$R_{\text{эш}}$, мОм	$R_{\text{об}}$, мОм	ΔW , кВт · ч	$\delta_{\Delta P}$, %
1. С учетом всех параметров сети	2,8	21,1	2,49	441,7	
2. Без учета сопротивления контактных соединений	1,5	12,2	1,61	285,6	65,3
3. Без учета нагрева шинпроводов и кабельных линий	2,65	18,22	2,11	381	14
4. Без учета температуры окружающей среды	2,76	19,46	2,25	398	10

2.6. Влияние погрешностей детерминированных и вероятностно-статистических методов на величину потерь электроэнергии

Известно, что интегральный учет потерь измерительными приборами приводит к значительным ошибкам [120].

Потери ЭЭ являются одним из важных показателей, характеризующих экономичность работы цеховых сетей. Определение величины потерь с минимальной погрешностью расчетов необходимо для решения многих задач, возникающих при проектировании и эксплуатации сетей.

В табл. 2.6 приведены данные о доле потерь ЭЭ в различных частях системы электроснабжения.

Таблица 2.6

Потери ЭЭ по отношению к полной ее выработке

Объект	Потери, %
1	2
Электрические станции	до 5

1	2
Высоковольтные сети	до 5
Сети 6–10 кВ	до 3
Цеховые сети	до 12
Прочие потери, включая коммерческие	до 25

Таким образом, более одной трети выработанной ЭЭ тратится на потери.

В табл. 2.7 приведены данные о потерях в отдельных потребителях по отношению к общему электропотреблению цеха.

Таблица 2.7

Потери в отдельных электропотребителях в процентах
по отношению к общему электропотреблению цеха

Объект	Потери, %
Внутрицеховые сети	до 5
Цеховые трансформаторы	до 3
Асинхронные двигатели	до 10
Выпрямители	до 4
Электротермические установки	до 1
Конденсаторные установки	до 0,1

При проектировании сетей наиболее экономичные решения выбираются путем комплексного анализа большого количества факторов, среди которых фактор учета потерь ЭЭ не является доминирующим. Одним из факторов при этом является точный учет величины потерь ЭЭ, величина которых определяется, как правило, с помощью эквивалентной величины – числа часов наибольших потерь τ [218].

В условиях эксплуатации, при отсутствии полной исходной информации об оборудовании возникает необходимость в применении эквивалентных величин, позволяющих определять потери ЭЭ. Определение потерь возможно только с помощью соответствующих расчетов, которые должны выполняться с достаточно высокой точностью.

2.6.1. Влияние погрешностей детерминированных методов на величину потерь электроэнергии

Проведем сравнительный анализ некоторых наиболее часто применяемых детерминированных методов расчета потерь ЭЭ с определением погрешности методов для внутриводской распределительной сети низкого напряжения (см. рис. 2.13).

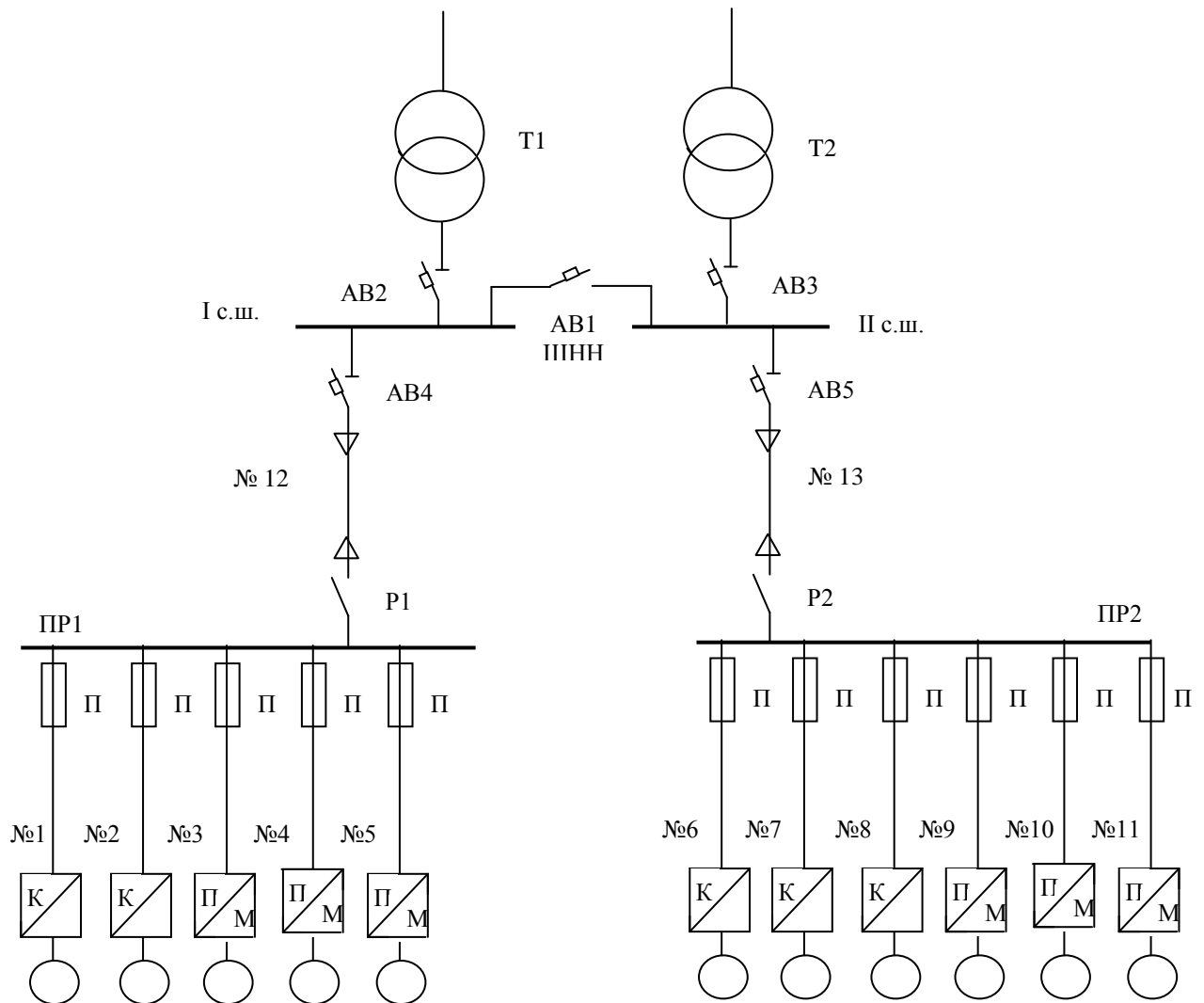


Рис. 2.13. Распределительная сеть низкого напряжения:

T1, T2 – трансформаторы цеховой подстанции; АВ1 – межсекционный автомат;

АВ2–АВ5 – автоматические выключатели; P1, P2 – разъединители;

П – предохранители; ПР1, ПР2 – распределительные пункты;

К – контактор; ПМ – пускатель магнитный

Графики нагрузок потребителей показаны на рис. 2.14–2.18, параметры линий в табл. 2.8.

Таблица 2.8

Параметры линий распределительной сети

№ п/п	Протяженность линии, м	Сопротивление линии, Ом	Марка кабеля
1	16	0,05	АВВГ 3х10+1х6
2	19	0,04	АВВГ 3х16+1х10
3	16	0,05	АВВГ 3х10+1х6
4	19	0,06	АВВГ 3х10+1х6
5	11	0,03	АВВГ 3х10+1х6
6	9	0,02	АВВГ 3х16+1х10
7	9	0,08	АВВГ 4х4
8	16	0,05	АВВГ 3х10+1х6
9	19	0,06	АВВГ 3х10+1х6
10	9	0,01	АВВГ 3х25+1х16
11	14	0,02	АВВГ 3х25+1х16
12	61	0,04	АВВГ 3х50+1х35
13	52	0,03	АВВГ 3х50+1х35

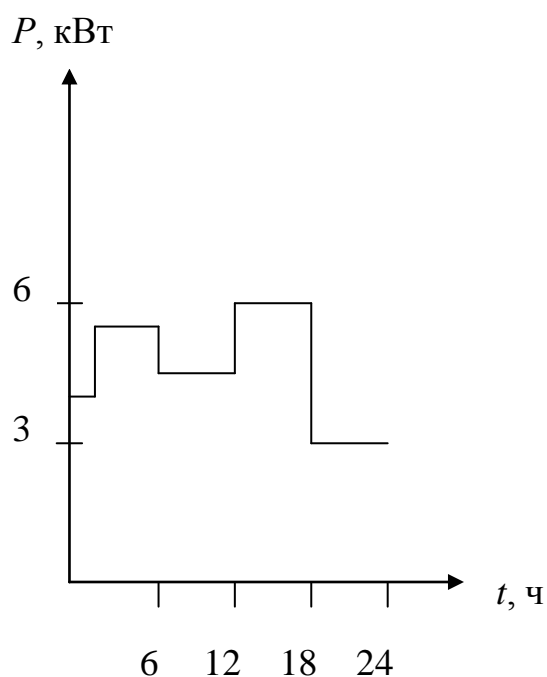


Рис. 2.14. График нагрузки линий 1 и 4 при $k_{зг} = 0,62$

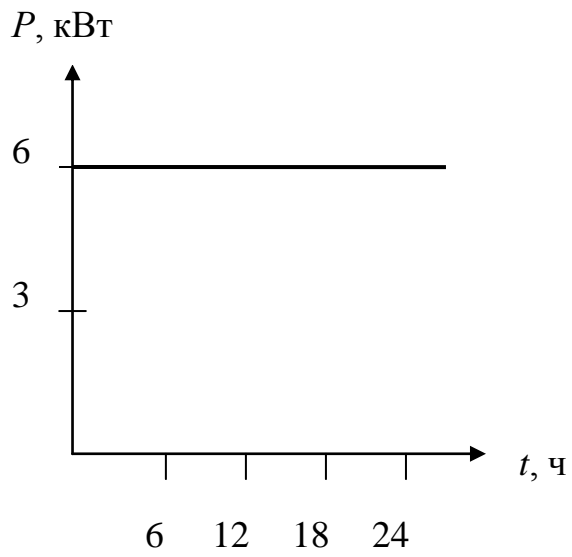


Рис. 2.15. График нагрузки линий 2, 3 и 5 при $k_{зг} = 1,0$

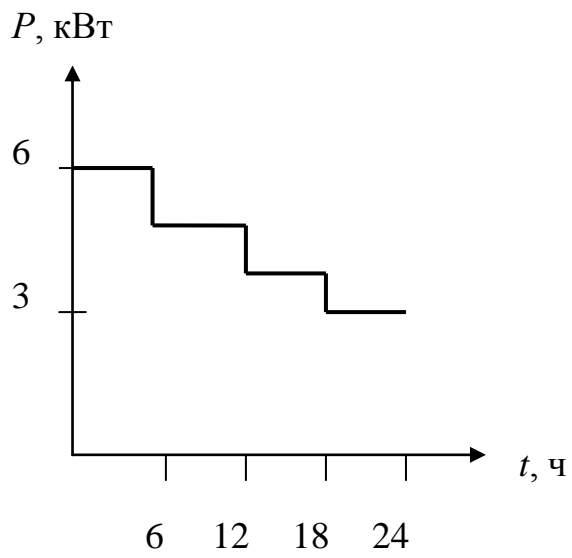


Рис. 2.16. График нагрузки линий 6, 7 и 9 при $k_{зг} = 0,58$

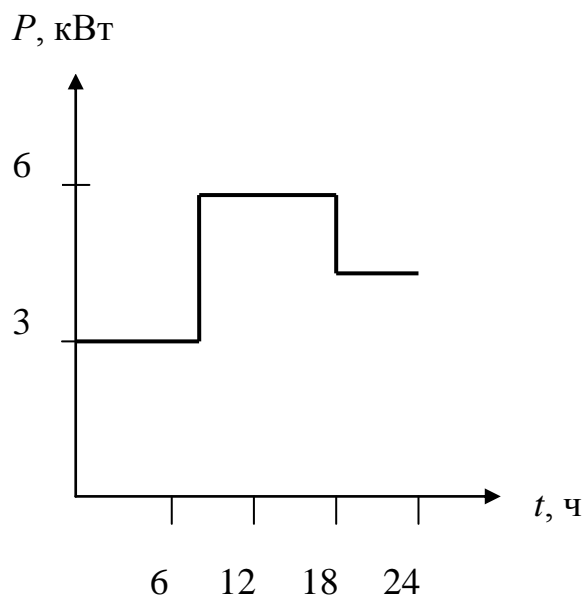


Рис. 2.17. График нагрузки линий 8, 10 и 11 при $k_{зг} = 0,53$

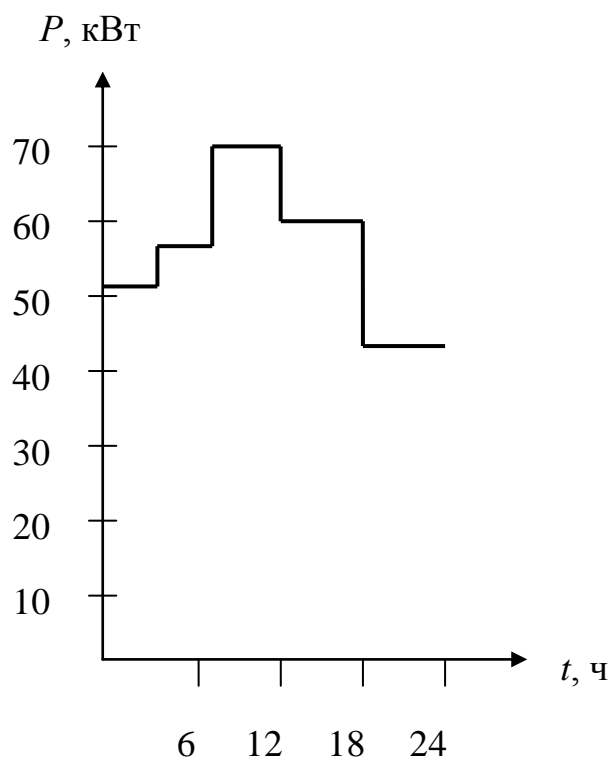


Рис. 2.18. Суммарный график нагрузки потребителей (рис. 2.13) при $k_{зг} = 0,72$

Определим коэффициент заполнения графика, т. е. отношение средней мощности за рассматриваемый интервал времени к наибольшей мощности:

$$K_{\text{зап.гр}} = \frac{\bar{P}_c}{P_{\text{нб}}} = \frac{1}{1 + 2,5\gamma_p}, \quad (2.34)$$

где γ_p – коэффициент вариации нагрузок, $\gamma_p = \frac{\sigma_p}{m_p}$; σ_p – среднее квадратическое

отклонение величины активной мощности, $\sigma_p = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - m_p)^2}$;

m_p – математическое ожидание величины активной мощности.

Расчет потерь ЭЭ по методу графического интегрирования

Как известно, потери мощности вычисляются по формуле [181]

$$\Delta P = 3I^2 \cdot R, \quad (2.35)$$

где R и I – активное сопротивление и ток рассматриваемого элемента.

Активное сопротивление проводников определяется

$$R = R_0 \cdot [1 + \alpha(\theta_{\text{окр}} + \theta_{\text{п}})], \quad (2.36)$$

где R_0 – сопротивление проводника при 0°C ; α – температурный коэффициент сопротивления проводникового материала; $\theta_{\text{окр}}$ – температура помещения цехов; $\theta_{\text{п}}$ – превышение температуры проводника над температурой помещения цеха.

Обозначим

$$w = \alpha R_0 / U^2; \quad (2.37)$$

$$b = 1 / \alpha + \theta_{\text{окр}}, \quad (2.38)$$

где U – напряжение.

Тогда усредненные потери мощности можно определить по выражению

$$\Delta W = S^2 w(b + \theta_{\text{cp}}). \quad (2.39)$$

θ_{cp} – усредненная температура нагрева проводника.

Определим потери для первой ступени графика нагрузок:

$$\Delta P_1 = S^2 w(b + \theta_{\text{cp}}) = S^2 \frac{\alpha R_0}{U^2} \left(\frac{1}{\alpha} + \theta_{\text{cp}} \right),$$

U – напряжение сети;

$$\Delta W_1 = \Delta P_1 \cdot \Delta t_1.$$

Результаты расчета потерь ЭЭ представлены в табл. П.А.

Определение потерь электроэнергии по потерям напряжения

Метод использует взаимосвязь между относительными значениями потерь напряжения и потерь мощности в элементах сети.

Для линий с сосредоточенной в конце нагрузкой отношение относительных потерь мощности к относительным потерям напряжения имеет вид [94]

$$k_{\text{М/Н}} = \frac{\Delta P_{\%}}{\Delta U_{\%}} = \frac{1 + \text{tg}^2 \varphi}{1 + \xi \text{tg} \varphi}, \quad (2.40)$$

где $\xi = \frac{x_0}{r_0}$, $\text{tg} \varphi$ – коэффициент реактивной мощности.

Наибольшая мощность линии при отпущенной ЭЭ W за 24Д часов определяется по выражению

$$P_{\text{max}} = \frac{W}{24Дk_3}; \quad Q_{\text{max}} = \text{tg} \varphi \cdot P_{\text{max}}. \quad (2.41)$$

Потери напряжения в максимум нагрузки составят, %,

$$\Delta U_{\%} = \frac{P_{\max} \cdot r_L + Q_{\max} \cdot x_L}{U^2}. \quad (2.42)$$

Потери ЭЭ методом расчета по потерям напряжения составят, кВт · ч,

$$\Delta W = \frac{\Delta U_{\%}}{100} W \cdot \frac{1 + 2k_3}{3} \cdot \frac{k_{M/H} k_{\text{нес}}}{k_{\text{отв}}}. \quad (2.43)$$

где $k_{\text{отв}} = 1 - 0,75k_{\text{разв}}$ – коэффициент ответвлений, учитывающий наличие или отсутствие ответвлений на линии; $k_{\text{нес}}$ – коэффициент несимметрии;

$k_3 = \frac{1}{3k_{\phi}^2 - 2}$ – коэффициент заполнения графика нагрузки; $k_{\text{разв}} = \frac{L_0}{L_{\Sigma}}$ –

коэффициент разветвленности, для неразветвленной линии $k_{\text{разв}} = 0$; $k_{\phi} = \frac{P_{\phi}}{P_c}$

– коэффициент формы графика нагрузки, отношение среднеквадратичной нагрузки P_{ϕ} к средней P_c .

Данные вычислений потерь ЭЭ приведены в табл. 2.9.

Таблица 2.9

Данные вычислений потерь ЭЭ в линиях 12 и 13

№ п/п	Параметры линий	Линия 12	Линия 13
1	2	3	4
1	S , кВ · А	648	720
2	W_F , кВт	518	576
3	$\cos\phi / \text{tg}\phi$	0,8/0,75	0,8/0,75
4	F , мм ²	50	50
5	r_0 , Ом	0,62	0,62
6	x_0 , Ом	0,06	0,06
7	Д, дней (час)	1 день	1 день
8	L_F , км	0,05	0,60

1	2	3	4
9	k_{Φ}^2	1,26	1,11
10	$k_{\text{Нес}}$	1,05	1,05
11	$k_{\text{Отв}}$	1,0	0,48
12	$k_{\text{М/Н}}$	1,6	1,0
13	k_3	0,6	0,8
14	P_{max}	30,0	33,0
15	Q_{max}	22,5	25,0
16	$\Delta U_{\%}$	0,7	0,9
17	$\Delta W, \text{ кВт} \cdot \text{ч}$	4,2	10,0

Потери ЭЭ методом расчета по потерям напряжения для линии 12 составят

$$\begin{aligned} \Delta W_{12} &= \frac{\Delta U_{\%}}{100} W \cdot \frac{1+2k_3}{3} \cdot \frac{k_{\text{М/Н}} k_{\text{Нес}}}{k_{\text{Отв}}} = \\ &= \frac{0,693}{100} 518 \cdot \frac{1+2 \cdot 0,6}{3} \cdot \frac{1,6}{1,0} = 4,2 \text{ кВт} \cdot \text{ч}. \end{aligned}$$

Потери ЭЭ методом расчета по потерям напряжения для линии 13 составят

$$\begin{aligned} \Delta W_{13} &= \frac{\Delta U_{\%}}{100} W \cdot \frac{1+2k_3}{3} \cdot \frac{k_{\text{М/Н}} k_{\text{Нес}}}{k_{\text{Отв}}} = \\ &= \frac{0,9}{100} 576 \cdot \frac{1+2 \cdot 0,8}{3} \cdot \frac{1,05}{0,5} = 10 \text{ кВт} \cdot \text{ч}. \end{aligned}$$

Суммарные потери ЭЭ по всей схеме в целом

$$\Delta W = W_{12} + W_{13} = 14,2 \text{ кВт} \cdot \text{ч}.$$

Оценим интервалы неопределенности расчетных потерь ЭЭ.

На рис. 2.19 показаны графические зависимости методической погрешности метода расчета потерь ЭЭ по потерям напряжения от количества линий при различных коэффициентах формы графиков нагрузки.

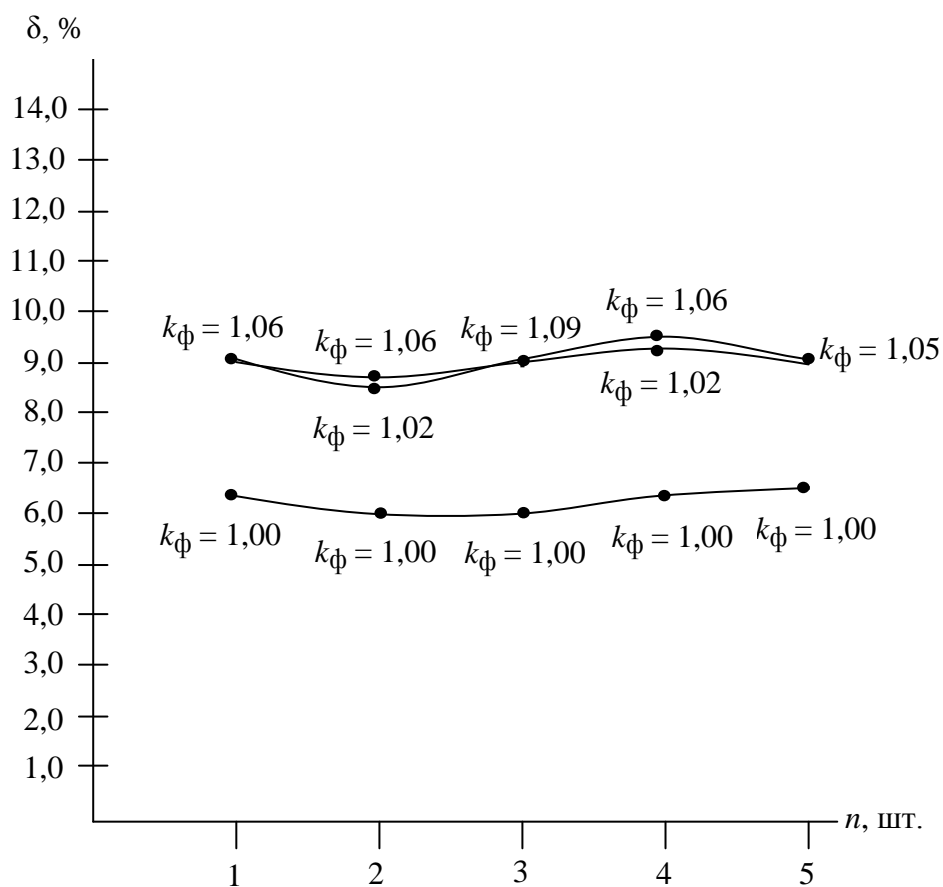


Рис. 2.19. Зависимость методической погрешности метода расчета потерь ЭЭ по потерям напряжения от количества линий при различных коэффициентах формы графиков нагрузки

Определение потерь электроэнергии по методу суммарной длины линий

Данные о суммарной длине и количестве линий 0,4 кВ могут быть получены сравнительно легко, так как они отражаются в материальном балансе предприятия. Данные об отпуске ЭЭ в линии 0,4 кВ получают расчетным путем, вычитая из величины ЭЭ, отпускаемой в фидеры 6–20 кВ, потери в фидерах [94].

Нагрузочные потери ЭЭ в линии определяют по выражению

$$\Delta W_F = 9,3 \frac{W_F^2 (1 + \operatorname{tg}^2 \varphi) k_\phi^2 L_F}{N_F^2 D F} \cdot k_{\text{нес}} k_{\text{отв}} k_L k_N,$$

где N_F – количество линий с сечением головных участков F и суммарной длиной L_F ; W_F – суммарная энергия, отпускаемая в линии данного сечения за D дней; k_L – коэффициент, учитывающий влияние на потери распределенности нагрузок вдоль линии, $k_L = 1,0$ для линий с сосредоточенной нагрузкой и $0,37$ для линий с распределенной нагрузкой; k_N – коэффициент, учитывающий неодинаковость плотностей тока на головных участках разных линий, $k_N = 1,1$. Расчет ведем по двум питающим линиям (линии 12 и 13).

Результаты определения потерь ЭЭ по методу суммарной длины линий представлены в табл. 2.10.

Таблица 2.10

Результаты определения потерь ЭЭ по методу суммарной длины линий

№ п/п	Наименование параметров	Линия 12	Линия 13
1	2	3	4
1	S , кВ·А	648	720
2	W_F , кВт	518	576
3	$\cos \varphi / \operatorname{tg} \varphi$	0,8/0,75	0,8/0,75
4	F , мм ²	50	50
5	N_F , шт	6	7
6	D , дней (час)	24 часа	24 часа
7	L_F , км	0,05	0,6
8	k_ϕ^2	1,26	1,11
9	$k_{\text{нес}}$	1,05	1,05
10	$k_{\text{отв}}$	1,0	0,48

1	2	3	4
11	k_L	1,0	0,37
12	k_N	1,1	1,16
13	ΔW , кВт · ч	6	2

Потери ЭЭ по методу суммарной длины линий для линии 12 составят

$$\begin{aligned} \Delta W_{12} &= 9,3 \frac{W_F^2 (1 + \operatorname{tg}^2 \varphi) k_\Phi^2 L_F}{N_F^2 D F} k_{\text{нес}} k_{\text{отв}} k_L k_N = \\ &= 9,3 \frac{518^2 (1 + 0,75^2) 1,26 \cdot 0,05}{6^2 \cdot 24 \cdot 50} \cdot 1,05 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot 1,1 = 6,6 \text{ кВт} \cdot \text{ч}. \end{aligned}$$

Потери ЭЭ по методу суммарной длины линий для линии 13 составят

$$\begin{aligned} \Delta W_{13} &= 9,3 \frac{W_F^2 (1 + \operatorname{tg}^2 \varphi) k_\Phi^2 L_F}{N_F^2 D F} k_{\text{нес}} k_{\text{отв}} k_L k_N = \\ &= 9,3 \frac{576^2 (1 + 0,75^2) 1,11 \cdot 0,06}{7^2 \cdot 24 \cdot 50} \cdot 1,05 \cdot 0,48 \cdot 0,37 \cdot 1,16 = 2,6 \text{ кВт} \cdot \text{ч}. \end{aligned}$$

Суммарные потери ЭЭ по всей схеме в целом составят

$$\Delta W = W_{12} + W_{13} = 9,2 \text{ кВт} \cdot \text{ч}.$$

Оценим интервалы неопределенности расчетных потерь ЭЭ. Погрешность расчета потерь ЭЭ по выражению (2.12) определяется погрешностями величин k_Φ^2 , $\operatorname{tg} \varphi$, $k_{\text{разв}}$, k_L , k_N и d_p . Погрешности расчета потерь, обусловленные неточностью значения k_Φ^2 , зависят от значения k_3 и его погрешности. Если принять для нагрузок сетей 380/220 В $k_3 \approx 0,3$ и возможную погрешность в этом значении $\pm 10\%$, то в соответствии с [87] погрешность

в потерях составит $\delta_{\Sigma_{к.ф}} = \pm 20,3\%$ (все погрешности здесь даны для уровня вероятности 0,95).

Погрешность в $\text{tg}\varphi$ примем равной $\pm 20\%$, при этом в значении $1 + \text{tg}^2\varphi$ она составит $\delta_{\varphi} = 8\%$.

Учитывая, что коэффициент разветвленности характеризует отношение суммарной длины ветвей дерева схемы к длине магистрали, представляется, что на основе проектных и фактических данных о характерных схемах линий экспертная оценка этого коэффициента может быть сделана достаточно объективно. Для иллюстрации метода оценки интервала неопределенности потерь примем, что погрешность в значении $k_{\text{разв}}$ составляет $\pm 20\%$. Тогда погрешность в значении $k_{\text{отв}}$ при подстановке $k_{\text{разв}} = 0,3$ составит $\delta_{\text{отв}} = \pm 8\%$. Примем также, что погрешность в значении доли нагрузки коммунально-бытового характера d_p в суммарном потреблении энергии отсутствует, так как указанная доля определяется по данным оплаты за электроэнергию. В этом случае погрешность в коэффициенте k_L определится по выражению

$$\delta_{k_L} = [1 - 0,63d_p - 1 + 0,63(1 + 0,04/0,37)d_p] \cdot 100 / (1 - 0,63d_p) = 6,8d_p / (1 - 0,63d_p).$$

Погрешность в коэффициенте $k_{\text{нес}}$ определится по выражению, %,

$$\delta_{\text{нес}} = [(0,2/1,35)d_p + (0,05/1,05)(1 - d_p)] \cdot 100 = 14,8d_p + 4,8(1 - d_p).$$

При $d_p = 0,5$ значение $\delta_{k_L} = 5,0\%$, а $\delta_{\text{нес}} = 9,8\%$.

Погрешность, вносимая использованием среднего значения k_N , составляет, %,

$$\delta_N = (0,06/1,1) \cdot 100 = 5,5.$$

Суммарная погрешность вычисления по выражению (2.12) потерь ЭЭ в N линиях одного сечения составит, %,

$$\delta_{\Sigma 1} = \sqrt{20,3^2 + 8^2 + 8^2 + 5,0^2 + 9,8^2 + 5,5^2} = 26,3.$$

Для определения суммарной погрешности в значении величины потерь в линиях n сечений (при F , равном 35; 50; 70; 95 мм², $n = 4$) погрешность $\delta_{\Sigma 1}$

необходимо умножить на $\sqrt{\sum_{i=1}^n d_i^2}$, где d_i – доля энергии, отпускаемой в линии

i -го сечения.

На рис. 2.20 показаны графические зависимости методической погрешности рассматриваемого метода от количества линий при различных коэффициентах формы графиков нагрузки.

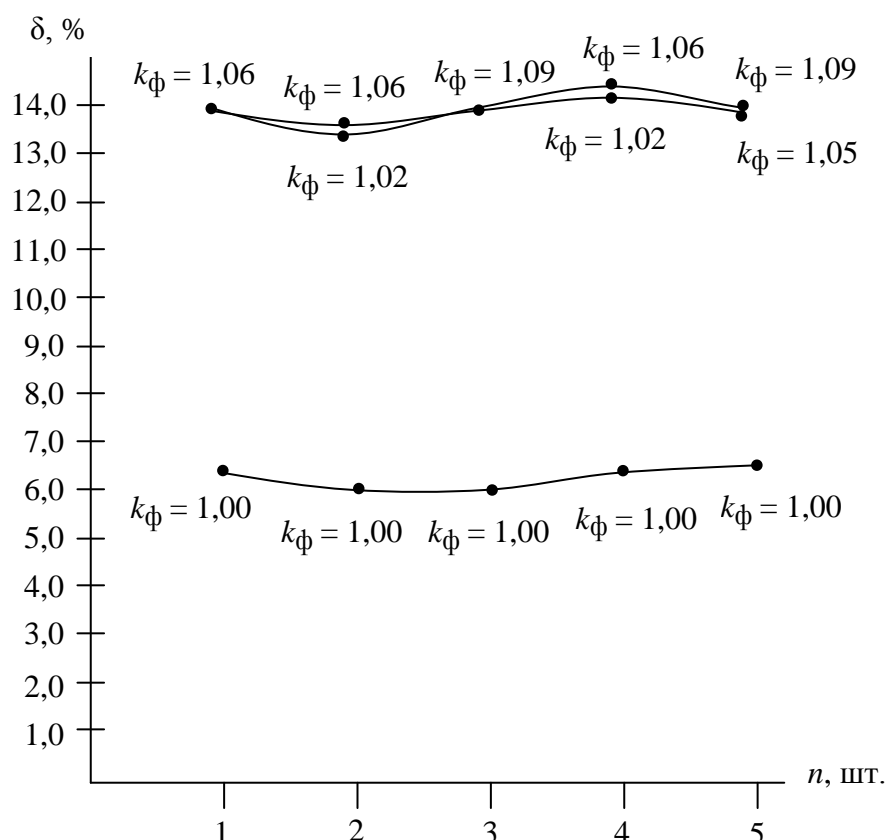


Рис. 2.20. Зависимость методической погрешности метода расчета потерь ЭЭ по суммарной длине линий от количества линий при различных коэффициентах формы графиков нагрузки

Определение потерь электроэнергии по методу эквивалентных преобразований

Метод основывается на последовательном преобразовании параллельных ветвей сети к эквивалентному сопротивлению схемы [107]:

$$\Delta P = 3 \frac{S_c^2}{U^2} R_{\text{ЭКВ}}; \quad (2.44)$$

$$\Delta W = \Delta P \cdot T, \quad (2.45)$$

где ΔP – потери мощности на участке цеховой сети, кВт; S_c – мощность выдаваемая в сеть, кВ·А; $R_{\text{ЭКВ}}$ – эквивалентное сопротивление участка цеховой сети, Ом; T – длительность рассматриваемого периода времени, ч.

$$S_{\text{ЭКВ}} = \sqrt{\frac{1}{4} (53^2 + 55^2 + 69^2 + 60^2 + 45^2)} = 64 \text{ кВ} \cdot \text{А};$$

$$\Delta P = 3 \cdot \sqrt{\left(\frac{64}{\sqrt{3} \cdot 0,4}\right)^2} \cdot 0,007 = 0,2 \text{ кВт};$$

$$\Delta W = 0,2 \cdot 24 = 4,8 \text{ кВт} \cdot \text{ч}.$$

Суммарные потери ЭЭ по всей схеме в целом составят $\Delta W = 4,8 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$.

2.6.2. Влияние погрешностей вероятностно-статистических методов на величину потерь электроэнергии

Определение потерь электроэнергии по методу математического ожидания нагрузки

Для определения потерь по этому методу воспользуемся выражением [17]

$$\Delta W = \Delta \bar{W} + \beta \sigma(\Delta W), \quad (2.46)$$

где \overline{W} – математическое ожидание потерь ЭЭ, потребляемой электроприемниками, величина β по существу представляет собой коэффициент надежности расчета и определяет вероятность, с которой случайные значения потерь ЭЭ останутся меньшими принятого расчетного значения. При нормальном законе распределения нагрузки коэффициенту $\beta = 3$ соответствует вероятность не превышения расчетной нагрузки 99,87 %, а коэффициенту $\beta = 2$ – 99,7 % [13].

Для простоты расчета будем использовать суточные графики нагрузок.

Математическое ожидание потерь ЭЭ определяем исходя из математического ожидания нагрузки, кВт · ч,

$$\Delta \overline{W} = \Delta \overline{P} \cdot T,$$

где $\Delta \overline{P} = \left(\frac{\overline{P}^2}{U^2} \right) \cdot r, \overline{P} = \frac{\sum_{i=1}^n P_i}{T}.$

Значение среднеквадратического отклонения можно рассматривать, как оценку отклонения случайной величины от ее математического ожидания:

$$\sigma(\Delta W) = T \cdot \sigma(\Delta P) = T \sqrt{\frac{\sum (\Delta P_i - \Delta \overline{P})^2}{n-1}}. \quad (2.47)$$

Результаты определения потерь ЭЭ по методу математического ожидания нагрузки представлены в табл. 2.11.

Таблица 2.11

Результаты расчета потерь ЭЭ по методу математического ожидания нагрузки

№ п/п	Номер линии	\overline{P} , кВт	$\Delta \overline{P}$, кВт	$\Delta \overline{W}$, кВт · ч	$\sigma(\Delta W)$, кВт · ч	ΔW , кВт · ч
1	2	3	4	5	6	7
1	Л1	4,5	0,0005	0,01	0,00	0,02
2	Л2	6,0	0,001	0,03	0,00	0,03

1	2	3	4	5	6	7
3	Л3	6,0	0,001	0,03	0,00	0,03
4	Л4	4,5	0,0005	0,01	0,00	0,02
5	Л5	6,0	0,001	0,03	0,00	0,03
6	Л6	4,5	0,002	0,05	0,03	0,12
7	Л7	4,5	0,002	0,05	0,03	0,12
8	Л8	4,4	0,004	0,10	0,07	0,26
9	Л9	4,5	0,01	0,27	0,16	0,58
10	Л10	4,4	0,003	0,07	0,06	0,19
11	Л11	4,4	0,002	0,07	0,05	0,18
12	Л12	27	0,14	3,39	0,56	4,51
13	Л13	30	0,21	5,13	2,87	10,87

По суммарному графику нагрузки $\Delta W = 8,6 + 2 \cdot 2,7 = 14$ кВт · ч.

Суммарные потери ЭЭ по всей схеме в целом составят $\Delta W = 14$ кВт · ч.

Определение потерь электроэнергии по методу статистической выборки

Определяем точечные оценки математического ожидания и дисперсии мощности по имеющимся графикам нагрузки:

$$\bar{P} = \frac{\sum_{i=1}^N P_i}{N}, \quad S^2 P = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (P_i - \bar{P})^2. \quad (2.48)$$

Далее после определения точечных оценок математического ожидания и дисперсии определяют интервальные оценки [107]

$$I(MP) = \left(\bar{P} - \beta \frac{\sqrt{S^2 P}}{\sqrt{n}}; \bar{P} + \beta \frac{\sqrt{S^2 P}}{\sqrt{n}} \right); \quad (2.49)$$

$$I(S^2P) = \left(\frac{(n-1)S^2P}{9,5} < \sigma^2 \leq \frac{(n-1)S^2P}{0,7} \right), \quad (2.50)$$

где значения 9,5 и 0,7 – оценка диапазона дисперсии [107].

По $\Delta W = \bar{W} + \beta(\Delta W)$ определяется максимальное и минимальное значение потерь ЭЭ ΔW_{\max} , ΔW_{\min} .

Таким образом, получаем

$$\Delta W_{\min} < \Delta W < \Delta W_{\max}. \quad (2.51)$$

Суммарные потери ЭЭ по всей схеме в целом составят

$$\Delta W = 14,2 \text{ кВт} \cdot \text{ч}.$$

Данный метод особенно эффективен в распределительных сетях. В этой группе сетей затруднительны централизованный сбор и переработка больших объемов исходной информации о конфигурации, конструктивных и режимных параметрах из-за огромного множества схем.

Определение потерь электроэнергии по методу регрессионного анализа

Для определения эквивалентного сопротивления линий цеховых сетей воспользуемся выражением (2.17). Температура жилы кабеля (провода):

$$\theta = k_3^2 \cdot (\theta_{\text{доп}} - \theta_{\text{окр}}) + \theta_{\text{окр}}$$

где $\theta_{\text{доп}}$ – допустимая температура жилы провода, °С; k_3^2 – квадрат среднеквадратичного коэффициента загрузки линий:

$$k_3 = \sqrt{\frac{\sum_1^n \left(\frac{I_n}{I_{n\text{доп}}} \right)^2}{n}}, \quad (2.52)$$

I_n – ток кабеля или провода участка сети, А; $I_{n\text{доп}}$ – допустимый ток кабеля или провода участка сети, А; n – количество линий сети, шт.

При подстановке значений получим выражение для определения потерь ЭЭ за расчетный период 24 часа

$$\Delta W = 0,13 \cdot l_{\text{ср}} \cdot S^2 \cdot k_3^2 \cdot \left[\frac{1}{n} \cdot \left((1 + 0,00403 \cdot (70 - \theta_{\text{окр}})) \cdot k_3^2 + \theta_{\text{окр}} - 20 \right) + 0,0384 \right]. \quad (2.53)$$

Для решения задачи интерполяции, в которой функцией цели выступают потери ЭЭ в цеховой сети, в качестве факториальных признаков были выбраны следующие обобщенные параметры цеховой сети:

x_1 – суммарная потребляемая мощность цеховой сети S , кВ·А;

x_2 – отношение суммарной длины линий к их количеству, т. е. средняя длина линий;

$$l_{\text{ср}} = \sum_{i=1}^n l_i / n, \quad (2.54)$$

где $l_{\text{ср}}$ – длина i -й линии цеховой сети, м; n – количество линий;

x_3 – величина, обратная количеству линий сети ($1/n$);

x_4 – квадрат среднеквадратичного коэффициента загрузки линий сети:

$$k_3^2 = \sum_{i=1}^n k_{3i}^2 / n, \quad (2.55)$$

где $k_{3i} = I_i / I_{\text{ном}i}$ – коэффициент загрузки i -й линии; I_i – ток в i -й линии, А;

$I_{\text{ном}i}$ – номинальный ток в линии, А;

x_5 – температура окружающей среды θ_0 , °С.

Для построения регрессионной модели были выявлены диапазоны изменения факторов: суммарная потребляемая мощность цеховой сети – 45–69 кВ·А; средняя длина линий цеховой сети – 10–100 м при их количестве

2–11; коэффициент загрузки – от 0,3 до 1,0 (при полностью загруженной сети); температура окружающей среды (соответствует крайним значениям температуры помещений цехов) – от 5 до 35 °С.

Диапазоны изменения факторов для радиальных цеховых сетей представлены в табл. 2.12.

Таблица 2.12

Диапазоны изменения факторов для радиальных цеховых сетей

Фактор	$x_{i\min}$	$x_{i\text{ср}}$	$x_{i\max}$	$\Delta x_i = \frac{x_{i\max} - x_{i\min}}{2}$
$x_1 \rightarrow S, \text{кВ} \cdot \text{А}$	45	57	69	12
$x_2 \rightarrow l_{\text{ср}}, \text{м}$	10	55	100	45
$x_3 \rightarrow l/n, \text{шт}^{-1}$	0,5	0,295	0,09	0,205
$x_4 \rightarrow k_3^2$	0,09	0,55	1,00	0,455
$x_5 \rightarrow \theta_0, \text{°С}$	5	20	35	15

Для магистральных цеховых сетей, линии которых, как правило, представляют собой шинопроводы с распределенной электрической нагрузкой, в качестве факториальных признаков были выбраны следующие обобщенные параметры:

x_1 – суммарная длина шинопровода l , м;

x_2 – величина, равная сопротивлению 1 м шинопровода r_{20} при 20 °С ($r_{20} = 52/I_{\text{НОМ}}$, мОм/м);

x_3 – величина, обратная количеству присоединенных к шинопроводу приемников ($1/n$);

x_4 – квадрат коэффициента загрузки шинопровода k_3^2 ($k_3 = I/I_{\text{НОМ}}$, I и $I_{\text{НОМ}}$ – рабочий и номинальный токи шинопровода, А);

x_5 – температура окружающей среды θ_0 , °С.

Средние и граничные уровни каждого фактора для магистральных цеховых сетей представлены в табл. 2.13.

Таблица 2.13

Диапазоны изменения факторов для магистральных сетей

Фактор	$x_{i\min}$	$x_{i\text{ср}}$	$x_{i\max}$	$\Delta x_i = \frac{x_{i\max} - x_{i\min}}{2}$
$x_1 \rightarrow l, \text{ м}$	14	32	50	18
$x_2 \rightarrow r_{20}, \text{ мОм/м}$	0,200	0,143	0,085	0,028
$x_3 \rightarrow 1/n, \text{ шт}^{-1}$	0,125	0,295	0,09	0,205
$x_4 \rightarrow k_3^2$	0,090	0,55	1,00	0,455
$x_5 \rightarrow \theta_0, \text{ °С}$	5	20	35	15

После преобразования кодированных значений факторов в натуральные, потери ЭЭ в радиальных и магистральных участках цеховой сети можно определить по выражениям

$$\begin{aligned} \Delta W_p &= 2592 + 64,8l_{\text{ср}} - 32940 \frac{1}{n} - 4680S - 877,5k_3^2 - 13,05\theta_0 + 70650 \frac{1}{n} S - \\ &- 311,85l_{\text{ср}} \frac{1}{n} - 1228,5l_{\text{ср}} S + 6,3k_3^2 l_{\text{ср}} - 15840 \frac{1}{n} k_3^2 - 44910S k_3^2 + 540\theta_0 k_3^2; \\ \Delta W_M &= 3811,5 + 66,15l_{\text{ср}} - 5265 \frac{1}{n} - 1242r_{20} - 2623,5k_3^2 + 39,65\theta_0 - 73,8 \frac{1}{n} I_{\text{ср}} - \\ &- 176,4l_{\text{ср}} r_{20} + 9,9k_3^2 l_{\text{ср}} + 10260 \frac{1}{n} k_3^2 + 3730,5r_{20} k_3^2 - 93,6\theta_0 r_{20}. \end{aligned}$$

Суммарные потери ЭЭ по всей схеме в целом составят

$$\Delta W = 13,3 \text{ кВт} \cdot \text{ч.}$$

Корреляционный анализ

Основная задача корреляционного анализа – выявление связи между случайными переменными путем точечной и интервальной оценки парных коэффициентов корреляции, вычисления и проверки значимости множественных коэффициентов корреляции и детерминации, оценки частных коэффициентов корреляции. Корреляционный анализ позволяет также оценить функцию влияния регрессии одной случайной переменной на другую. Предпосылки корреляционного анализа следующие: переменные величины должны быть случайными; случайные величины должны иметь совместное нормальное распределение.

Для построения регрессионной модели были выявлены диапазоны изменения факторов: суммарная потребляемая мощность цеховой сети – 45–69 кВ · А; средняя длина линий цеховой сети – 10–100 м при их количестве 2–11; коэффициент загрузки – от 0,3 до 1,0 (при полностью загруженной сети); температура окружающей среды (соответствует крайним значениям температуры помещений цехов) – от 5 до 35 °С. На основе данной совокупности факторов была составлена таблица корреляционных параметров (табл. 2.14).

Таблица 2.14

Корреляционные параметры цеховых сетей

Номер комбинации факторов в табл. П.А.5	Комбинация факторов внешнего воздействия				
	S , кВ · А	$l_{\text{ср}}$, м	$1/n$, шт ⁻¹	k_3^2	θ_0 , °С
1	2	3	4	5	6
min	45	10	0,5	0,09	5
1	45–69	10	0,5	0,09	5
2	45–69	55	0,295	0,55	20

1	2	3	4	5	6
3	45–69	100	0,09	1,0	35
4	45	10–100	0,5	0,09	5
5	57	10–100	0,295	0,55	20
6	69	10–100	0,09	1,0	35
7	45	10	0,5	0,09–1,0	5
8	57	55	0,295	0,09–1,0	20
9	69	100	0,09	0,09–1,0	35
10	45	10	0,5	0,09	5–35
11	57	55	0,295	0,55	5–35
12	69	100	0,09	1,0	5–35
13	45	10	0,5-0,09	0,09	5
14	57	55	0,5-0,09	0,55	20
15	69	100	0,5-0,09	1,0	35
max	69	100	0,09	1,0	35

Для вычисления среднего арифметического и дисперсии величин x и y воспользуемся выражениями [20]

$$\bar{x} = \frac{\sum xm_x}{\sum mx}; \quad \bar{y} = \frac{\sum ym_y}{\sum my}; \quad (2.56)$$

$$s_x^2 = \frac{\sum x^2 m_x}{\sum mx} - \left(\frac{\sum xm_x}{\sum m_x} \right)^2; \quad s_y^2 = \frac{\sum y^2 m_y}{\sum my} - \left(\frac{\sum ym_y}{\sum m_y} \right)^2. \quad (2.57)$$

Выборочный коэффициент корреляции определяется

$$r_B = \frac{\sum_{x,y} xym_{xy} - \sum_x xm_x \sum_y ym_y / \sum_{x,y} m_{xy}}{\sum_{x,y} m_{xy} s_x s_y}, \quad (2.58)$$

где $\sum m_x = \sum m_y = \sum m_{xy} = n$; m_x – суммарная частота наблюдаемого значения признака x при всех значениях y ; m_y – суммарная частота наблюдаемого значения признака y при всех значениях x ; m_{xy} – частота появления пары признаков (x, y) .

Результаты расчетов представлены в табл. 2.15.

Таблица 2.15

Выборочные коэффициенты корреляции

Номер комбинации факторов в табл. П.А.5	Выборочный коэффициент корреляции r_B
min	0,83
1–3	0,81
4–6	0,69
7–9	0,78
10–12	0,33
13–15 (радиальная схема)	0,66
13–15 (магистральная)	0,64
max	0,85

Проверка гипотезы о значимости выборочного коэффициента корреляции

Пусть двумерная генеральная совокупность (X, Y) распределена нормально. Из этой совокупности извлечена выборка объема n и по ней найден выборочный коэффициент корреляции r_B , который оказался отличным от нуля.

Так как выборка отобрана случайно, то еще нельзя заключить, что коэффициент корреляции генеральной совокупности r_T также отличен от нуля. В конечном счете, нас интересует именно этот коэффициент, поэтому возникает необходимость при заданном уровне значимости α проверить нулевую гипотезу $H_0: r_T = 0$ о равенстве нулю генерального коэффициента корреляции при конкурирующей гипотезе $H_1: r_T \neq 0$.

Если нулевая гипотеза отвергается, то это означает, что выборочный коэффициент корреляции значимо отличается от нуля (кратко говоря, значим), а X и Y коррелированы.

Если нулевая гипотеза будет принята, то выборочный коэффициент корреляции незначим, а X и Y некоррелированы.

В качестве критерия проверки нулевой гипотезы примем случайную величину [32]

$$T = r_B \frac{\sqrt{n-2}}{1-r_B^2}. \quad (2.59)$$

Величина T при справедливости нулевой гипотезы имеет распределение Стьюдента с $k = n - 2$ степенями свободы.

Поскольку конкурирующая гипотеза имеет вид $r_T \neq 0$, критическая область – двусторонняя.

Обозначим значение критерия, вычисленное по данным наблюдений, через $T_{\text{набл}}$ и сформулируем правило проверки нулевой гипотезы.

Правило. Для того чтобы при заданном уровне значимости α проверить нулевую гипотезу $H_0: r_T = 0$ о равенстве нулю генерального коэффициента корреляции нормальной двумерной случайной величины при конкурирующей гипотезе $H_1: r_T \neq 0$, надо вычислить наблюдаемое значение критерия

$$T_{\text{набл}} = r_B \frac{\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r_B^2}} \quad (2.60)$$

и по таблице критических точек распределения Стьюдента, по заданному уровню значимости и числу степеней свободы $k = n - 2$ найти критическую точку $t_{кр}(\alpha; k)$ для двусторонней критической области [18].

Если $|T_{набл}| < t_{кр}$ – нет оснований отвергнуть нулевую гипотезу.

Если $|T_{набл}| > t_{кр}$ – нулевую гипотезу отвергают.

По выборке объема $n = 114$, извлеченной из нормальной двумерной совокупности, найден выборочный коэффициент корреляции $r_B = 0,83$. При уровне значимости 0,05 проверим нулевую гипотезу о равенстве нулю генерального коэффициента корреляции при конкурирующей гипотезе $H_1: r_T \neq 0$.

Найдем наблюдаемое значение критерия

$$T_{набл} = r_B \frac{\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r_B^2}} = 0,83 \frac{\sqrt{114-2}}{\sqrt{1-0,83^2}} = 15,8.$$

По условию, конкурирующая гипотеза имеет вид $r_T \neq 0$, поэтому критическая область – двусторонняя. По уровню значимости 0,05 и числу степеней свободы $k = 114 - 2 = 112$ находим по [18] для двусторонней критической области критическую точку $t_{кр}(0,05; 112) = 1,96$.

Соответствующие расчеты были произведены для всех выборочных коэффициентов корреляции (табл. 2.15), все выше указанные коэффициенты значимы.

Сравнительный анализ методических погрешностей методов определения потерь электроэнергии

В результате исследования наиболее часто применяемых для расчетов в низковольтных сетях методов определения потерь ЭЭ определены их методические погрешности. В табл. 2.16 приведены погрешности детерминированных и вероятностно-статистических методов расчета.

Сравнительный анализ методических погрешностей некоторых методов
определения потерь ЭЭ

Метод расчета потерь ЭЭ	Погрешность метода, %	Причины погрешности
1	2	3
Детерминированные методы		
Графического интегрирования (поэлементный) с учетом нагрева проводников	0	–
По потере напряжения	+14	Большое количество эмпирических коэффициентов, неучет сопротивлений контактных соединений
По суммарной длине линий	–27	Большое количество эмпирических коэффициентов, неучет сопротивлений контактных соединений
Эквивалентных преобразований	–31	Принципы эквивалентирования
Вероятностно-статистические методы		
Математического ожидания нагрузки	+38	Трудность выделения обобщенных графиков, отсутствие достоверного вероятностно-статистического описания исходной информации
Статистической выборки	–11 ÷ +14	Определение минимального объема выборки
Регрессионного анализа	+6	Определение коэффициентов полинома

Анализ методических погрешностей методов определения потерь ЭЭ в цеховых системах электроснабжения промышленных предприятий показывает, что методы регрессионного анализа обладают меньшими погрешностями расчетов.

2.7. Выводы по второй главе

1. Проанализировано, что отсутствие достоверной информации о параметрах элементов цеховых сетей низкого напряжения и неучет факторов, определяющих эти параметры, ведет к погрешностям при вычислении потерь ЭЭ.

2. Показано, что при расчетном способе определения потерь ЭЭ в цеховых сетях необходимо иметь информацию о следующих величинах:

- точном значении длин и количестве линий цеховых сетей;
- перегреве проводников, обусловленном токовой нагрузкой провода и температурой окружающей среды;
- сопротивлению контактных соединений коммутационных аппаратов и их числе, так как линии цеховых сетей при небольшой протяженности имеют большое количество последовательных узлов с коммутационной аппаратурой и, при этом, сопротивление аппаратов оказывается соизмеримым с сопротивлением линии;
- данных о графиках нагрузки.

3. Установлено, что экспериментальный способ определения потерь энергии, основанный на разности показаний счетчиков в начале питающей линии и у потребителя, может иметь погрешность $\pm 100\%$.

4. Определены причины и величины погрешностей некоторых детерминированных и вероятностно-статистических методов расчета потерь ЭЭ.

5. Выявлено, что наименьшие методические погрешности (+6 %) обеспечивают методы регрессионного анализа.

Глава 3. КОМПЛЕКСНЫЙ ПОДХОД К ИССЛЕДОВАНИЮ ОБЩИХ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ КОНТАКТНЫХ СОЕДИНЕНИЙ СИСТЕМ ЦЕХОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

3.1. Постановка задачи

Для распределительных электрических сетей промышленных и сетевых предприятий, как в России, так и Западной Европе, тема анализа эффективности функционирования электрических сетей стала актуальной еще в конце прошлого века.

За последние годы рынок, на котором работают промышленные и электросетевые предприятия, претерпел кардинальные изменения. Если еще в начале 90-х годов предприятия находились в ведении муниципалитетов и об эффективном управлении никто не задумывался, то в настоящее время продолжается активный процесс приватизации промышленных и электросетевых предприятий. Теперь внимание менеджмента электросетевого бизнеса направлено на грамотное управление средствами, т. е. фокус внимания нацелен на максимизацию прибыли и оптимизацию затрат. При этом, для обеспечения качества ЭЭ власти различных стран устанавливают нормы и правила ведения электросетевого бизнеса.

Таким образом, основным вопросом управления промышленными и электросетевыми компаниями является обеспечение качества энергии и надежности сети. Многие компании направляют усилия на оптимизацию оперативно-диспетчерского управления и сокращение расходов на всем сроке службы всех компонентов сети. Анализ постоянных затрат вследствие износа сетей является важной составляющей этой деятельности.

При управлении активами распределительных сетей необходимо одновременно обрабатывать и анализировать множество различных данных. Это влияет и на задачи планирования электропотребления и развития сетей,

которые становятся все более сложными. Кроме того, при рассмотрении задач по развитию сетей и обеспечению их надежности, необходимо учитывать экономические и экологические аспекты. Таким образом, необходимы современные методики и средства, помогающие управлению электрическими сетями. Одним из наиболее важных инструментов при планировании является анализ качества эксплуатации сети, который может также применяться для оценки эффективности управления активами. В связи с этим возникает задача комплексной оценки показателей эффективности функционирования низковольтных аппаратов как элементов цеховых сетей в процессе их работы.

Эффективность функционирования как системы электроснабжения в целом, так и отдельных ее элементов определяется в общем случае надежностью электроснабжения и качеством ЭЭ у электроприемников. Надежность системы электроснабжения определяется надежностью входящих в нее элементов, качеством ее эксплуатации. Надежность элементов, входящих в систему, характеризуется их безотказностью, ремонтпригодностью, сохраняемостью и долговечностью.

Повседневный технический надзор за электрооборудованием осуществляется эксплуатационным персоналом, как на основании измерительных приборов, так и путем осмотра электрооборудования. Он должен быть связан с проведением мероприятий, направленных на экономию ЭЭ.

Совершенно очевидно, что создавать высококачественные технические агрегаты не имеет смысла, если не предусмотреть соответствующее качество их энергоснабжения, в частности электроснабжения. Если исходить из концепции о иерархической структуре качества объекта, то систему электроснабжения следует считать одним из базовых элементов в любом производственном комплексе, а это означает, что требования к ее качеству должны быть высокими. При этом следует иметь в виду, что повышение качества всегда связано с дополнительными затратами на каждый данный момент времени, и не техника, а экономика ставит предел целесообразному повышению качества. Необходимо совместное решение оптимизации проблем повышения

качества электроснабжения и режимов электропотребления. Под оптимизацией режимов электропотребления отдельных электроустановок следует понимать достижение минимума затрат на этих установках за счет проведения организационно-технических мероприятий, изменяющих электропотребление электроустановки. Эта оптимизация может осуществляться путем совершенствования технологических процессов производства и замены малоэкономичных автоматических устройств устройствами более экономичными.

Замена неэкономичного устаревшего устройства или оптимизация режима электропотребления с учетом изменения нагрузок решается только на стадии эксплуатации. Поэтому при оптимизации режима системы электроснабжения и ее надежности оба этих вопроса должны рассматриваться комплексно, т. е. совместно.

В процессе эксплуатации параметры системы должны корректироваться в соответствии с требованиями непрерывно изменяющихся нагрузок. Для проведения такой корректировки необходимо осуществлять постоянный контроль за режимом электропотребления и работой системы электроснабжения.

Производя замеры и анализируя статистический материал, делается вывод о всех ненормальных явлениях, наблюдаемых при функционировании системы электроснабжения. Таким образом, именно комплексный контроль за качеством электроснабжения можно считать основой решения задачи по обеспечению оптимальной надежности и оптимального режима электропотребления. Кроме того, с этой задачей связаны такие вопросы, как проведение планово-предупредительных ремонтов, обеспечение резервных запасных элементов, организация рациональной эксплуатации системы электроснабжения.

3.2. Исследование законов изменения сопротивлений силовых цепей контактных систем низковольтных коммутационных аппаратов

3.2.1. Анализ и классификация низковольтных коммутационных аппаратов по конструктивным особенностям

Некоторые виды низковольтных коммутационных аппаратов, несмотря на кажущуюся простоту [209], представляют собой весьма сложную техническую систему, главным требованием к которой является нормальное функционирование в соответствии с конкретным назначением [158; 184; 240; 259]. Общее положение, определяющее функциональную пригодность аппарата, предполагает удовлетворение в процессе его эксплуатации заранее установленных и совершенно определенных критериальных требований [170; 189; 238], причем по содержанию и жесткости они могут сильно различаться в зависимости от типа аппарата, режимов и условий его эксплуатации. Так, в работах [241; 242] впервые представлен анализ эксплуатационных характеристик низковольтных аппаратов отечественных и зарубежных производителей.

Например, характерной особенностью автоматических выключателей является возможность длительного нахождения их контактов в замкнутом состоянии, к тому же в условиях действия агрессивных сред, влаги, повышенной температуры и т. д. А это обуславливает жесткие требования к стабильности и уровню переходного сопротивления контактных соединений. Для контакторов эти требования могут быть смягчены, поскольку при частой оперативной коммутации тока возможно периодическое обновление контактных поверхностей [61; 76]. Но в том и другом случае необходимо наличие информации о значении сопротивлений контактных соединений, поскольку из-за большой протяженности и разветвленности заводских сетей низкого напряжения с множеством последовательных узлов с контактными

соединениями, доля сопротивлений последних в общем эквивалентном сопротивлении заводской сети достаточно высока. Поэтому при определении потерь ЭЭ в заводских сетях напряжением до 1000 В следует учитывать сопротивление контактной системы коммутационных аппаратов, что впервые обосновано в наших исследованиях [39; 21; 23]. Мощность, потребляемая собственно аппаратом при его функционировании и рассеиваемая в нем, должна быть минимальной [56].

В результате проведенных экспериментальных исследований [58] предлагаются следующие электрические схемы и схемы замещения силовых цепей низковольтных аппаратов.

Электрическая схема и схема замещения силовой цепи контактора могут быть представлены в виде, показанном на рис. 3.1 и 3.2.

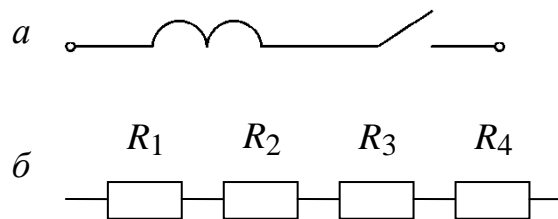


Рис. 3.1. Электрическая схема (а) и схема замещения (б) силовой цепи контактора с одним контактом и дугогашением:

$R_1 = R_4$ – сопротивление болтовых присоединений контактора;

R_2 – сопротивление дугогасящей катушки;

R_3 – сопротивление силовых контактов в замкнутом состоянии

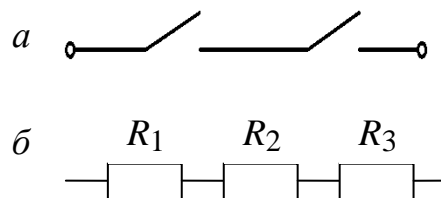


Рис. 3.2. Электрическая схема (а) и схема замещения (б) силовой цепи контактора с мостиковыми контактами:

$R_1 = R_3$ – сопротивление болтовых присоединений;

R_2 – сопротивление мостикового контакта в замкнутом состоянии

Электрическая схема и схема замещения силовой цепи магнитного пускателя представлены на рис. 3.3.

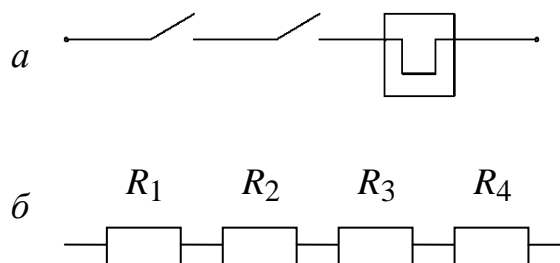


Рис. 3.3. Электрическая схема (а) и схема замещения (б) силовой цепи магнитного пускателя:

$R_1 = R_4$ – сопротивление болтовых присоединений;

R_2 – сопротивление мостикового контакта в замкнутом состоянии;

R_3 – сопротивление элемента теплового реле

В общем виде электрические схемы и схемы замещения силовой цепи автоматического выключателя и силовой цепи плавкого предохранителя приведены на рис. 3.4 и рис. 3.5 соответственно.

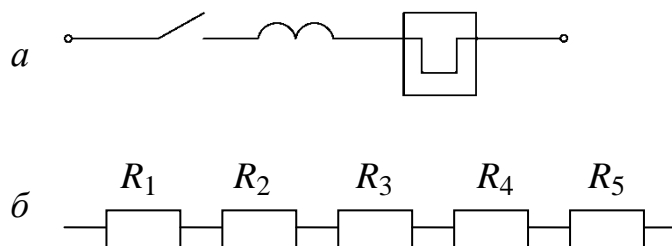


Рис. 3.4. Электрическая схема (а) и схема замещения (б) силовой цепи автоматического выключателя:

$R_1 = R_5$ – сопротивление болтовых присоединений;

R_2 – сопротивление силовых контактов в замкнутом состоянии;

R_3 – сопротивление отключающей катушки;

R_4 – сопротивление элемента теплового реле

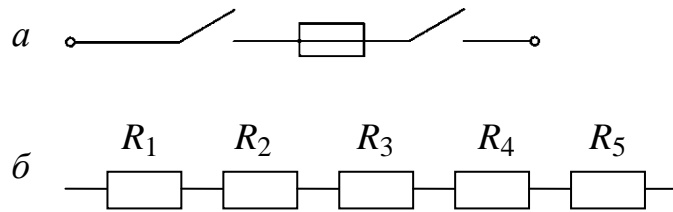


Рис. 3.5. Электрическая схема (а) и схема замещения (б) силовой цепи плавкого предохранителя:

$R_1 = R_5$ – сопротивление болтовых присоединений;

$R_2 = R_4$ – сопротивление между губками и ножами предохранителя;

R_3 – сопротивление плавкой вставки с ее подсоединениями к ножам

На рис. 3.6 показаны электрическая схема и схема замещения силовой цепи рубильника.

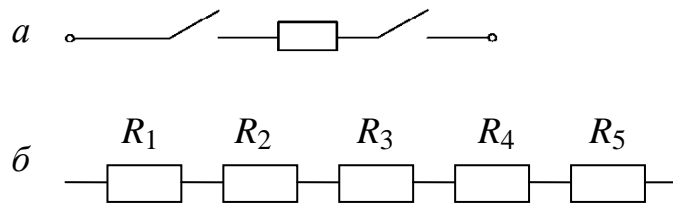


Рис. 3.6. Электрическая схема (а) и схема замещения (б) силовой цепи рубильника:

$R_1 = R_5$ – сопротивление болтовых присоединений;

$R_2 = R_4$ – сопротивление переходов между губками и ножом рубильника;

R_3 – сопротивление ножа рубильника

На рис. 3.7 показаны электрическая схема и схема замещения силовой цепи пакетного выключателя.

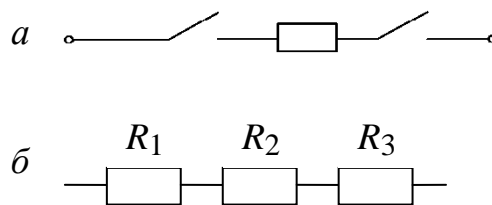


Рис. 3.7. Электрическая схема (а) и схема замещения (б) силовой цепи пакетного выключателя:

$R_1 = R_3$ – сопротивление болтовых присоединений;

R_2 – сопротивление двух контактов и среднего ножа

Результаты экспериментальных исследований низковольтных коммутационных аппаратов, применяемых в цеховых сетях промышленного электроснабжения, впервые представленные в работе [58], показали, что по конструктивным особенностям аппараты можно разделить на следующие 3 группы:

– аппараты, имеющие кроме силовых контактов в силовой цепи добавочные элементы (датчики тепловых реле, катушки максимальных реле), такие как: автоматические выключатели, магнитные пускатели, контакторы;

– аппараты, имеющие относительно большое сопротивление силовой цепи, такие как предохранители;

– аппараты, имеющие только переходное сопротивление контактов, такие как рубильники, пакетные выключатели.

3.2.2. Методика проведения эксперимента по определению сопротивлений контактных соединений коммутационных аппаратов

Интенсивное развитие низковольтного аппаратостроения в настоящее время обусловлено вводом новых мощностей на промышленных предприятиях, увеличением числа мелких и средних производств.

Расширяются области применения аппаратов и ужесточаются требования к ним. Вместе с тем не все технические параметры аппаратов бывают указаны в паспортных данных. В частности, не всегда указывается сопротивление силовой цепи аппарата, нет также требований и ГОСТов на сопротивления электрических аппаратов [78; 79].

Для исследования величины сопротивлений контактных соединений применяется метод амперметра-вольтметра [163; 172; 174], который состоит в том, что по контактам аппарата во включенном состоянии пропускается постоянный или выпрямленный ток и измеряются ток и падение напряжения на контактах аппарата.

Эквивалентное сопротивление аппаратов может зависеть от ряда величин, таких как род тока (переменный или постоянный), от значения этого тока и времени его воздействия.

Для того, чтобы выбрать методику экспериментального определения сопротивления силовой цепи аппарата, были проведены предварительные исследования о влиянии вышеперечисленных факторов. На рис. 3.8 представлена схема, позволяющая пропускать через аппарат большие переменные токи в течение длительного времени.

Измерения сопротивлений с помощью указанной схемы проводились на автоматических выключателях, контакторах, магнитных пускателях, предохранителях, рубильниках и пакетных выключателях. Одновременно проводились измерения сопротивлений силовых цепей этих же аппаратов при протекании по ним постоянного тока 5–10 А (рис. 3.9). Результаты измерений приведены в табл. 3.1.

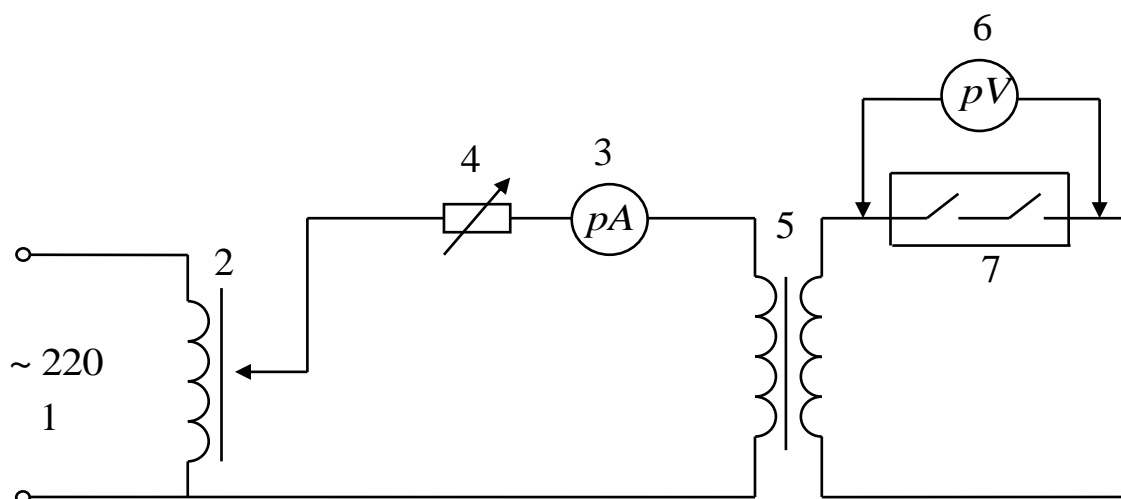


Рис. 3.8. Схема измерений сопротивлений контактных соединений коммутационных аппаратов на переменном токе:

1 – сеть переменного тока; 2 – линейный автотрансформатор; 3 – амперметр Д553;
4 – регулировочное сопротивление; 5 – трансформатор тока ТТ-УТТ-6М;
6 – электронный вольтметр В7-16; 7 – контролируемый аппарат

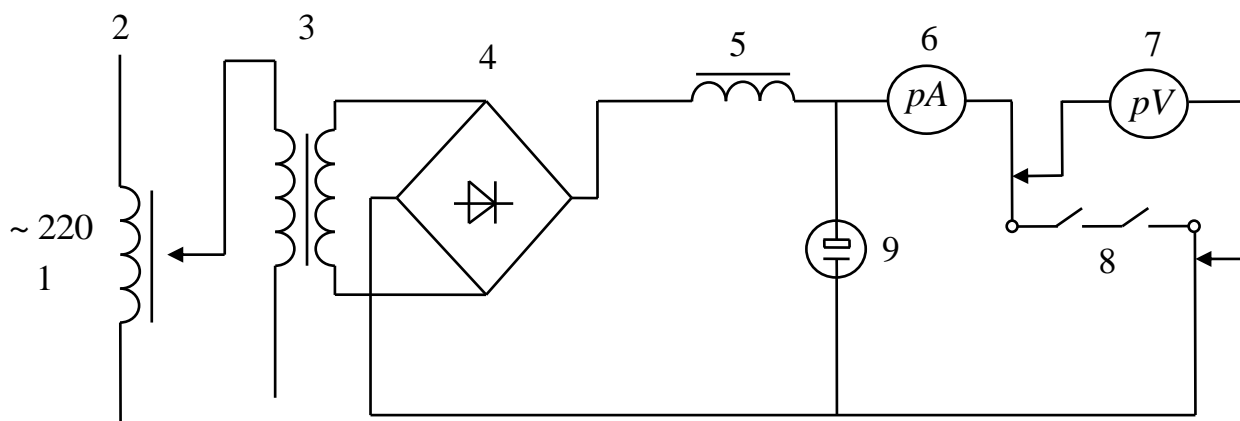


Рис. 3.9. Схема измерений сопротивлений контактных соединений коммутационных аппаратов на постоянном токе:

1 – сеть переменного тока; 2 – линейный автотрансформатор;
3 – трансформатор; 4 – выпрямитель Д242; 5 – дроссель Д52; 6 – амперметр Д553;
7 – вольтметр М81; 8 – контролируемые контакты; 9 – конденсатор

Результаты измерений сопротивлений низковольтных
коммутационных аппаратов, мОм

Аппараты	Ток переменный						Ток постоянный
	$0,5I_H$			I_H			5–10А
	Время протекания тока, мин						
	0	5	10	0	5	10	10
Автоматический выключатель АЕ2056 $I_H = 80 \text{ А}$	3,83	3,80	3,85	3,82	3,80	3,88	3,84
Предохранитель ПН-2 $I_H = 250 \text{ А}$	0,40	0,48	0,53	0,50	0,51	0,52	0,50
Магнитный пускатель ПМЕ-211 $I_H = 25 \text{ А}$	31,5	33,0	34,0	31,0	33,0	34,0	33,0
Рубильник Р $I_H = 100 \text{ А}$	0,66	0,71	0,72	0,70	0,72	0,73	0,68
Пакетный выключатель ПВ3-60 $I_H = 63 \text{ А}$	1,00	1,21	1,32	1,11	1,21	1,43	1,20

Результаты экспериментальных данных, впервые представленные в нашей работе [244], показывают, что сопротивления силовой цепи аппарата изменяются в зависимости от величины тока, рода тока и времени его протекания в пределах $\pm 5 \%$, т. е. в пределах инженерной точности измерений

и разброса параметров. Поэтому в дальнейшем для исследования сопротивлений силовой цепи аппаратов была принята схема измерения на постоянном токе, представленная на рис. 3.9.

Измерения сопротивлений проводились для отдельных точек аппарата, соответствующих схеме замещения его электрической цепи. Каждый замер проводился не менее трех раз и определялось среднее значение сопротивления.

Проведенные экспериментальные исследования показали, что основное сопротивление силовой цепи аппарата включает в себя сопротивление таких элементов, как контактная группа, датчик теплового реле, катушка максимального реле. Сопротивление болтовых соединений аппарата составляет небольшую долю общего сопротивления коммутационного аппарата [58].

Несмотря на то, что в ГОСТ на конкретные типы аппаратов требуется указывать величину электрического сопротивления, но такие данные в ГОСТах на низковольтные электрические аппараты не приводятся.

На рис. 3.10–3.15 представлены результаты экспериментальных данных исследования сопротивлений контактных соединений низковольтных коммутационных аппаратов [58].

Точка измерения	1	2	3
R , мОм	1,33	26,7	28,0

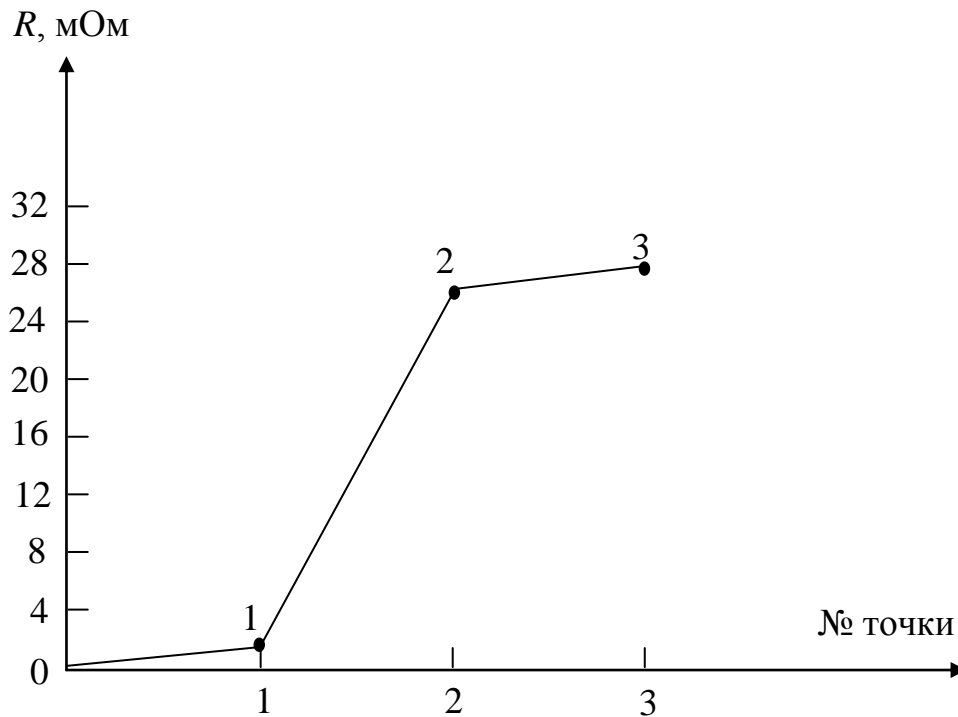
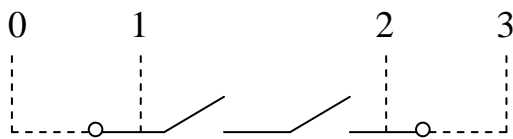


Рис. 3.10. Экспериментальные данные сопротивлений контактных соединений контактора МПКО, $I_H = 15$ А

Точка измерения	1	2	3	4	5
R , мОм	1,33	10,6	20,0	31,7	33,0

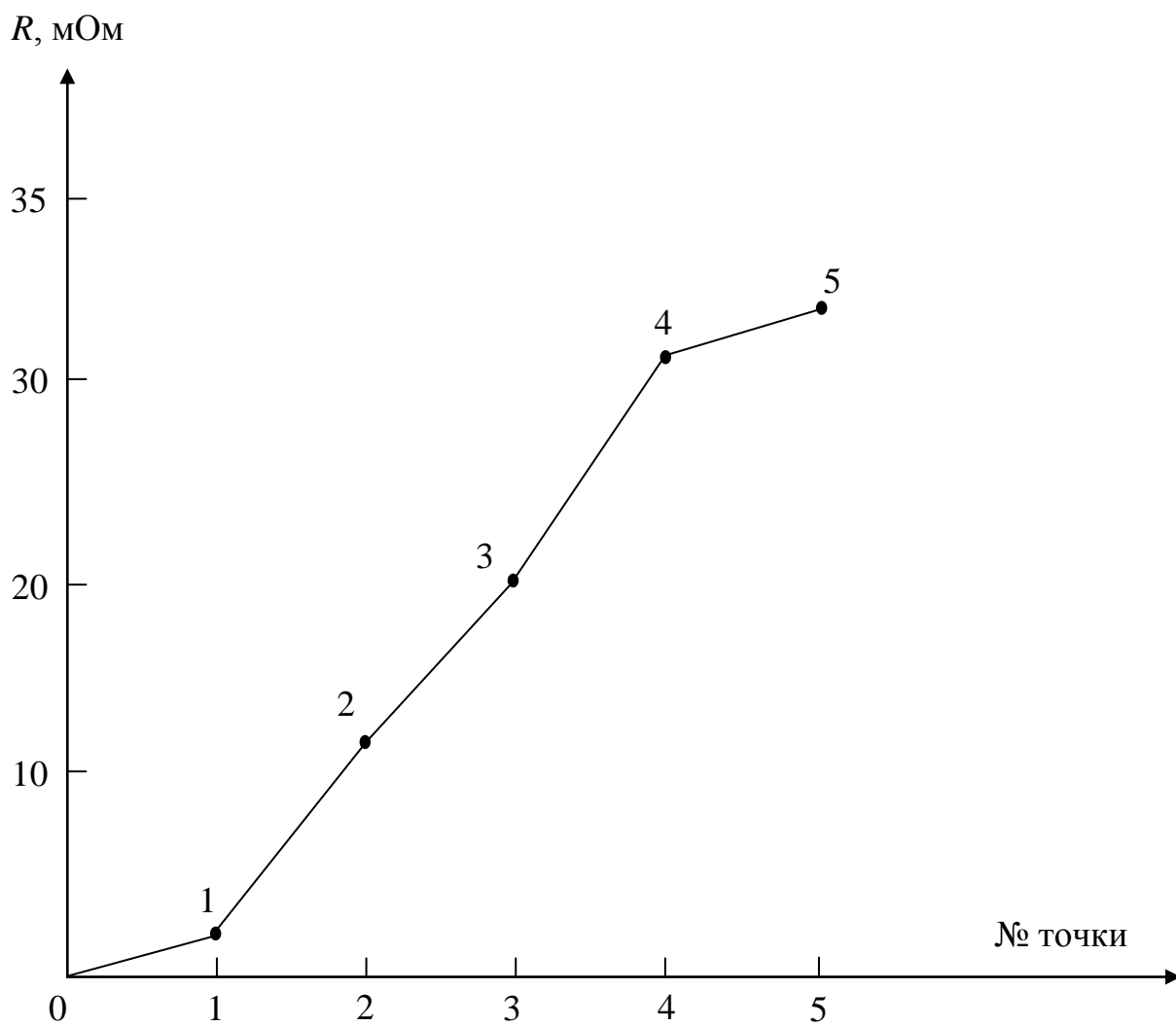
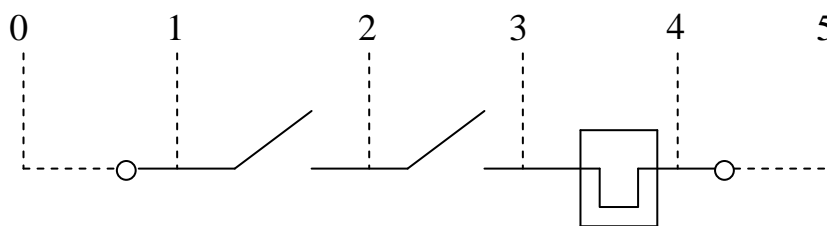


Рис. 3.11. Экспериментальные данные сопротивлений контактных соединений магнитного пускателя ПМЕ-211, $I_H = 25$ А

Точка измерения	1	2	3	4	5
$R, \text{ мОм}$	0,55	1,55	2,63	3,30	3,85

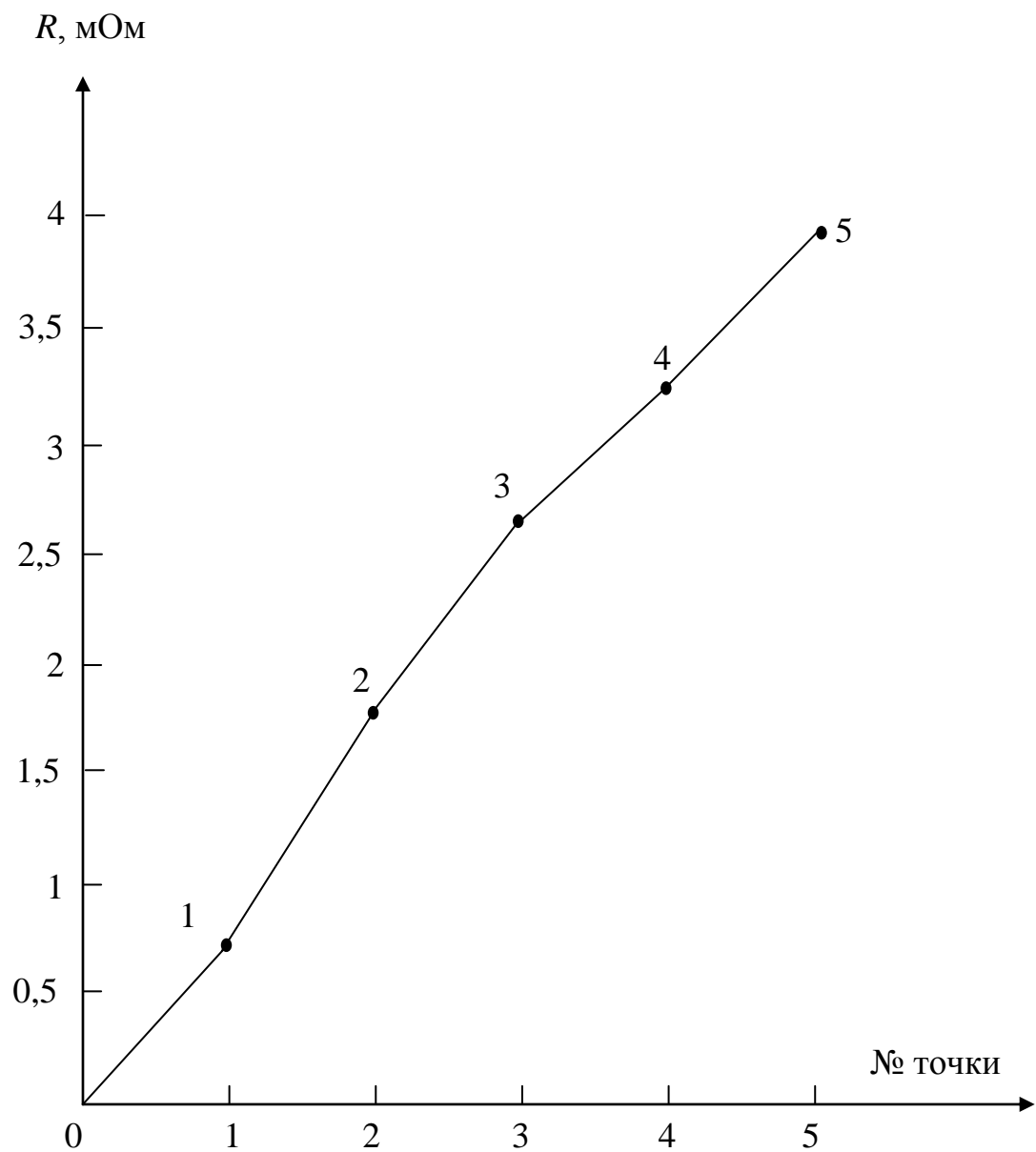
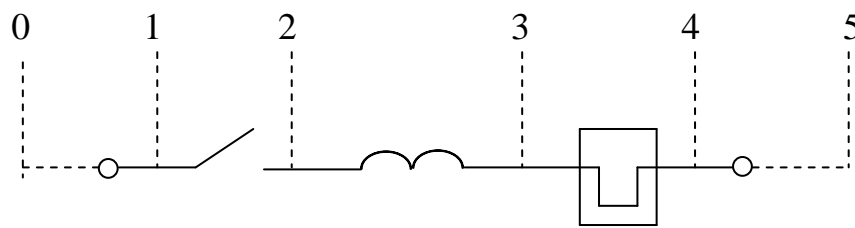


Рис. 3.12. Экспериментальные данные сопротивлений контактных соединений автомата АЕ2056, $I_H = 80 \text{ А}$

Точка измерения	1	2	3	4	5
R , мОм	0,03	0,06	0,44	0,47	0,50

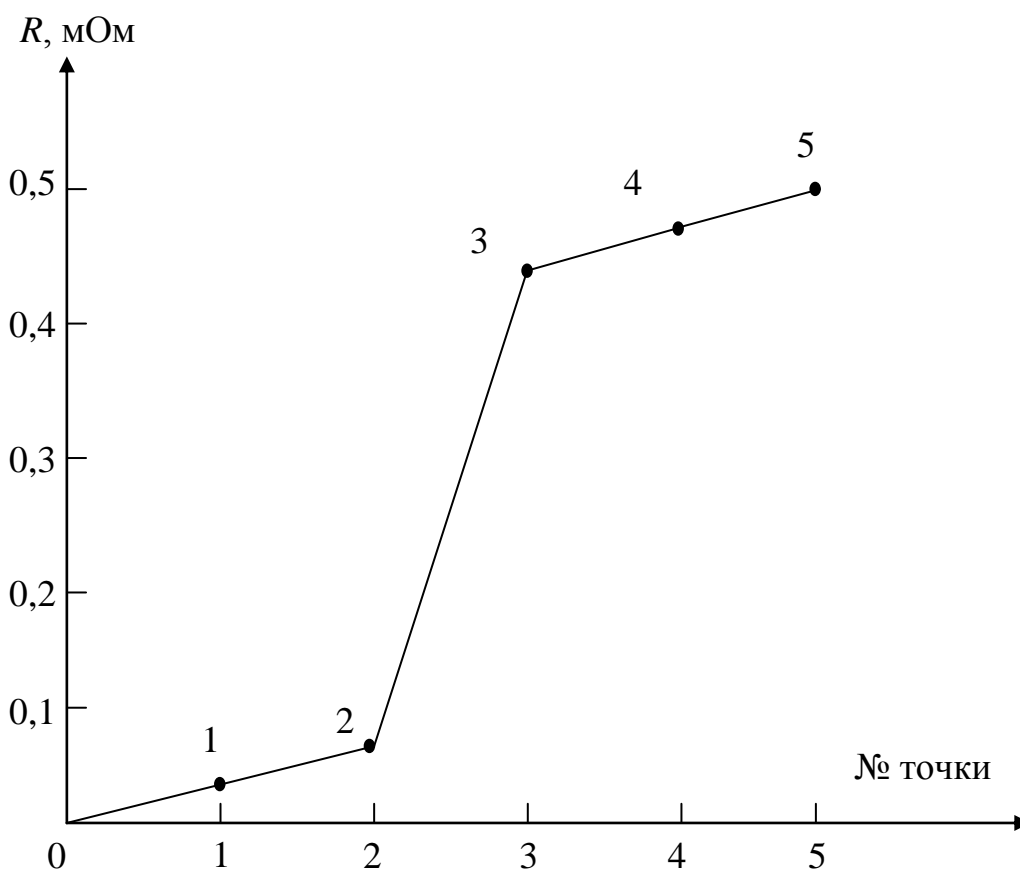
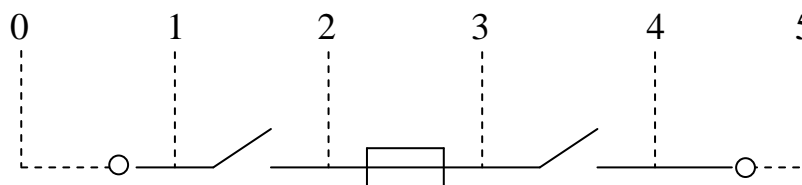


Рис. 3.13. Экспериментальные данные сопротивлений контактных соединений предохранителя ПН-2, $I_H = 250$ А

Точка измерения	1	2	3	4	5
R , мОм	0,10	0,16	0,54	0,60	0,70

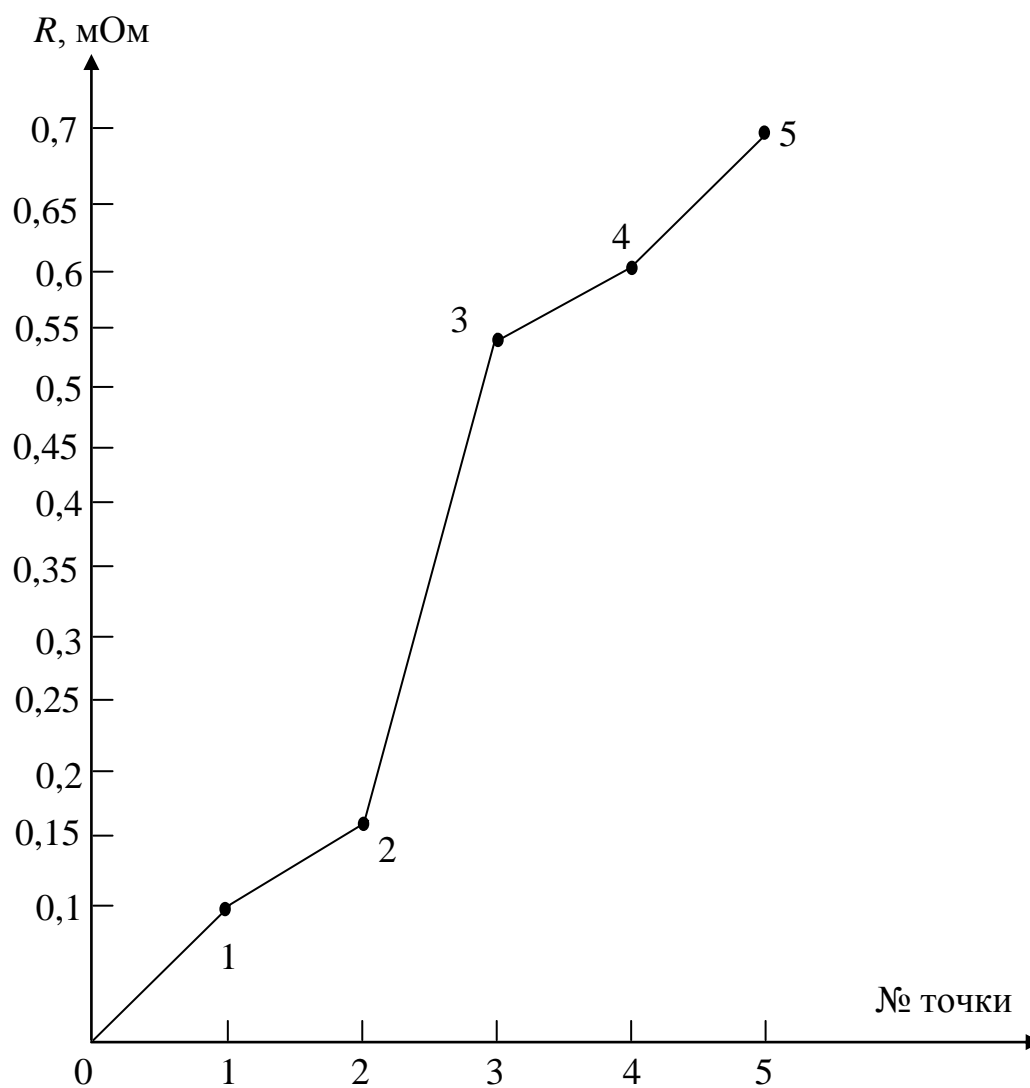
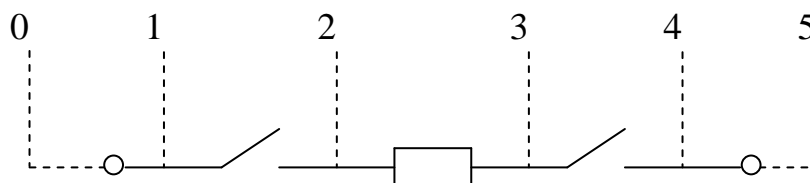


Рис. 3.14. Экспериментальные данные сопротивлений контактных соединений рубильника Р, $I_H = 100$ А

Точка измерения	1	2	3
R , мОм	0,03	1,17	1,20

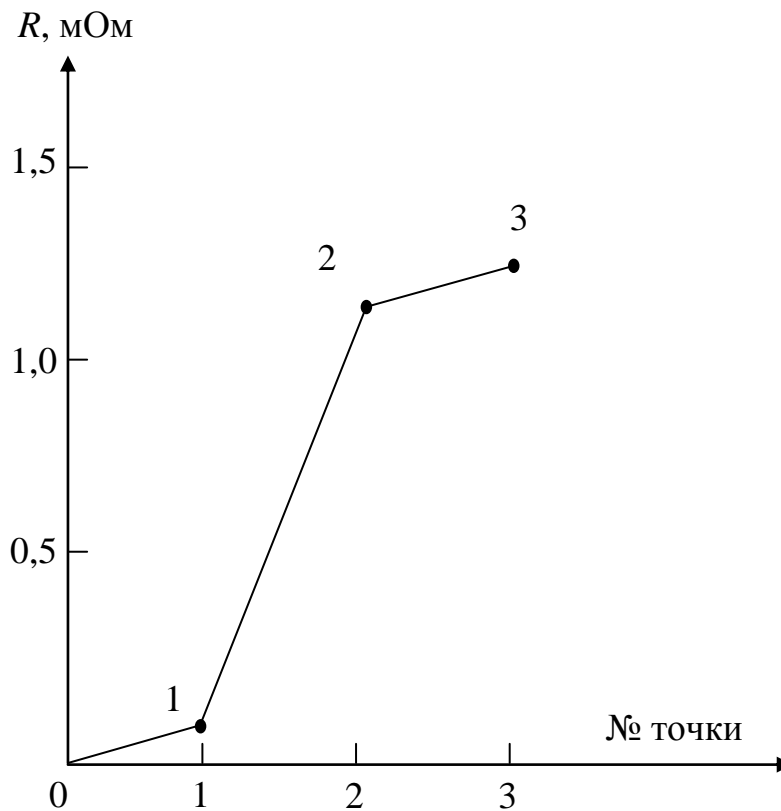
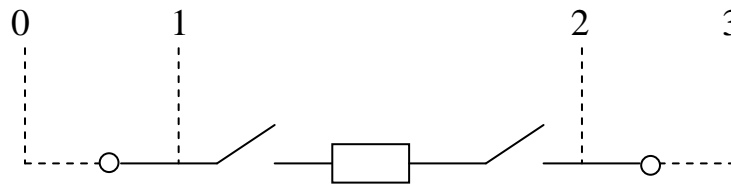


Рис. 3.15. Экспериментальные данные сопротивлений контактных соединений пакетного выключателя ПВЗ-60, $I_H = 63$ А

3.2.3. Определение зависимости сопротивлений силовых цепей контактных систем аппаратов от их номинальных параметров

Поскольку в справочной литературе отсутствует информация о сопротивлениях большинства низковольтных коммутационных аппаратов (а те данные, что приводятся, носят весьма приближенный характер), возникает проблема исследования законов изменения сопротивлений контактных соединений различных групп аппаратов. Для решения этой задачи были проведены измерения сопротивлений силовых цепей аппаратов методом амперметра-вольтметра (рис. 3.9). Сопротивление каждой фазы аппарата было измерено три раза и затем было найдено среднее значение, далее было вычислено среднее значение по фазам.

Для магнитных пускателей отдельно были измерены сопротивления фаз *A* и *C* и затем было найдено среднее значение для каждой из этих фаз. Для фазы *B*, в которой нет теплового реле, расчет проводился отдельно.

Как показали исследования, результаты измерений практически не зависят от величины тока, протекающего через контакты при испытании [52; 58].

На рис. 3.16 представлены графики зависимостей сопротивлений аппаратов от номинального тока, впервые показанные в наших опытах [53; 247]. Эти зависимости близки к гиперболической.

На основании метода наименьших квадратов [127; 161], применяемого обычно для обработки результатов экспериментов, по полученным в эксперименте измерениям требовалось выявить функциональную зависимость между эквивалентным сопротивлением контактных соединений коммутационного аппарата и величиной номинального тока аппарата.

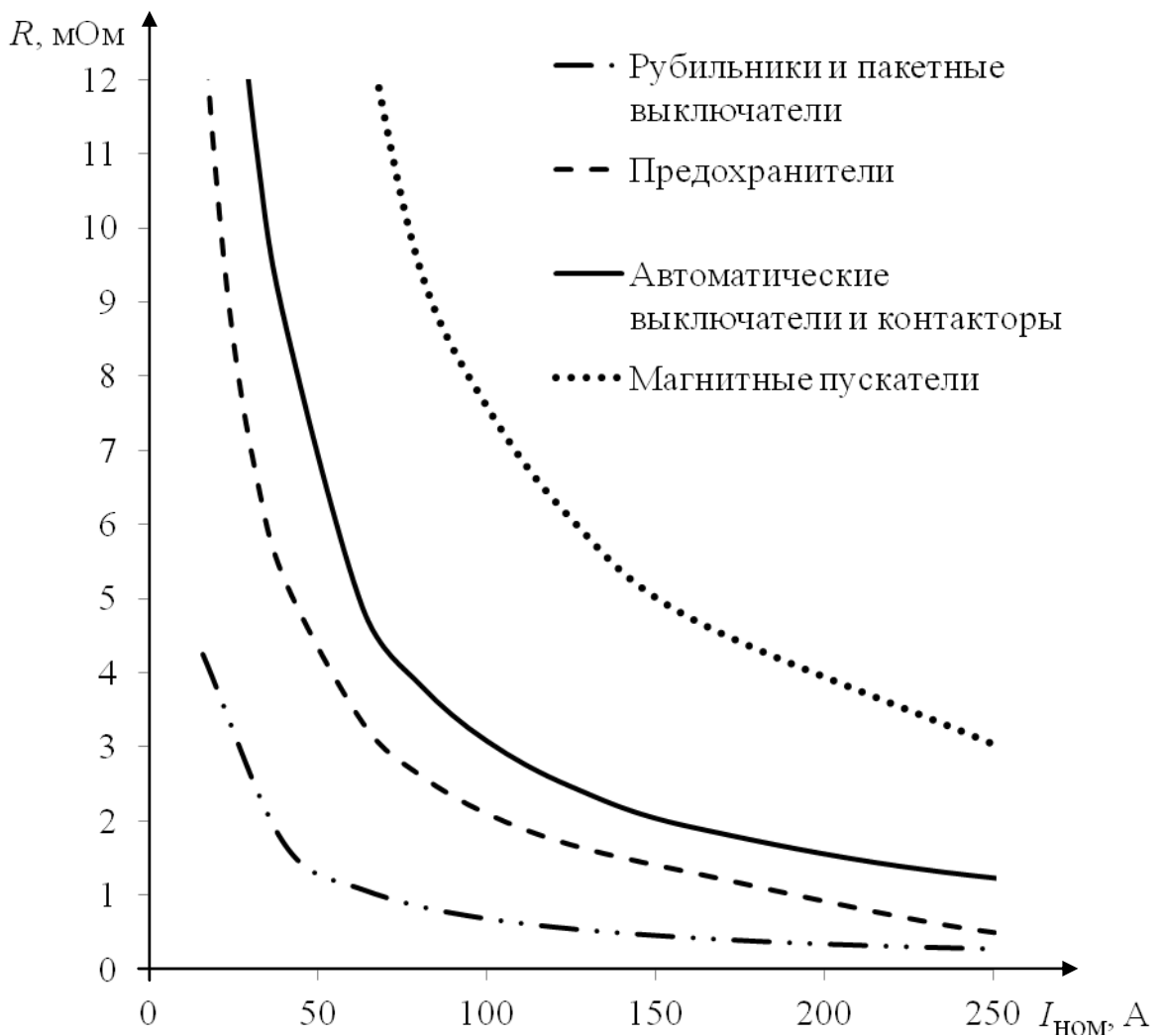


Рис. 3.16. Графики зависимостей сопротивлений аппаратов от номинального тока

При этом для проведенных экспериментов предполагаем зависимость $R = A/I_H$.

В значениях измерений [161; 213] наверняка имеются погрешности. Для оценки коэффициента A для каждого типа аппарата воспользуемся критерием наименьших квадратов, т. е. будем искать такую функциональную зависимость, при которой сумма квадратов отклонений между расчетными и измеренными параметрами минимальна:

$$\sum_{i=1}^N \left(R_i - R_i^* \right)^2 = \min, \quad (3.1)$$

*
 где R_i^* – измеренная величина сопротивления; R_i – расчетная величина сопротивления; N – число измерений.

При этом основными свойствами метода наименьших квадратов [104], существенными при оценке искомых коэффициентов, являются:

1) в результате применения метода наименьших квадратов вычисляется оценка параметров, которая наименее уклоняется от измерений в смысле минимума суммы квадратов отклонений;

2) при заранее известных максимальных погрешностях измерений можно выявить существенные ошибки в измеряемых величинах;

3) при различном количестве статистических данных или при их различных значениях результаты оценки различны;

4) чем больше статистических данных, тем выше точность оценки;

5) при недостатке статистических данных метод наименьших квадратов может не иметь решения.

До эксперимента определяется возможная максимальная погрешность измерений. Предполагаем, что все проведенные измерения равноточны (весовые коэффициенты равны 1), максимальное среднеквадратичное отклонение измеренных параметров от истинных не превышает 0,9, т. е. $\sigma_i \leq 0,9; i = 1, 2, \dots, N$.

В матричной форме записи задача заключается в минимизировании функции

$$S = \left[R_i - R_i^*(A, I_H) \right]^T \cdot \left[R_i - R_i^*(A, I_H) \right], \quad (3.2)$$

где R_i – вектор измерений; A – вектор оцениваемых параметров.

В развернутом виде

$$S = \sum_{i=1}^N \left(R_i - R_i^* \right)^2 = \sum_{i=1}^N \left(R_i - \frac{A}{I_{H_i}} \right)^2 = \min. \quad (3.3)$$

При поиске минимума S частная производная по A приравняется к нулю:

$$\frac{\partial S}{\partial A} = (-2) \sum_{i=1}^N \frac{1}{I_{H_i}} \left(R_i - \frac{A}{I_{H_i}} \right) = 0. \quad (3.4)$$

В результате решения данного уравнения определяются коэффициенты A для каждой серии измерений сопротивлений контактных соединений коммутационных аппаратов различных типов.

При этом ни один из расчетных параметров не отклоняется от измеренных более чем на установленную предельную величину

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{R_i - R_i^*}{n-1} \right)^2}.$$

Результаты исследований показывают, что сопротивление аппаратов в эксплуатации увеличивается. При этом для магнитных пускателей критическим значением кратности начального сопротивления (нового аппарата) является 3,2; для автоматических выключателей и контакторов – 2,9; для предохранителей – 2,7; для пакетных выключателей и рубильников – 1,8.

При этом режимы работы (частота коммутаций и величина протекающего через аппарат тока) практически не оказывают влияния на динамику изменения сопротивления контактных систем.

По результатам экспериментальных данных впервые были получены аналитические зависимости сопротивлений аппаратов от их номинальных токов [52; 247], представленные в табл. 3.2. За основу была принята гиперболическая зависимость $R = A/I_H$ и на основании метода наименьших квадратов были определены коэффициенты A для различных типов аппаратов. Полученные аналитические выражения для вычисления коэффициентов в эмпирических формулах имеют отклонения от экспериментальных данных $\pm 5\%$.

Достоверность полученных данных подтверждается сходимостью с независимыми результатами исследований ученых Е.Ф. Щербакова, Л.И. Балтера, И.Е. Штрикмана в их работе «Об измерении активных потерь в электрических аппаратах» [252].

Таблица 3.2

Аналитические зависимости сопротивлений коммутационных аппаратов
от номинального тока

Аппараты	Номинальный ток $I_{\text{НОМ}}, \text{A}$	Аналитическая зависимость сопротивления от номинального тока
Магнитные пускатели	< 70	$R = 825 / I_{\text{НОМ}}$
	≥ 70	$R = 760 / I_{\text{НОМ}}$
Автоматические выключатели и контакторы	< 60	$R = 349 / I_{\text{НОМ}}$
	≥ 60	$R = 307 / I_{\text{НОМ}}$
Предохранители	< 200	$R = 210 / I_{\text{НОМ}}$
	≥ 200	$R = 125 / I_{\text{НОМ}}$
Рубильники и пакетные выключатели	Любое значение	$R = 68 / I_{\text{НОМ}}$

3.3. Сравнительный анализ теоретических и экспериментальных значений сопротивлений контактных соединений низковольтных аппаратов

3.3.1. Экспериментальная проверка достоверности расчетных значений сопротивлений контактных систем аппаратов

Одним из факторов, определяющих безаварийность работы потребителей и систем внутризаводского электроснабжения, является надежная работа контактов низковольтных коммутационных аппаратов [259]. В условиях эксплуатации изменяются технические характеристики аппаратов. Зная сопротивление контактных соединений [247], можно повысить их надежность, выбрав материал, удовлетворяющий заданным требованиям.

Оценим возможную точность некоторых методов определения сопротивлений контактных соединений низковольтных аппаратов в зависимости от имеющихся исходных данных.

Один из методов определения сопротивления контактных соединений низковольтных аппаратов заключается в исследовании зависимости сопротивления от номинального тока через потери мощности на полюс аппарата. Потери мощности на полюс ΔP могут быть определены по каталожным данным, в результате анализа которых установим, что зависимость этих потерь от номинального тока для автоматических выключателей серии ВА-57 можно описать выражением

$$\Delta P_{\text{пот. ав}}(I_{\text{н}}) = 8,34 e^{-0,01I_{\text{н}}} + 0,194I_{\text{н}}, \quad (3.5)$$

а для контакторов серии КТИ аппроксимирующей функцией вида

$$\Delta P_{\text{пот. конт}}(I_{\text{н}}) = 1,698 e^{-0,1I_{\text{н}}} + 0,068I_{\text{н}}. \quad (3.6)$$

Используя каталожные данные, построим график зависимости сопротивления контактных соединений автоматических выключателей серии ВА от номинального тока – кривая $R_{\text{ПОТ.ав}}(I_{\text{Н}})$ (рис. 3.17) и для контакторов серии КТИ – кривая $R_{\text{ПОТ.конт}}(I_{\text{Н}})$ (рис. 3.18).

Сопротивление контактов определяем по выражению

$$R = \frac{\Delta P}{I_{\text{Н}}^2}, \quad (3.7)$$

где ΔP находится по (3.5) для автоматических выключателей и (3.6) для контакторов, $I_{\text{Н}}$ – номинальный ток аппарата.

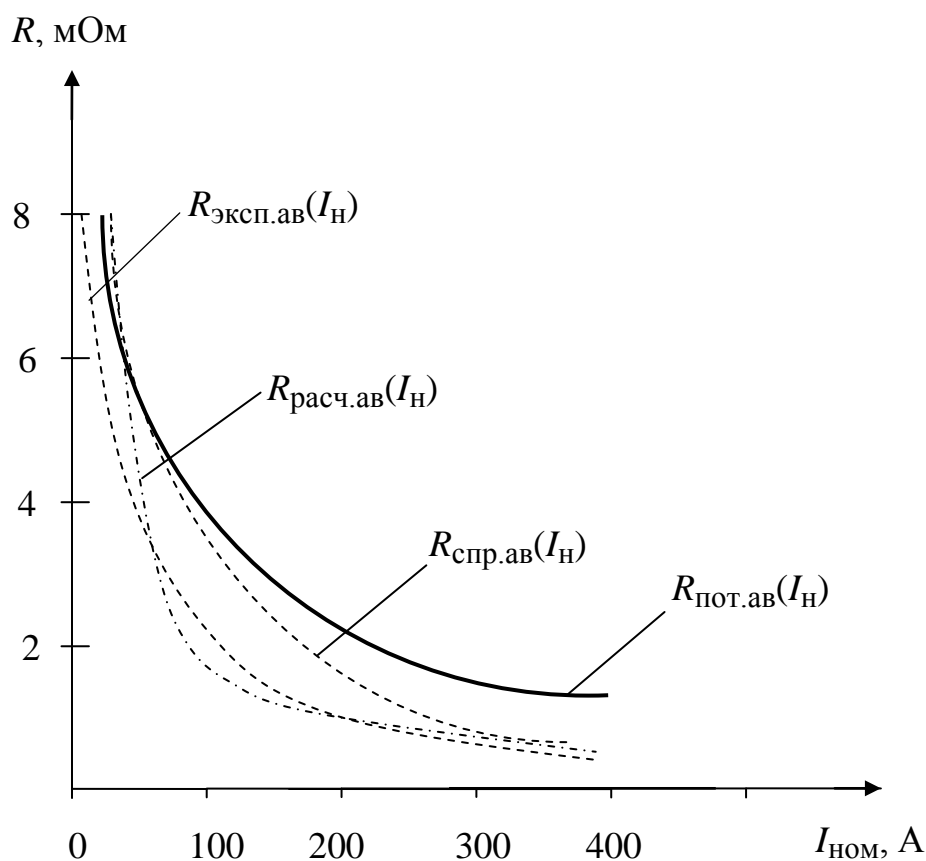


Рис. 3.17. Графики зависимостей сопротивлений контактных соединений от номинального тока для автоматических выключателей серии ВА

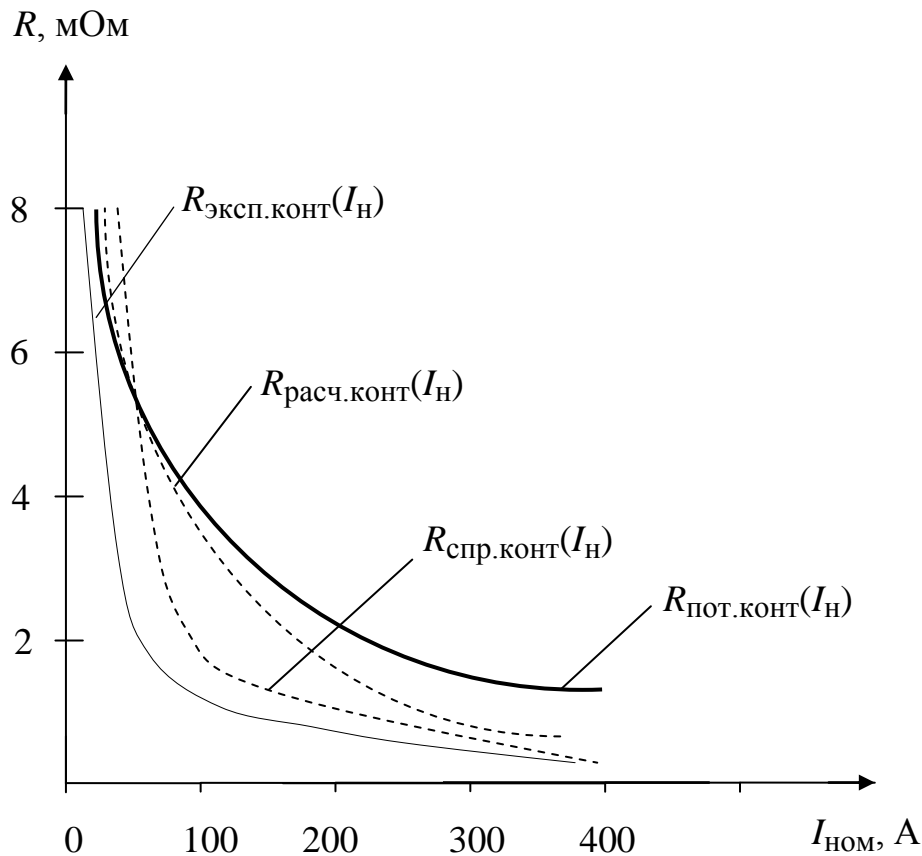


Рис. 3.18. Графики зависимостей сопротивлений контактных соединений от номинального тока для контакторов КТИ

Как показали исследования, зависимость $R_{\text{пот.ав}}(I_n)$ на отрезке с номинальным током $I_n = 1 \div 400$ А наиболее точно описывается аппроксимирующей функцией $R_{\text{пот.ав}}(I_n) = 9,219 \cdot e^{-0,018I_n}$, а зависимость $R_{\text{пот.конт}}(I_n)$ на отрезке с номинальным током $I_n = 1 \div 400$ А – аппроксимирующей функцией $R_{\text{пот.конт}}(I_n) = 10,628 \cdot e^{-0,051I_n}$ (табл. 3.3) для автоматических выключателей серии ВА.

Кривые $R_{\text{эксп.ав}}(I_n)$ на рис. 3.17 и $R_{\text{эксп.конт}}(I_n)$ на рис. 3.18 представляют собой экспериментально найденные аналитические зависимости сопротивлений автоматических выключателей и контакторов от номинального тока [247]:

$$I_n < 60 \text{ А, тогда } R = \frac{349}{I_n}; I_n \geq 60 \text{ А, тогда } R = \frac{307}{I_n},$$

а кривая $R_{\text{эксп.мп}}(I_{\text{н}})$ на рис. 3.19 иллюстрирует аналитические зависимости сопротивлений магнитных пускателей от номинального тока [247]:

$$I_{\text{н}} < 70 \text{ А, тогда } R = \frac{825}{I_{\text{н}}}; I_{\text{н}} \geq 70 \text{ А, тогда } R = \frac{760}{I_{\text{н}}}.$$

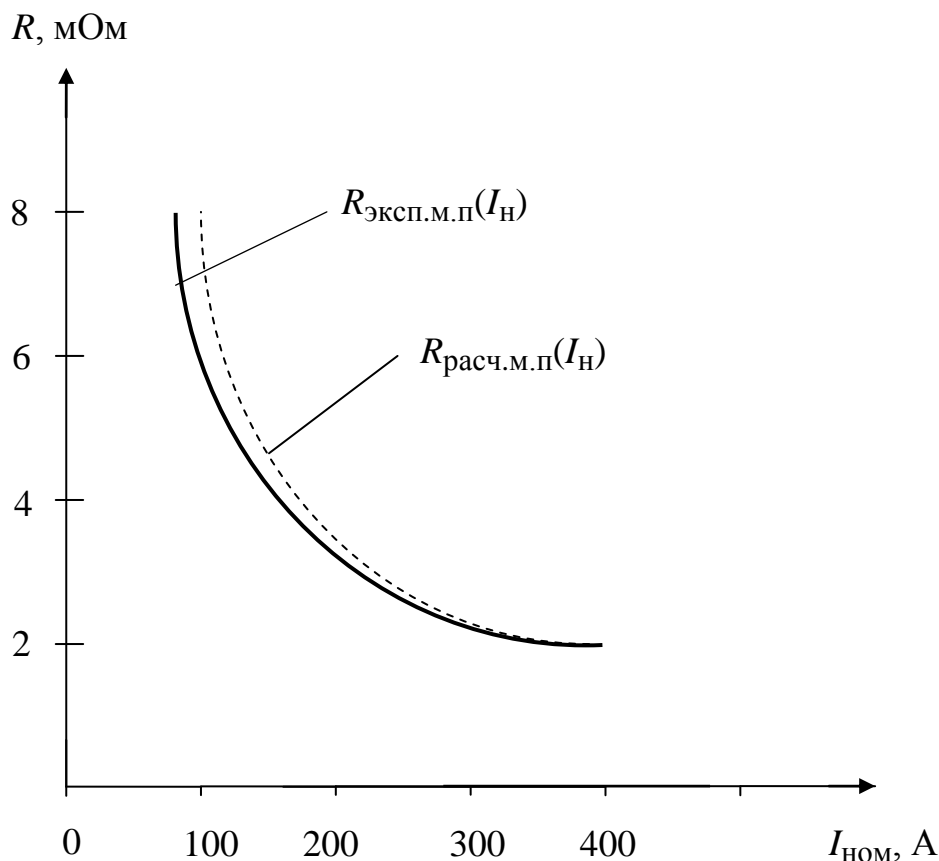


Рис. 3.19. Графики зависимостей сопротивлений контактных соединений от номинального тока для магнитных пускателей серии ПМЛ

Далее определим сопротивления контактных соединений и температуры контактных площадок аппаратов расчетным методом [16].

Используя данные размеров контактов аппаратов определим сопротивление контактных соединений в зависимости от номинального тока и коэффициента загрузки:

$$R_{\text{к}} = \frac{2\sqrt{\lambda F k_{\text{T}} S}}{I^2} \cdot \left(\theta_{\text{к}} - \frac{I^2 \rho (1 + \alpha v_{\text{к}})}{k_{\text{T}} F S} \right), \quad (3.8)$$

где λ – теплопроводность материала контакта, для меди $\lambda = 390$ Вт/(м · К); F – охлаждающая поверхность единицы длины проводника, м² ($F = 2(a + b) \cdot 10^{-3}$ при прямоугольном сечении; $F = 2\pi r \cdot 10^{-3}$ при цилиндрической поверхности); k_T – коэффициент теплоотдачи, для меди $k_T = 16$ Вт/(м² · К); S – площадь поперечного сечения контактов, м² ($S = a \cdot b$ для прямоугольного сечения; $S = \pi r^2$ для цилиндрической поверхности); I – ток через контакты, А ($I = K_3 \cdot I_{\text{ном}}$, где K_3 – коэффициент загрузки $K_3 = 0,7$); υ_K – температура контактных площадок, °С; θ_K – допустимый перепад температуры контакта относительно температуры окружающей среды, $\theta_K = 45$ °С; ρ – удельное электрическое сопротивление, для меди $\rho = 1,72 \cdot 10^{-8}$ Ом/м²; α – температурный коэффициент сопротивления, $\alpha = 0,0043$.

Температура контактных площадок

$$\upsilon_K = \frac{I^2 \cdot \rho + \upsilon_0 \cdot k_T \cdot F \cdot S}{k_T \cdot S \cdot F - I^2 \cdot \rho \cdot \alpha}, \quad (3.9)$$

где υ_0 – температура окружающей среды, $\upsilon_0 = 35$ °С.

Результаты расчетов и виды аппроксимирующих функций представлены в табл. 3.3 и 3.4.

По расчетным данным сопротивлений автоматических выключателей, контакторов и магнитных пускателей (табл. 3.4) построим график зависимости сопротивления контактных площадок от номинального тока – кривые $R_{\text{расч}}(I_N)$ на рис. 3.17, 3.18 и 3.19 соответственно.

По результатам исследований величин сопротивлений контактов автоматических выключателей и контакторов [118] построим их зависимости от номинального тока – кривая $R_{\text{спр.ав}}(I_N)$ (рис. 3.17) для автоматических выключателей серии ВА и кривая $R_{\text{спр.конт}}(I_N)$ (рис. 3.18) для контакторов серии

КТИ. Аппроксимирующие функции: для автоматических выключателей на отрезке с $I_H = 0 \div 400$ А – $R_{\text{спр.ав}}(I_H) = 28,39 \cdot e^{-0,03I_H}$; для контакторов: на отрезке с $I_H = 0 \div 200$ А – $R_{\text{спр.конт}}(I_H) = 10,439 \cdot e^{-0,00756I_H}$; на отрезке с $I_H = 200 \div 400$ А – $R_{\text{спр.конт}}(I_H) = 1,067 \cdot e^{-0,00693I_H}$.

Таблица 3.3

Аппроксимирующие функции зависимостей сопротивлений контактов
от номинального тока

Аппараты	Номинальный ток I_H , А	Аппроксимирующая функция
Автоматические выключатели серии ВА	1 ÷ 80	$R_{\text{расч.ав}}(I_H) = 85,007 \cdot e^{-0,049I_H}$
	80 ÷ 400	$R_{\text{расч.ав}}(I_H) = 3,248 \cdot e^{-0,006I_H}$
	1 ÷ 400	$R_{\text{пот.ав}}(I_H) = 9,219 \cdot e^{-0,018I_H}$
	1 ÷ 400	$R_{\text{спр.ав}}(I_H) = 28,39 \cdot e^{-0,03I_H}$
Контакторы серии КТИ	1 ÷ 400	$R_{\text{расч.конт}}(I_H) = 9,486 \cdot e^{-0,013I_H}$
	1 ÷ 400	$R_{\text{пот.конт}}(I_H) = 10,628 \cdot e^{-0,051I_H}$
	1 ÷ 200	$R_{\text{спр.конт}}(I_H) = 10,439 \cdot e^{-0,00756I_H}$
	200 ÷ 400	$R_{\text{спр.конт}}(I_H) = 1,067 \cdot e^{-0,00693I_H}$
Магнитные пускатели серии ПМЛ	1 ÷ 400	$R_{\text{расч.м.п}}(I_H) = 16,531 \cdot e^{-0,0092I_H}$

Результаты расчета технических характеристик контактов автоматических выключателей, контакторов и магнитных пускателей

Аппарат	Номинальный ток I_N , А	Размеры контактов, мм	Температура контактных площадок ν_K , °С	Сопротивление контактных соединений, R_K , мОм
Автоматический выключатель ВА-57-35	16	$a = 4,$ $b = 6$	40,3	39
Автоматический выключатель ВА-57-35	80	$a = 4,$ $b = 8$	45,2	1,755
Автоматический выключатель ВА-57-39	400	$a = 9,5,$ $b = 9$	75,2	0,349
Контактор КТИ 5265	250	$a = 20,$ $b = 10$	43,3	0,746
Контактор КТИ 6400	400	$a = 20,$ $b = 17$	44	0,414
Магнитный пускатель ПМЕ 211	25	$r = 4$	40,3	26
Магнитный пускатель ПА 312	40	$a = 8,1,$ $b = 8,1$	40,5	13
Магнитный пускатель ПА 14	60	$a = 12,$ $b = 12$	40,3	11

Для оценки точности аппроксимирующих функций, описывающих зависимости сопротивлений контактных соединений низковольтных аппаратов различными методами (табл. 3.3), произведем расчет среднеквадратического отклонения аппроксимирующих функций от экспериментальных значений по выражению [19]

$$S = \sqrt{\sum (f(I) - R_{\text{эксп}})^2},$$

где $f(I)$ – значения аппроксимирующих функции при фиксированном номинальном токе, $R_{\text{эксп}}$ – аналитическое значение сопротивления контактных соединений по экспериментальным данным [247].

Результаты расчетов представлены в табл. 3.5.

Таблица 3.5

Оценка точности аппроксимирующих функций

Аппараты	Вид зависимости	Среднеквадратическое отклонение S
Автоматические выключатели	Расчетная $R_{\text{расч}}(I_{\text{н}})$	1,997
	Справочная $R_{\text{спр}}(I_{\text{н}})$	1,215
	По потерям мощности $R_{\text{пот}}(I_{\text{н}})$	3,323
Контакторы	Расчетная $R_{\text{расч}}(I_{\text{н}})$	1,787
	Справочная $R_{\text{спр}}(I_{\text{н}})$	2,168
	По потерям мощности $R_{\text{пот}}(I_{\text{н}})$	5,608
Магнитные пускатели	Расчетная $R_{\text{расч}}(I_{\text{н}})$	0,565

Таким образом для автоматических выключателей с $I_H > 50$ А наиболее точными являются расчетный метод определения сопротивления контактных соединений и метод по потерям мощности на полюс. Для автоматов с $I_H < 50$ А наименьшими расхождениями аппроксимирующей функции от аналитической зависимости [247] обладает метод определения сопротивления контактов по справочным данным.

Для контакторов с $I_H < 50$ А и $I_H = 140 \div 300$ А наиболее точным является расчетный метод, для $50 \text{ А} < I_H < 140 \text{ А}$ наименьшими расхождениями с экспериментальными зависимостями обладает метод определения сопротивления контактов по справочным данным, для $I_H > 300$ А – метод по потерям мощности на полюс.

Для магнитных пускателей характерно наибольшее совпадение экспериментальных и расчетных оценок сопротивлений контактных соединений на всем диапазоне номинальных токов.

Таким образом, в результате исследований определена возможная точность и область применения некоторых методов оценки сопротивлений контактных соединений низковольтных аппаратов в зависимости от имеющейся исходной информации.

Как показали наши многочисленные исследования [36; 49; 52; 53; 61–67; 244–248], низковольтные сети внутризаводского электроснабжения характеризуются при относительно небольшой протяженности линий большим числом последовательно соединенных участков с установленными коммутационными аппаратами. При этом, как указывалось выше, сопротивление аппаратов соизмеримо с сопротивлением линий (табл. П.Б.1 и П.Б.2 Приложения Б, где показано, что число аппаратов на линии достигает 3–8 на Казанском объединении «ОАО Казаньоргсинтез»), что требует учета этого фактора и детального рассмотрения при оценке потерь ЭЭ во внутризаводских низковольтных сетях.

3.3.2. Сравнительное исследование сопротивлений главной цепи коммутационных низковольтных аппаратов российских и зарубежных производителей

Измерение сопротивлений, как указывалось выше, осуществляется чаще всего методом амперметра – вольтметра на постоянном токе. Преимуществом этого метода является возможность проведения измерений при прохождении через измеряемые сопротивления рабочих токов и превышающие рабочие значения токов.

Результаты экспериментальных исследований [244, 247] значений сопротивлений контактных соединений автоматических выключателей в зависимости от номинального тока представлены на рис. 3.20. Определим закон распределения этих значений.

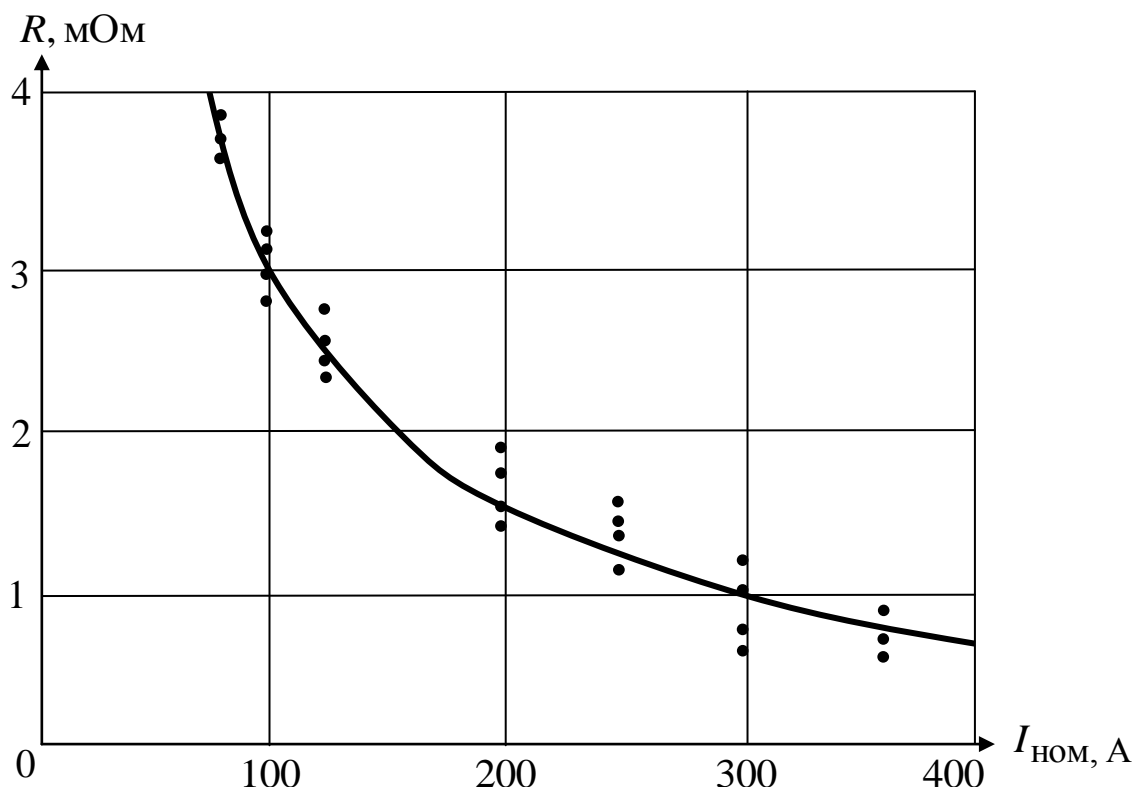


Рис. 3.20. Зависимости сопротивления контактных систем автоматических выключателей ИЕК от номинального тока

На основании экспериментальных данных сопротивлений контактов автоматических выключателей с номинальными токами $I_H = 50$ А и $I_H = 200$ А строится гистограмма статистического распределения плотности значений сопротивлений в виде столбцов (рис. 3.21 и 3.22). Средняя плотность распределения $f_i^*(y)$ находится по выражению

$$f_i^*(y) = \frac{m_i}{n\Delta y},$$

где m_i – частота, равная числу результатов измерений, n – общее количество измерений, Δy – интервал между не сгруппированными данными.

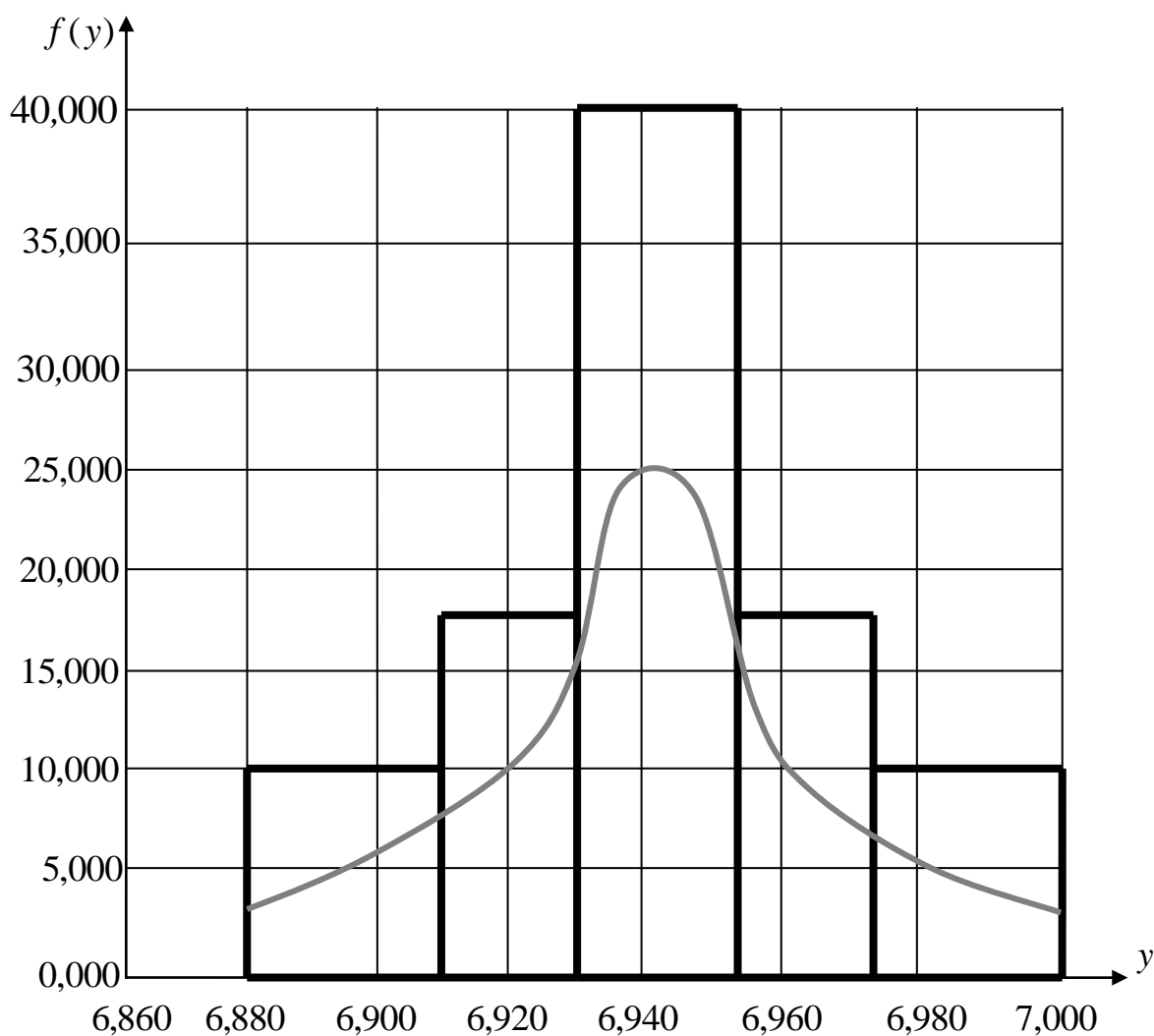


Рис. 3.21. Аппроксимация плотности распределения значений сопротивления контактных соединений автоматического выключателя с $I_H = 50$ А

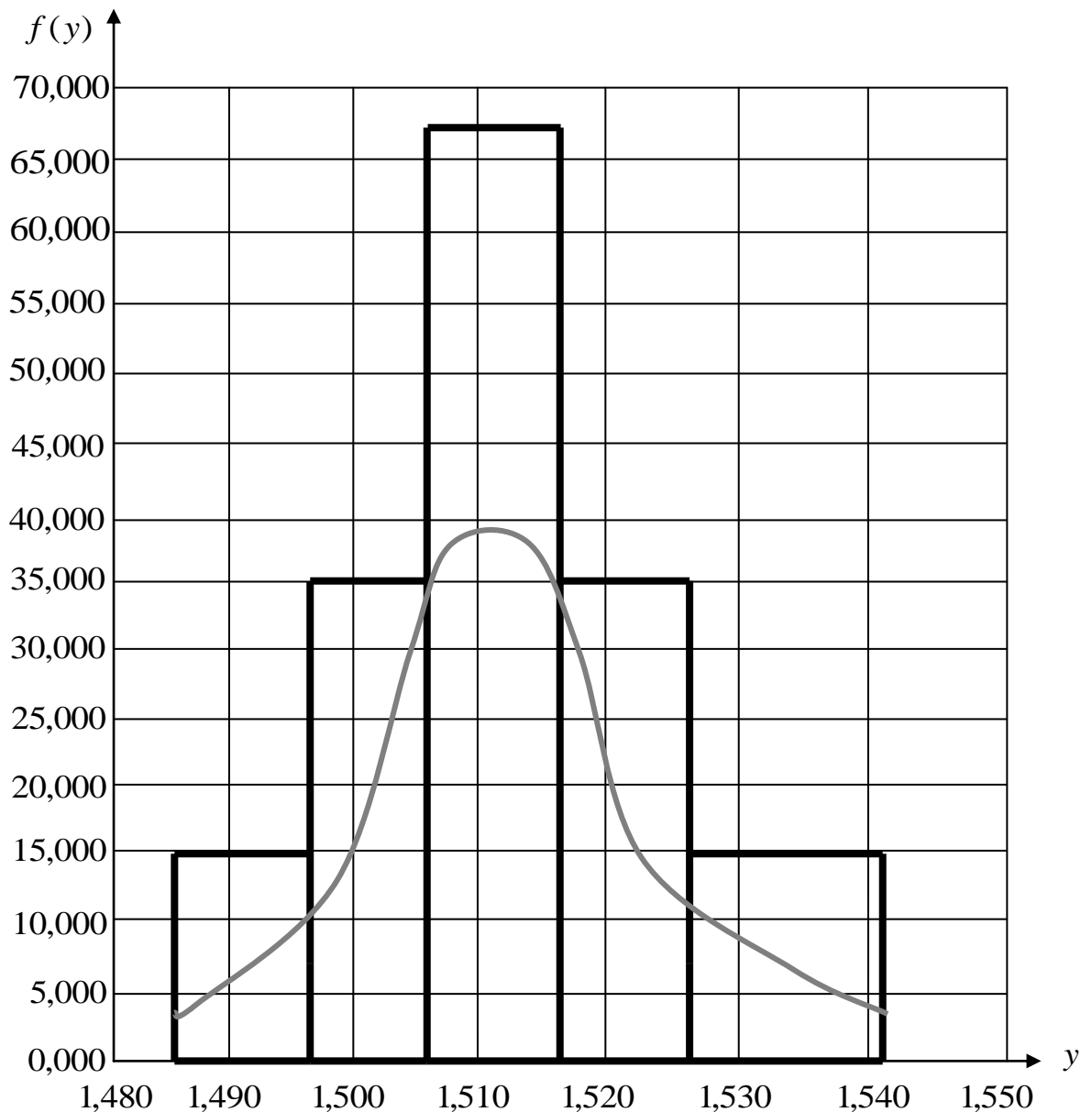


Рис. 3.22. Аппроксимация плотности распределения значений сопротивления контактных соединений автоматического выключателя с $I_H = 200$ А

Предположим, что в нашем случае случайная величина (плотность распределения сопротивления контактных систем автоматического выключателя) распределяется по закону нормального распределения, т. е. соответствует условию

$$f(y) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(y-m)^2}{2\sigma^2}}, \quad (3.10)$$

где $f(y)$ – плотность распределения сопротивления; y – значения сопротивления контактов; m и σ – параметры распределения.

Параметр $m = M_y$ представляет собой среднее значение случайной величины y , оцениваемое по формуле

$$M_y = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i, \quad (3.11)$$

параметр σ – среднее квадратическое отклонение случайной величины y , оцениваемое по формуле

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - M_y)^2}. \quad (3.12)$$

Нормальное распределение задается значениями квантилей u_p , по которым определяется вероятность заданного значения случайной величины y :

$$y = M_y + u_p \sigma.$$

Процедура проверки гипотезы о том, что данное статистическое распределение является нормальным распределением, оценивается критерием согласия χ^2 . Проверка нормальности распределения согласно критерию χ^2 сводится к следующему.

Данные наблюдений группируют по интервалам, как при построении гистограммы, и подсчитывают частоты p_i . Если в некоторые интервалы попадает меньше пяти наблюдений, то такие интервалы объединяют с соседними. При этом число степеней свободы k , конечно, уменьшается.

Определяется мера расхождения

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(\Delta n_i - N p_i)^2}{N p_i}, \quad (3.13)$$

где k – число интервалов статистического ряда; p_i – вероятность попадания случайной величины в i -й интервал, вычисленная для теоретического распределения; N – число испытаний, Δn_i – интервал сгруппированных измерений.

Распределение χ^2 зависит от числа степеней свободы: $s = k - z - 1$, где z – число вычисляемых параметров распределения. По таблицам, приводимым в литературе по теории вероятностей и математической статистике [32], для каждого значения χ^2 и s можно найти вероятность того, что за счет случайных причин мера расхождения теоретического и экспериментального распределений будет не меньше, чем фактическое значение χ^2 . Если $P_S > 0,1$, то обычно считают, что теоретическое распределение не противоречит экспериментальным данным.

Вычисляем значения теоретической кривой по формуле

$$F(y) = \Phi\left(\frac{y - M_y}{\sigma}\right). \quad (3.14)$$

Последовательно определяем промежуточные величины, необходимые для получения χ^2 (табл. 3.6). При этом величины p_i берутся равными приращению функции распределения $F(y)$ на i -м участке.

Таблица 3.6

Результаты расчета промежуточных величин

$F(y)$	p_i	Np_i	$(\Delta n_i - Np_i)^2$	$(\Delta n_i - Np_i)^2 / Np_i$
6,880	0,025	0,25	0,38	0,1645
6,924	0,078	0,78	0,25	2,4336
6,944	0,089	0,89	0,11	7,2009
6,960	0,067	0,67	0,29	1,5479
6,990	0,042	0,42	0,34	0,5188

Подставляя вычисленные значения из табл. 3.6 в формулу

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^5 \frac{(\Delta n_i - N p_i)^2}{N p_i}, \text{ определяем: } \chi^2 = 11,86.$$

По заданному уровню значимости $\varepsilon = 0,01$ по таблице «Критические значения $\chi^2(r, q)$ распределения χ^2 » [20] находится $\chi^2(N-1, \varepsilon) = \chi^2(4, 0.01) = 18,3$. Сопоставление $\chi^2 > \chi^2(4, 0.01)$ позволяет заключить, что гипотеза о том, что выборочные данные соответствуют нормальному закону распределения, подтверждена.

Определим минимальный объем выборки аппаратов для исследования закона распределения сопротивления контактов на примере автоматического выключателя с $I_{\text{НОМ}} = 50$ А.

Минимальный объем выборки, достаточный для определения математического ожидания сопротивления контактов с заданной точностью Δ , %, и достоверностью P , определяют по выражению

$$\omega = \left(\frac{t \gamma_x \cdot 100}{\Delta} \right)^2, \quad (3.15)$$

где t – параметр, зависящий от желаемого значения P (при $P = 0,95$, $t = 2$); γ_x – коэффициент вариации величины X , определяемый по формуле

$$\gamma_x = \sigma_x / m_x. \quad (3.16)$$

Проверим достоверность результатов исследования сопротивления контактных соединений по минимальному объему выборки, чтобы с вероятностью 0,95 погрешность не превышала 5 %.

В этом случае математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение сопротивления будут принимать значения (рис. 3.21):

$$M[\Delta R] = 6,93 \text{ мОм}; \quad \sigma[\Delta R] = 1,19 \text{ мОм},$$

откуда $\gamma[\Delta R] = 0,17$.

Определяем объем выборки, необходимый для обеспечения погрешности 5 %:

$$\omega = \left(\frac{2 \cdot 0,17 \cdot 100}{5} \right)^2 = 46.$$

Следовательно, минимальный объем выборки необходимый для показателей достоверности $P = 0,95$ составляет 46 экспериментальных значений, рассмотренное же количество экспериментов составляет более 50.

Используя программу Excel, построим график функции нормального распределения случайной величины (сопротивлений контактов автоматических выключателей с номинальными токами $I_H = 50$ А и $I_H = 200$ А) (рис. 3.23, 3,24).

Для этого воспользуемся статистическим параметром НОРМРАСП (x ; среднее; стандартное откл.; интегральная), где: x – значения выборки, для которых строится распределение; среднее – среднее арифметическое выборки; стандартное откл. – стандартное отклонение распределения; интегральный – логическое значение, определяющее форму функции. Если интегральная имеет значение ИСТИНА(1), то функция НОРМРАСП возвращает интегральную функцию распределения; если этот аргумент имеет значение ЛОЖЬ (0), то вычисляет значение функция плотности распределения.

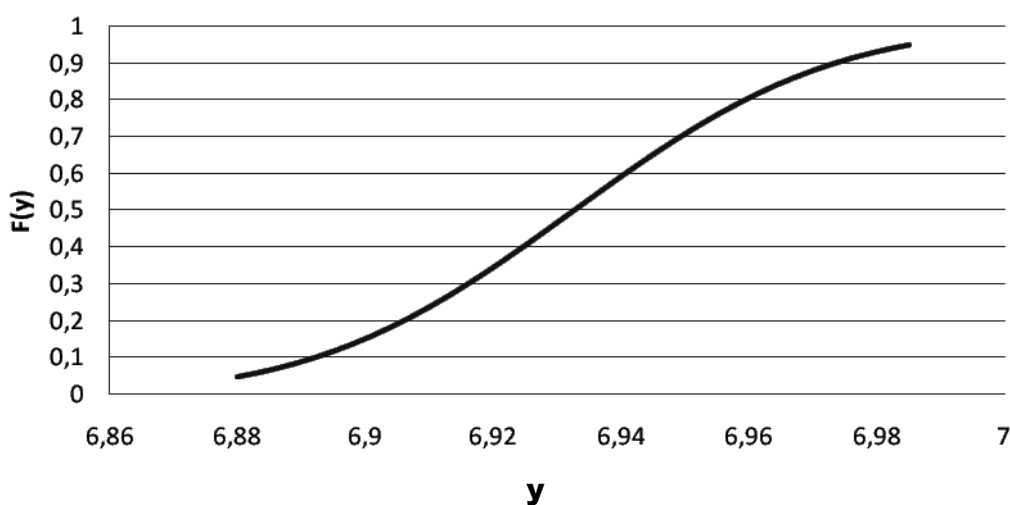


Рис. 3.23. Функция распределения значений сопротивления контактных соединений автоматического выключателя с $I_H = 50$ А

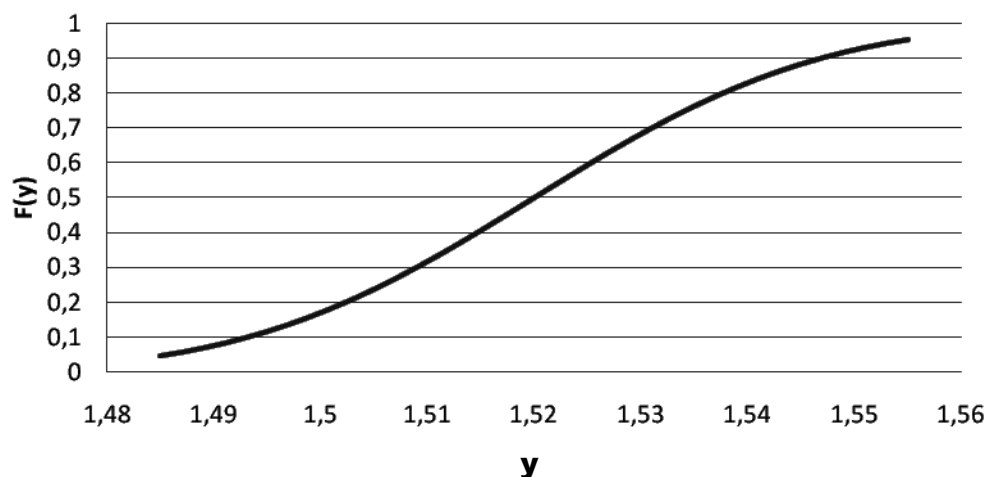


Рис. 3.24. Функция распределения значений сопротивления контактных соединений автоматического выключателя с $I_H = 200$ А

Аналогичные исследования проведены для других типов низковольтных аппаратов на различные номинальные токи с определением минимального числа выборки, подтверждающие соответствие сопротивления контактов нормальному закону распределения.

Сопротивление контактов автоматических выключателей при аппроксимации в программе Mathcad кривой зависимости сопротивления от номинального тока, построенной по экспериментальным значениям, определяется:

$$R(I) = \begin{cases} 6,189 \cdot e^{-0,009 \cdot I}, & I \geq 60 \\ 70,354 \cdot e^{-0,092 \cdot I}, & I < 60 \end{cases} \quad (3.17)$$

Полученные экспериментальные сопротивления контактов автоматических выключателей отечественного и зарубежного производства представлены на рис. 3.25.

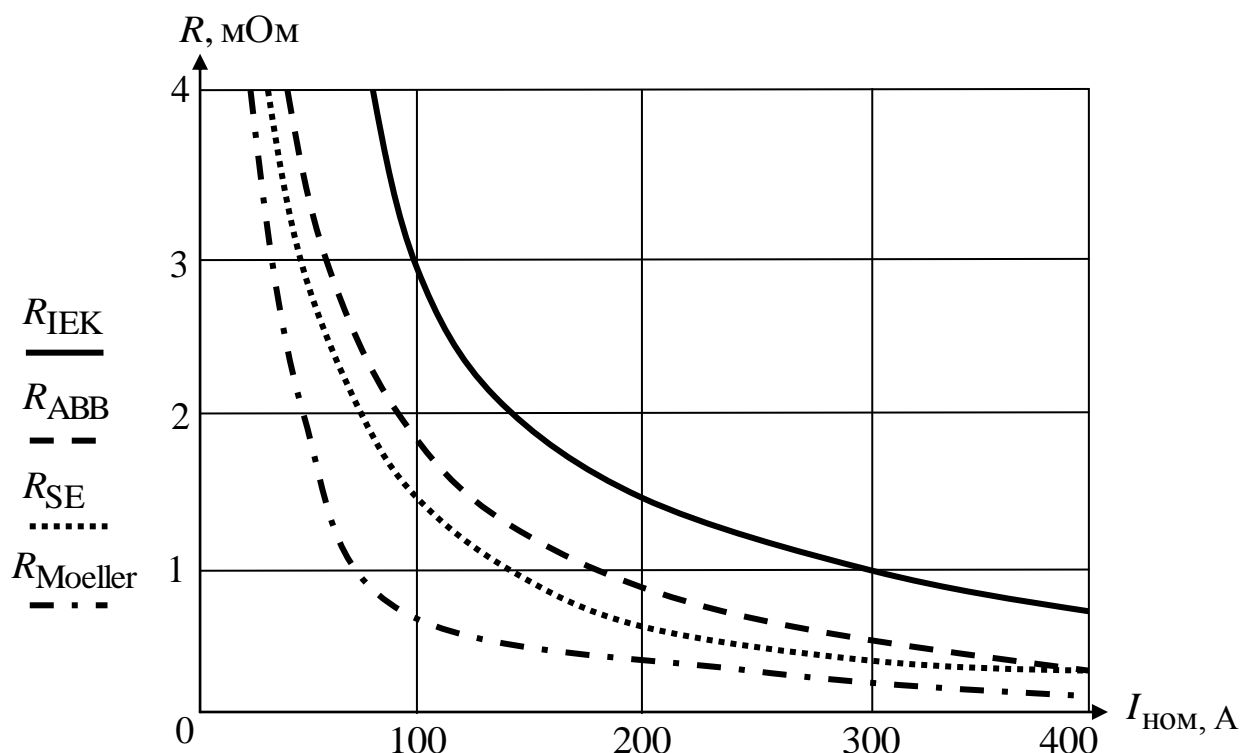


Рис. 3.25. Зависимость сопротивления контактов автоматических выключателей различных фирм от номинального тока

Для автоматических выключателей некоторых отечественных и зарубежных производителей аппроксимирующие выражения примут вид:

$$\text{– IEK:} \quad R(I) = \begin{cases} 6,189 \cdot e^{-0,009 \cdot I}, & I \geq 60 \\ 70,354 \cdot e^{-0,092 \cdot I}, & I < 60 \end{cases}; \quad (3.18)$$

$$\text{– ABB:} \quad R(I) = \begin{cases} 5,234 \cdot e^{-0,008 \cdot I}, & I \geq 60 \\ 60,175 \cdot e^{-0,085 \cdot I}, & I < 60 \end{cases}; \quad (3.19)$$

$$\text{– Schneider Electric:} \quad R(I) = \begin{cases} 5,102 \cdot e^{-0,008 \cdot I}, & I \geq 60 \\ 58,203 \cdot e^{-0,08 \cdot I}, & I < 60 \end{cases}; \quad (3.20)$$

$$\text{– Moeller:} \quad R(I) = \begin{cases} 4,846 \cdot e^{-0,008 \cdot I}, & I \geq 60 \\ 50,125 \cdot e^{-0,07 \cdot I}, & I < 60 \end{cases}. \quad (3.21)$$

Результаты экспериментальных исследований сопротивлений контактов автоматических выключателей показывают, что аппараты фирмы Moeller имеют меньшие значения сопротивлений в отличие от фирм других производителей. При этом материалом контактов всех производителей служит медь. Меньшее значение сопротивления аппарата, обеспечивается за счет конструкции, наличия покрытия, обработки поверхности и контактного нажатия.

Для магнитных пускателей результаты экспериментальных исследований [244, 247] значений сопротивлений контактных соединений в зависимости от номинального тока представлены на рис. 3.26.

При аппроксимации в программе Mathcad кривой зависимости сопротивления контактных соединений магнитных пускателей от номинального тока, построенной по экспериментальным значениям, имеем:

$$R(I) = \begin{cases} 20,827 \cdot e^{-0,01 \cdot I} + 0,006 \cdot I, & I \geq 70, \\ 57,953 \cdot e^{-0,02 \cdot I} - 0,105 \cdot I, & I < 70. \end{cases} \quad (3.22)$$

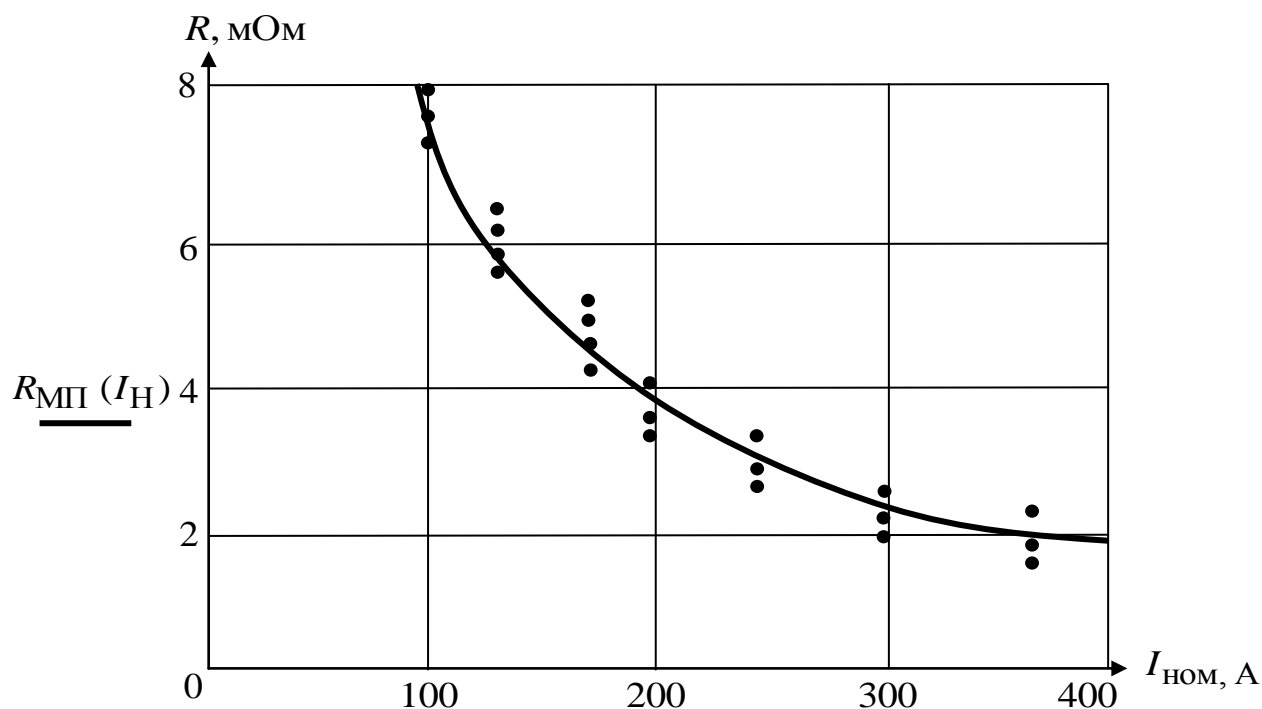


Рис. 3.26. Зависимости сопротивления контактных систем магнитных пускателей IEK от номинального тока

Экспериментальные данные для магнитных пускателей некоторых фирм-производителей представлены на рис. 3.27.

Для магнитных пускателей некоторых фирм-производителей аппроксимирующие выражения примут вид:

$$- \text{IEK:} \quad R(I) = \begin{cases} 20,827 \cdot e^{-0,01 \cdot I} + 0,006 \cdot I, & I \geq 70 \\ 57,953 \cdot e^{-0,02 \cdot I} - 0,105 \cdot I, & I < 70 \end{cases}; \quad (3.23)$$

$$- \text{ABB:} \quad R(I) = \begin{cases} 15,456 \cdot e^{-0,01 \cdot I}, & I \geq 70 \\ 50,845 \cdot e^{-0,02 \cdot I}, & I < 70 \end{cases}; \quad (3.24)$$

$$- \text{Schneider Electric:} \quad R(I) = \begin{cases} 18,365 \cdot e^{-0,01 \cdot I}, & I \geq 70 \\ 53,124 \cdot e^{-0,02 \cdot I}, & I < 70 \end{cases}; \quad (3.25)$$

$$- \text{Moeller:} \quad R(I) = \begin{cases} 23,258 \cdot e^{-0,01 \cdot I}, & I \geq 70 \\ 62,894 \cdot e^{-0,02 \cdot I}, & I < 70 \end{cases}. \quad (3.26)$$

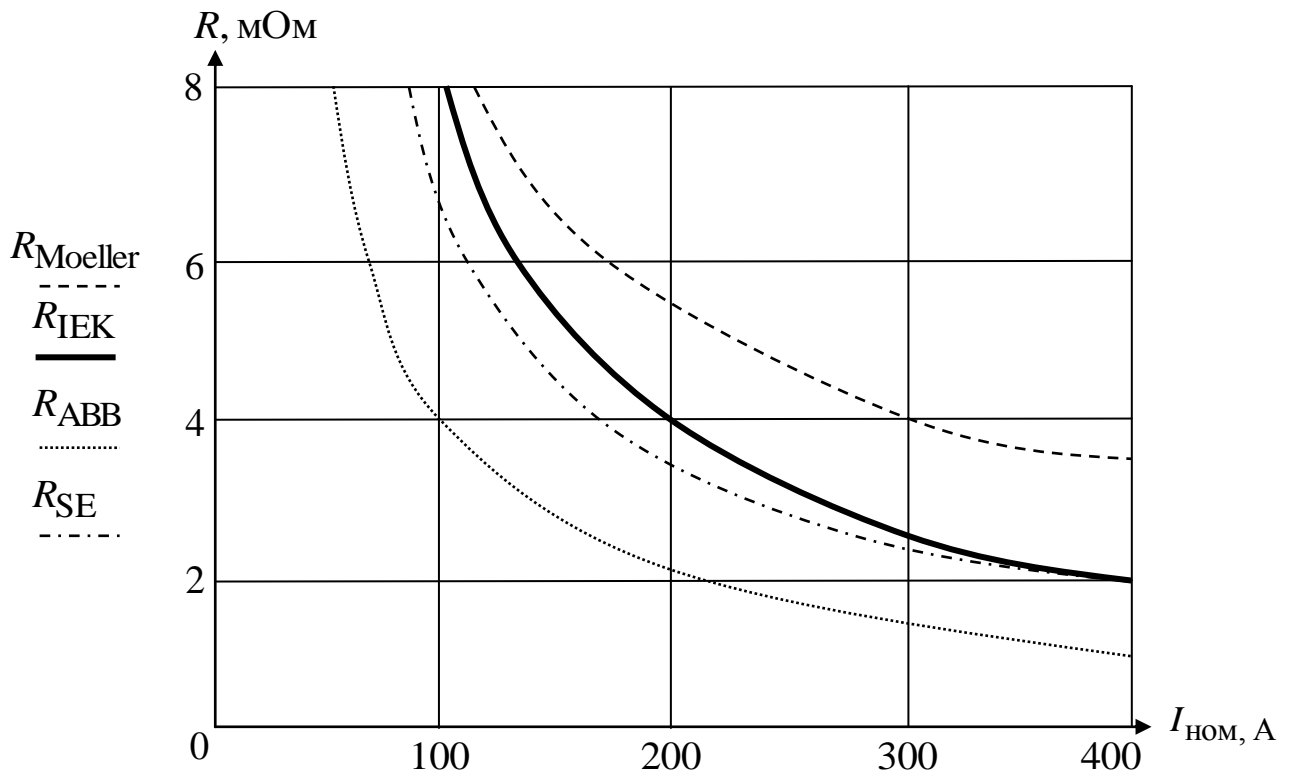


Рис. 3.27. Зависимость сопротивления контактов магнитных пускателей от номинального тока

Результаты экспериментальных исследований показывают, что сопротивления контактов магнитных пускателей фирм Moeller имеют наибольшие, а фирмы АВВ – наименьшие значения. Сопротивления магнитных пускателей фирм IEK и SE имеют приблизительно равные значения.

Экспериментальные данные для рубильников различных фирм-производителей представлены на рис. 3.28.

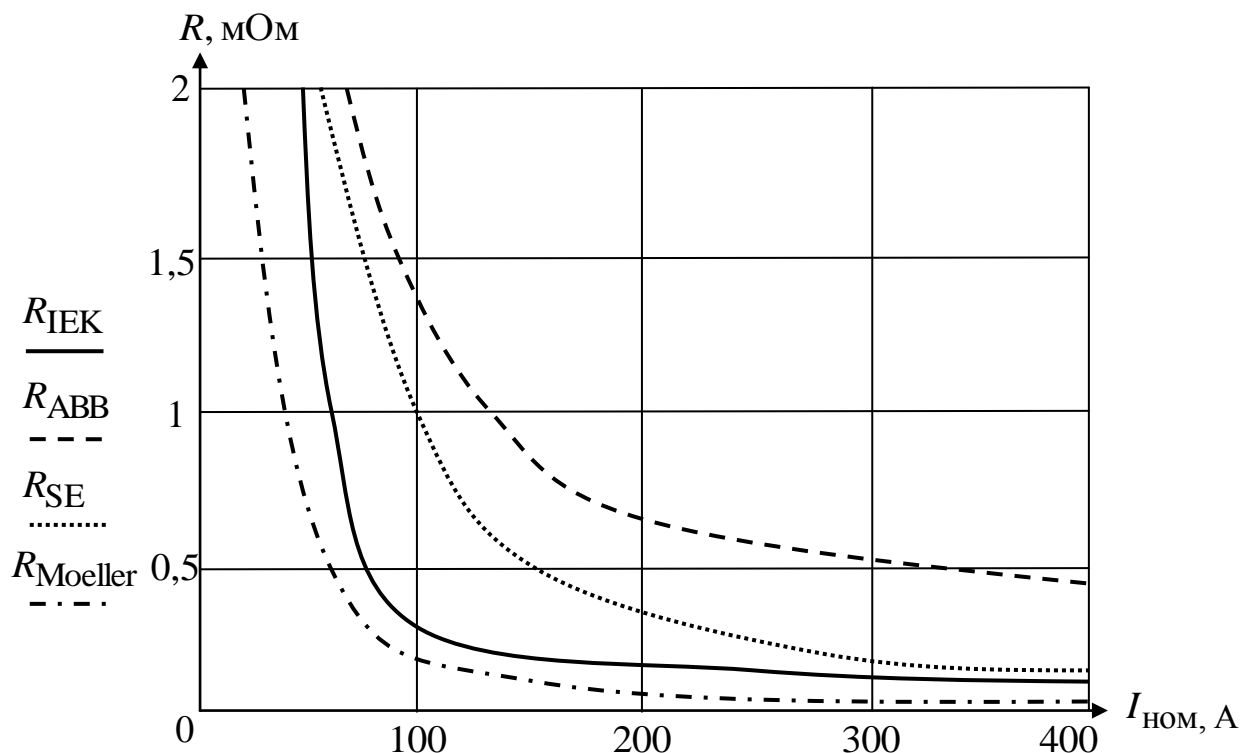


Рис. 3.28. Зависимость сопротивления контактов рубильников от номинального тока

Зависимости сопротивления от номинального тока, построенные по экспериментальным значениям, определяются:

– IEK: $R(I) = 10,621 \cdot e^{-0,053 \cdot I};$ (3.27)

– АВВ: $R(I) = 14,354 \cdot e^{-0,05 \cdot I};$ (3.28)

– Schneider Electric: $R(I) = 10,895 \cdot e^{-0,05 \cdot I};$ (3.29)

– Moeller:
$$R(I) = 9,765 \cdot e^{-0,05 \cdot I}. \quad (3.30)$$

Результаты экспериментальных исследований показывают, что наибольшие значения сопротивлений контактов имеют рубильники фирмы АВВ, а наименьшие – рубильники фирм ИЕК и Moeller.

В табл. 3.7 представлены аналитические зависимости для определения сопротивлений контактных соединений некоторых типов низковольтных аппаратов.

Таблица 3.7

Аналитические зависимости сопротивлений контактных соединений российских и зарубежных низковольтных аппаратов некоторых фирм-производителей

Низковольтный аппарат	Фирма производитель	Выражения для определения сопротивления
1	2	3
Автоматический выключатель	ИЕК	$R(I) = \begin{cases} 6,189 \cdot e^{-0,009 \cdot I}, & I \geq 60 \\ 70,354 \cdot e^{-0,092 \cdot I}, & I < 60 \end{cases}$
	АВВ	$R(I) = \begin{cases} 5,234 \cdot e^{-0,008 \cdot I}, & I \geq 60 \\ 60,175 \cdot e^{-0,085 \cdot I}, & I < 60 \end{cases}$
	Schneider Electric	$R(I) = \begin{cases} 5,102 \cdot e^{-0,008 \cdot I}, & I \geq 60 \\ 58,203 \cdot e^{-0,08 \cdot I}, & I < 60 \end{cases}$
	Moeller	$R(I) = \begin{cases} 4,846 \cdot e^{-0,008 \cdot I}, & I \geq 60 \\ 50,125 \cdot e^{-0,07 \cdot I}, & I < 60 \end{cases}$

1	2	3
Магнитный пускатель	IEK	$R(I) = \begin{cases} 20,827 \cdot e^{-0,01 \cdot I} + 0,006 \cdot I, & I \geq 70 \\ 57,953 \cdot e^{-0,02 \cdot I} - 0,105 \cdot I, & I < 70 \end{cases}$
	ABB	$R(I) = \begin{cases} 15,456 \cdot e^{-0,01 \cdot I}, & I \geq 70 \\ 50,845 \cdot e^{-0,02 \cdot I}, & I < 70 \end{cases}$
	Schneider Electric	$R(I) = \begin{cases} 18,365 \cdot e^{-0,01 \cdot I}, & I \geq 70 \\ 53,124 \cdot e^{-0,02 \cdot I}, & I < 70 \end{cases}$
	Moeller	$R(I) = \begin{cases} 23,258 \cdot e^{-0,01 \cdot I}, & I \geq 70 \\ 62,894 \cdot e^{-0,02 \cdot I}, & I < 70 \end{cases}$
Рубильник	IEK	$R(I) = 10,621 \cdot e^{-0,053 \cdot I}$
	ABB	$R(I) = 14,354 \cdot e^{-0,05 \cdot I}$
	Schneider Electric	$R(I) = 10,895 \cdot e^{-0,05 \cdot I}$
	Moeller	$R(I) = 9,765 \cdot e^{-0,05 \cdot I}$

Таким образом, по экспериментальным данным определены зависимости сопротивления контактных соединений от номинального тока для некоторых аппаратов различных фирм (IEK, ABB, Schneider Electric, Moeller).

3.4. Метод комплексной оценки эффективности функционирования контактных соединений низковольтных коммутационных аппаратов как элементов систем цехового электроснабжения

3.4.1. Критерий эффективности функционирования контактных соединений аппаратов, применяемых в системах цехового электроснабжения

В процессе эксплуатации оборудования систем цехового электроснабжения, одними из основных элементов которых служат коммутационные аппараты, в результате износа происходит переход с одного уровня работоспособности (функционирования) на другой, более низкий [122; 175; 202; 262], что подтверждается и в наших работах [35; 43].

Следует еще раз напомнить, что не все технические параметры серийных аппаратов приводятся в паспортных данных. В частности, не всегда указывается сопротивление их силовой цепи, сопротивления значительной части элементов электрических аппаратов.

Скорость износа контактов, при коммутации определяет уровень надежности работы аппаратов. Основными факторами, которые непосредственно определяют скорость износа контактов и, следовательно, возможность возникновения отказа являются:

- величина тока и напряжения;
- характер нагрузки (с увеличением индуктивности коммутационной цепи износ контактов увеличивается);
- материал контактов, в том числе их размеры, форма, однородность структуры;
- время и амплитуда вибрации контактов в момент замыкания, жесткость контактных пружин и др.

Все эти факторы функционально взаимосвязаны с тепловыми, электрическими и физико-техническими параметрами контактных материалов

[117], контактных и дугогасительных систем, что подтверждается и нашими исследованиями [45; 69; 221]. Анализ функциональных взаимосвязей указанных факторов и параметров, их систематизация дают возможность обосновать правомерность принятия некоторых критериев, определяющих показатели работоспособности контактных систем электрических аппаратов [34].

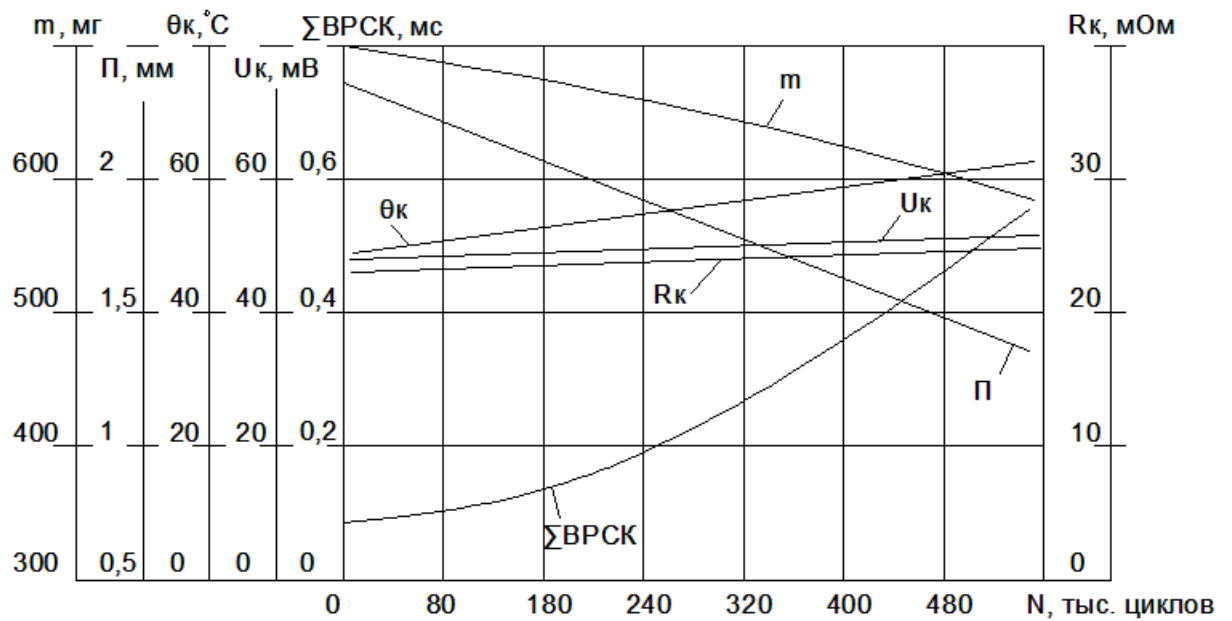
В качестве таких критериев могут быть представлены характерные зависимости изменений провала, суммарной высоты и массы контактов, сопротивления контактов от количества циклов (рис. 3.29) [78; 61].

В работах [77; 124; 160] предложены экспериментальные и аналитические методы расчета износа контактов для различных режимов их работы.

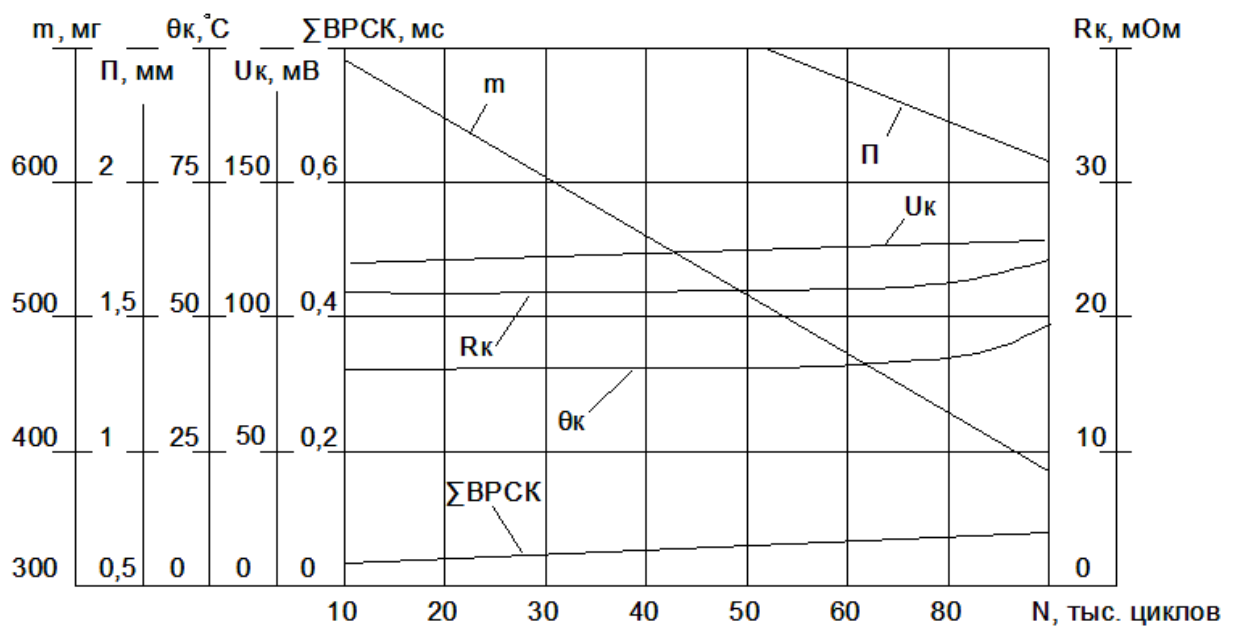
Опыт работы и эксплуатационные данные свидетельствуют о необходимости поиска путей и новых подходов оценки эффективности работы низковольтных аппаратов [62; 203; 207; 208; 227; 228].

Определяющим параметром, характеризующим вероятность безотказной работы, можно принять величину сопротивления контактов r .

В качестве критерия оценки работоспособности и технического состояния низковольтных аппаратов предлагается использовать сопротивление контактных соединений, что впервые опубликовано в ряде наших исследований [62; 222; 223; 227]. При этом определение количественных характеристик эффективности функционирования осуществляется методами теории вероятности и математической статистики [12; 73; 74; 81; 113]. Совокупность полученных количественных показателей позволяет определять фактический уровень надежности контактирования, а также расширяет возможности прогнозирования оценок работоспособности при проектировании, что также опубликовано в работах [56; 61; 204; 230].



a



б

Рис. 3.29. Динамика изменения параметров пускателей в ходе наработки в режимах АС-3 (*a*) и АС-4 (*б*):

m – изменение массы; Π – провал; θ_k – температура перегрева контактов;

U_k – падение напряжения на замкнутых контактах; $\sum \text{ВРСК}$ – суммарное

время разомкнутого состояния контактов; R_k – сопротивление

токопроводящего контура (расчетные данные)

В частности была исследована работоспособность контактов таких коммутационных аппаратов цеховых сетей, как:

- магнитные пускатели;
- контакторы;
- автоматические выключатели.

Работоспособность контактов предложено оценивать зависимостью сопротивлений контактных соединений аппаратов от числа переключений. Известно, что во время эксплуатации контакты изнашиваются. В результате износа начальное значение сопротивления контактов коммутационного аппарата R_0 увеличивается и достигает критического значения $R_{кр}$, при котором происходит отказ коммутационного аппарата.

Под отказом контакта наиболее часто понимается превышение контактным сопротивлением некоторого порогового значения. Согласно [78] в связи с тем, что в процессе исследований наблюдаются как полные отказы контактов, так и кратковременные на время только лишь одного переключения, за отказ контакта принято превышение сопротивлением контактов порогового значения. При этом для магнитных пускателей, автоматических выключателей и контакторов по результатам проведенных экспериментальных исследований для достижения критического значения сопротивления аппарата принимается в среднем трехкратное увеличение начального сопротивления:

$$R_{кр} = a \cdot R_0, \quad (3.31)$$

где a – коэффициент, зависящий от типа аппарата [223].

Начальное значение сопротивления контактов коммутационного аппарата R_0 вычисляется на основании выражений, представленных в табл. 3.8 [52].

Аналитические зависимости сопротивлений
коммутационных аппаратов от номинального тока

Тип аппарата	Пределы изменения номинального тока	Вид аналитической зависимости от номинального тока
Магнитные пускатели	$I_H < 70 \text{ А}$	$R = \frac{825}{I_H}$
	$I_H \geq 70 \text{ А}$	$R = \frac{760}{I_H}$
Автоматические выключатели и контакторы	$I_H < 60 \text{ А}$	$R = \frac{349}{I_H}$
	$I_H \geq 60 \text{ А}$	$R = \frac{307}{I_H}$

3.4.2. Метод оценки функциональных параметров низковольтных аппаратов

Как указывалось выше, сопротивление контактов можно рассматривать как случайную функцию количества коммутационных циклов $r(z)$ [62]:

$$r(z) = r_0 + \int_0^z v dz, \quad (3.32)$$

где r_0 – начальное значение сопротивления контактов коммутационного аппарата; v – скорость изменения сопротивления контактов.

Ниже представлена методика оценки функциональных параметров низковольтных аппаратов [62]. Результаты экспериментальных исследований [58; 218] свидетельствуют о том, что изменение сопротивления контактов аппарата от количества коммутационных циклов можно с достаточной

точностью аппроксимировать искомой зависимостью способом наименьших квадратов.

В соответствии с изложенным, выражение (3.32) принимает вид:

$$r(z) = r_0 + \nu z. \quad (3.33)$$

Параметры r_0 и ν с достаточной степенью достоверности можно считать некоррелированными (независимыми) [200; 201; 212], так как r_0 определяется качеством производственного процесса, а величина ν для конкретной конструкции аппарата – совокупностью факторов эксплуатационного характера.

Установлено [250], что эмпирические функции сопротивлений контактов аппаратов аппроксимируются нормальным законом распределения. Функция $r(z)$ в этом случае показана как функция веерная случайная. Начальная ордината принимается равной $r_{0.ср}$.

Таким образом, положение каждой реализации зависит от одной случайной величины – углового коэффициента ν :

$$r_{0.ср} = \bar{r} + k \cdot \sigma_{м.в}, \quad (3.34)$$

где $\bar{r} = \frac{\sum_{i=1}^n r_i}{n}$ – выборочная средняя величина; $\sigma_{м.в} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (r_i - \bar{r})^2}{n-1}}$ – среднее

квадратическое отклонение малой выборки.

Коэффициент k зависит от количества испытанных образцов n и доверительной вероятности α , с которой гарантируется получение $r_{0.ср}$.

Значение коэффициента k приведено в табл. 3.9 [188].

Зависимость коэффициента k от количества испытанных образцов n
и доверительной вероятности α

n	4	5	6	7	10
$\alpha = 0,95$					
k	2,15	1,43	1,15	0,98	0,65
$\alpha = 0,9$					
k	1,5	1,08	0,86	0,76	0,59

Для конкретной коммутационной нагрузки скорость изменения сопротивления контактов зависит от большого количества факторов [78]:

- а) сопротивление контактов зависит от характера нагрузки;
- б) сопротивление может изменяться при переходе от одной контактной пары к другой, а также самопроизвольно при измерениях сопротивления одной и той же контактной пары в весьма широком диапазоне;
- в) кроме того, важно учитывать величину конечного и начального нажатий, вибрации, скорости движения, свойств материала, формы и размеров контактов, а также число манипуляций по переключению контактов и обмоток аппарата, изменение напряжения и тока.

Таким образом, скорость изменения сопротивления контактов является вероятностно-статистической величиной.

Распределения указанных параметров, как показывает их статистическое исследование [78], описываются нормальными законами. Следовательно, и функция (скорость изменения сопротивления контактов) от аргументов, распределенных по нормальному закону, может быть принята также распределенной по аналогичному закону.

Поэтому для определения средней скорости изменения сопротивления всей генеральной совокупности аппаратов может быть использован изложенный метод [46].

Характеристика верной случайной функции имеет вид:

$$r_{cp}(z) = r_{o.cp} + v_{cp}z. \quad (3.35)$$

Вероятность безотказной работы контактов низковольтных коммутационных аппаратов за определенное количество коммутационных циклов находится по выражению

$$P(z) = 1 - F(z), \quad (3.36)$$

где $F(z) = \int_0^z f(z)dz$ – вероятность ненадежной работы контактов (интегральный закон распределения отказов); $f(z)$ – плотность вероятности безотказно выполненных коммутаций (дифференциальный закон распределения отказов).

Вероятность исправной работы контактов аппарата определяется выражением:

$$P(r) = \int_{r_0}^{r_{kp}} f(r)dr. \quad (3.37)$$

Нижний предел интегрирования r_0 определяет среднее значение начального сопротивления контактов всей выборки значений, а верхний – среднее значение критического сопротивления r_{kp} всей выборки значений сопротивлений аппаратов.

Так как текущие значения $r(z)$ распределяются по нормальному закону, то

$$P(r) = \int_{r_0}^{r_{kp}} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_r} \exp\left[-\frac{(r - r_{cp})^2}{2\sigma_r^2}\right] dr, \quad (3.38)$$

где r_{cp} – среднее значение сопротивления контактов генеральной совокупности аппаратов; σ_r – среднее квадратическое отклонение сопротивления.

У некоррелированных веерных случайных функций средние квадратические отклонения практически линейно зависят от времени (для коммутационных аппаратов можно считать от количества циклов), т. е.

$$\sigma_r(z) = \sigma_v z, \quad (3.39)$$

где σ_v – среднее квадратическое отклонение углового коэффициента v .

Для определения плотности вероятности безотказно выполненных коммутаций $f(z)$ необходимо продифференцировать выражение (3.37) по количеству циклов. Вместо r и σ_r подставляются значения $r(z)$ и $\sigma_r(z)$ из соотношений (3.31) и (3.38). Значение dr/dz представляет собой среднюю скорость изменения сопротивления.

Из выражения (3.32):

$$dr = v dz$$

или

$$dr = \frac{r - r_{0.ср}}{z} dz. \quad (3.40)$$

Таким образом, после дифференцирования и преобразований получим:

$$f(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_v z^2}} \left\{ 3\sigma_{r0} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\sigma_{r0}}{\sigma_v z} + \frac{v_{ср}}{\sigma_v} \right)^2 \right] + \right. \\ \left. + (r_{кр} - r_{0.ср}) \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{v_{ср}}{\sigma_v} - \frac{r_{кр} - r_{0.ср}}{\sigma_v z} \right)^2 \right] \right\}. \quad (3.41)$$

Для практических расчетов можно упростить полученное выражение. Обозначим коэффициенты вариации скорости и начального сопротивления соответственно S и S_1 , т. е.

$$S = \frac{\sigma_v}{v_{ср}}; \quad (3.42)$$

$$S_1 = \frac{\sigma_r}{r_{0.ср}}; \quad (3.43)$$

$$\theta_1 = \frac{3S_1 \cdot r_{0.ср}}{v_{ср}}; \quad (3.44)$$

$$\theta_2 = \frac{r_{кр} - r_{0.ср}}{v_{ср}}. \quad (3.45)$$

Таким образом,

$$f(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi z^2}} \left\{ \frac{\theta_1}{S} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{1 + \frac{\theta_1}{z}}{S} \right)^2 \right] + \right. \\ \left. + \frac{\theta_2}{S} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{1 - \frac{\theta_2}{z}}{S} \right)^2 \right] \right\}. \quad (3.46)$$

Вероятность безотказной работы контактов определяется по выражению

$$P(z) = 1 - \int_0^z \frac{1}{\sqrt{2\pi z^2}} \left\{ \frac{\theta_1}{S} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{1 + \frac{\theta_1}{z}}{S} \right)^2 \right] + \right. \\ \left. + \frac{\theta_2}{S} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{1 - \frac{\theta_2}{z}}{S} \right)^2 \right] \right\} dz. \quad (3.47)$$

На сегодняшний момент развитие имитационных систем позволяет решать комплекс задач по моделированию сложных систем, в том числе и по оценке функциональных параметров низковольтных аппаратов. Применение систем моделирования позволяет снизить затраты на создание

испытательного образца и оценить степень эффективности применения того или иного варианта схемы управления [239].

Некоторые изготовители коммутационного оборудования применяют хорошо зарекомендовавшие себя программы и одновременно стремятся обеспечивать обмен исходными данными и результатами расчетов между моделями разных систем. Для этого используют интерфейсы, позволяющие реализовать обмен данными между моделями механических и регуляционных процессов уже на первой стадии разработки. Это дает возможность своевременно получать как можно более точную информацию о поведении коммутационной системы и непосредственно сопоставлять его с поведением физической системы.

Для моделирования и оценки функциональных параметров коммутационных систем низковольтных электрических аппаратов использовались блоки программы Matlab из библиотеки Simulink.

На рис. 3.30 представлена модель для расчета вероятности безотказной работы низковольтных аппаратов. В нее входят параметры из выражения (3.47). Для задания необходимых значений используются блоки Constant, для совершения вычислительных операций блоки Fcn, Product (умножение) и Sum (сумма). Рассчитанные данные выводятся на осциллограф.

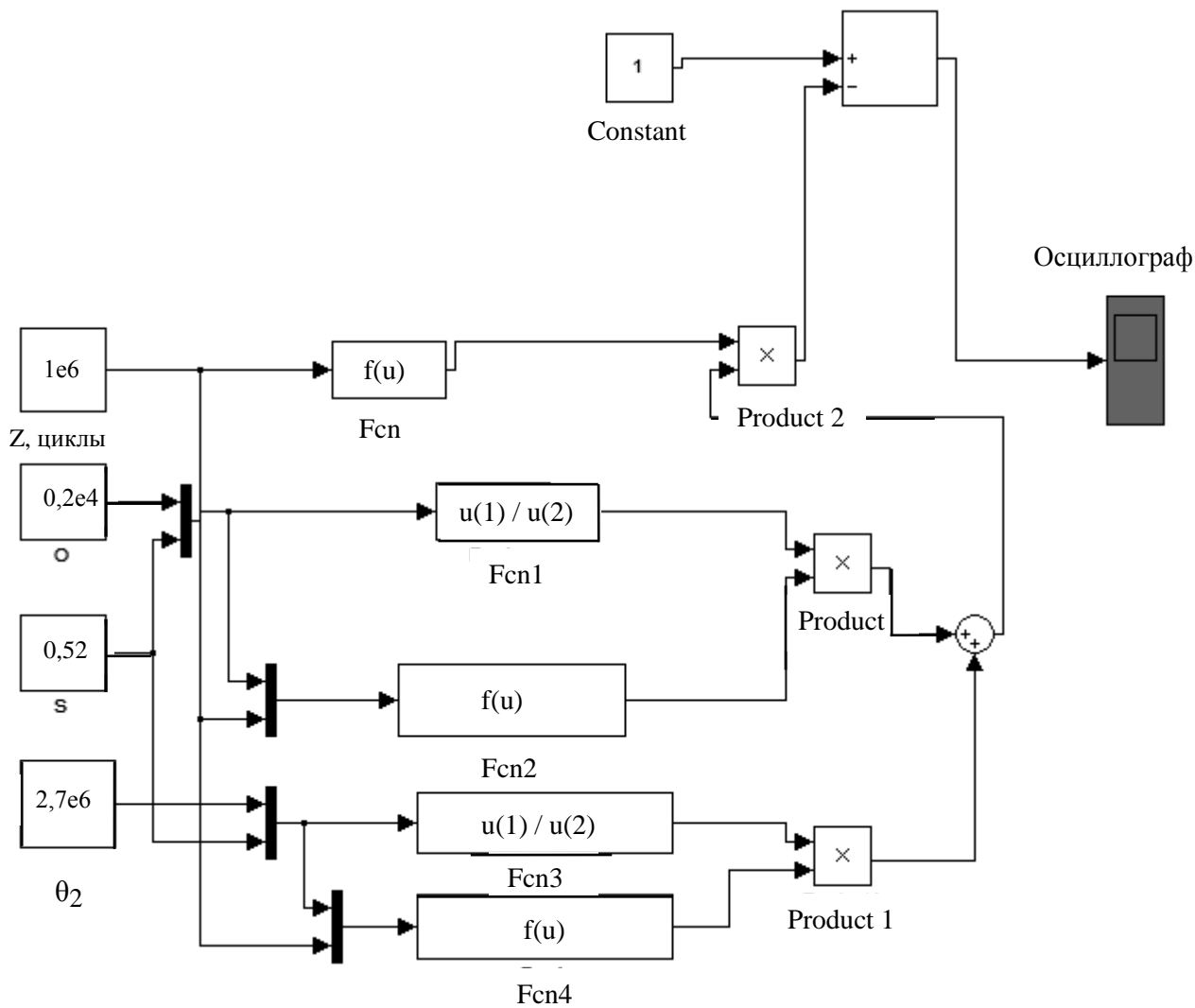


Рис. 3.30. Модель для расчета вероятности безотказной работы низковольтных аппаратов

На рис. 3.31 представлена модель для расчета сопротивления контактных соединений низковольтных аппаратов. В нее входят параметры из выражения (3.33). Для задания необходимых значений используются аналогичные блоки, что и в модели для расчета вероятности безотказной работы аппаратов.

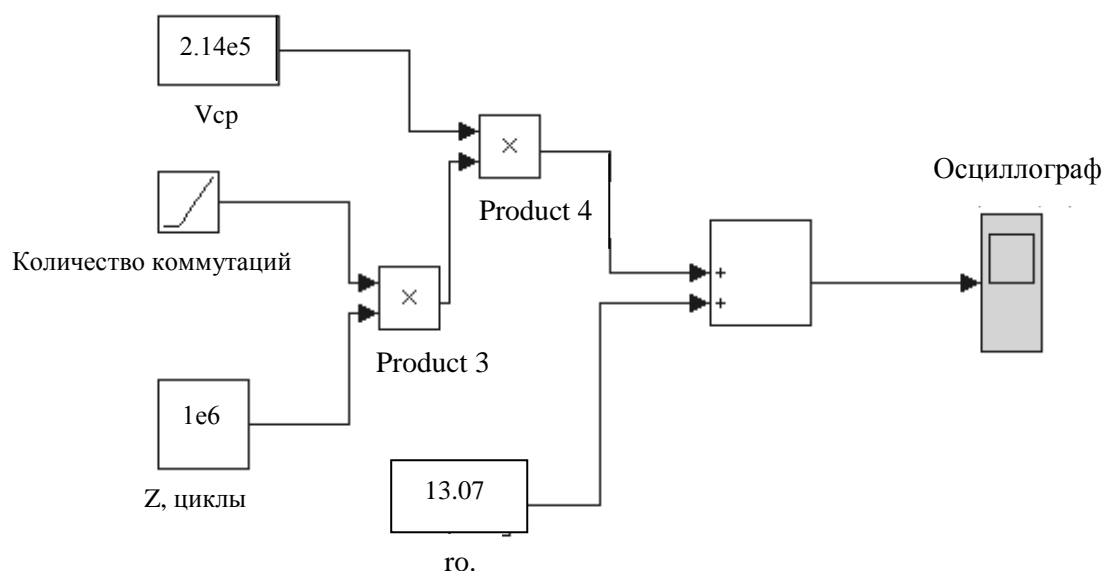


Рис. 3.31. Модель для расчета сопротивления контактов

Практическое применение данного метода прогнозирования надежности контактов показано для магнитных пускателей, контакторов, автоматических выключателей на разные номинальные токи и впервые опубликовано в работах [46; 62; 66].

3.4.3. Моделирование законов изменения характеристик эффективности функционирования низковольтных аппаратов

3.4.3.1. Магнитные пускатели

Выборка начальных сопротивлений контактов магнитных пускателей составлена на основе магнитных пускателей серии ПМЛ [58; 244; 247].

Алгоритм расчета представлен для магнитного пускателя серии ПМЛ, $I_{ном} = 63$ А. В табл. 3.10 указаны начальные значения сопротивления контактов пускателей и критические значения контактного сопротивления, определенные по выражению (3.31) и данным табл. 3.8.

Данные для расчета надежности магнитных пускателей ПМЛ

№	Тип магнитного пускателя	Номинальный ток I_H , А	Начальное сопротивление r_0 , мОм	Критическое значение сопротивления $r_{кр}$, мОм	Скорость изменения сопротивления ν , мОм/цикл
1	ПМЛ	63	13,1	39,3	$1,14 \cdot 10^{-5}$
2			13,2	39,6	$2,14 \cdot 10^{-5}$
3			13,1	39,3	$1,14 \cdot 10^{-5}$
4			13,1	39,3	$1,14 \cdot 10^{-5}$
5			13,1	39,3	$1,14 \cdot 10^{-5}$
6			13,7	41,1	$7,14 \cdot 10^{-5}$
7			13,4	40,2	$4,14 \cdot 10^{-5}$
8			13,1	39,3	$1,14 \cdot 10^{-5}$
9			13,1	39,3	$1,14 \cdot 10^{-5}$
10			13,1	39,6	$1,14 \cdot 10^{-5}$

Выборочная средняя величина начального сопротивления магнитного пускателя определяется по выражению:

$$\bar{r} = \frac{\sum_{i=1}^n r_i}{n} = 13,2 \text{ мОм.}$$

Среднее квадратическое отклонение выборки сопротивлений магнитного пускателя:

$$\sigma_{\text{м.в}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (r_i - \bar{r})^2}{n-1}} = 0,2.$$

Ордината полюса принимается равной $r_{\text{о.ср}}$ по выражению (3.34)

$$r_{\text{о.ср}} = \bar{r} + k \cdot \sigma_{\text{м.в}} = 13,2 + 0,65 \cdot 0,2 = 14,3 \text{ мОм.}$$

Среднее критическое сопротивление $r_{\text{кр}}$:

$$\bar{r}_{\text{кр}} = \frac{\sum_{i=1}^n r_{i\text{кр}}}{n} = 39,6 \text{ мОм.}$$

Скорость изменения сопротивления контактов магнитного пускателя определяем по выражению (3.40):

$$v = \frac{r - r_{\text{о.ср}}}{z} = 1,14 \cdot 10^{-5} \text{ Ом/цикл.}$$

Выборочная средняя величина скорости изменения сопротивления магнитного пускателя определяется по равенству:

$$v_{\text{ср}} = \frac{\sum_{i=1}^n v_i}{n} = 2,14 \cdot 10^{-5} \text{ Ом/цикл.}$$

Среднее квадратическое отклонение скорости изменения сопротивлений магнитного пускателя:

$$\sigma_v = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (v_i - v_{\text{ср}})^2}{n-1}} = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Ом/цикл.}$$

Вычисляем коэффициенты вариации скорости и начального сопротивления соответственно S и S_1 , т. е.

$$S = \frac{\sigma_v}{v_{cp}} = \frac{2 \cdot 10^{-5}}{2,14 \cdot 10^{-5}} = 0,93;$$

$$S_1 = \frac{\sigma_{M.B}}{r_{o.cp}} = \frac{0,2}{13,07} = 0,015;$$

$$\theta_1 = \frac{3S_1 \cdot r_{o.cp}}{v_{cp}} = \frac{3 \cdot 0,015 \cdot 13,07}{2,14 \cdot 10^{-5}} = 2,8 \cdot 10^4;$$

$$\theta_2 = \frac{r_{кр} - r_{o.cp}}{v_{cp}} = \frac{39,6 - 13,07}{2,14 \cdot 10^{-5}} = 1,24 \cdot 10^6.$$

Вероятность безотказной работы пускателей находим из уравнения

$$\begin{aligned}
 P(z_1) &= 1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi z^2}} \left\{ \frac{\theta_1}{S} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{1 + \frac{\theta_1}{z}}{S} \right)^2 \right] + \right. \\
 &\quad \left. + \frac{\theta_2}{S} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{1 - \frac{\theta_2}{z}}{S} \right)^2 \right] \right\} = \\
 &= 1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi(10^5)^2}} \left\{ \frac{2,8 \cdot 10^4}{0,93} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{1 + \frac{2,8 \cdot 10^4}{10^5}}{0,93} \right)^2 \right] + \right. \\
 &\quad \left. + \frac{1,24 \cdot 10^6}{0,93} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{1 - \frac{1,24 \cdot 10^6}{10^5}}{0,93} \right)^2 \right] \right\} = 0,96.
 \end{aligned}$$

Расчет данных для построения зависимости вероятности безотказной работы магнитных пускателей серии ПМЛ (с номинальными токами $I_H = 40$ А

и 80 А) от количества коммутационных циклов проводится аналогично. Данные исследований параметров пускателей представлены в табл. П.Б.3 Приложения Б.

В табл. 3.11 представлены данные для построения зависимости вероятности безотказной работы контактов магнитных пускателей серии ПМЛ ($I_H = 40$ А и 80 А) от количества коммутационных циклов. Зависимость определяется по выражению (3.47) и представлена на рис. 3.32 (кривые 4 и 6).

Таблица 3.11

Зависимость вероятности безотказной работы контактов магнитных пускателей от количества коммутационных циклов

Тип магнитного пускателя	S	S_1	$\theta_1, 10^6$	$\theta_2, 10^6$	$z \cdot 10^6$, циклов	$P(z)$
1	2	3	4	5	6	7
ПМЛ $I_H = 40$ А	0,81	0,01	0,027	1,68	1	0,98
					2	0,92
					3	0,85
					4	0,78
					5	0,73
					6	0,58
					7	0,42
					8	0,40
					9	0,37
					10	0,35

1	2	3	4	5	6	7
ПМЛ $I_H = 63 \text{ A}$	0,93	0,01	0,028	1,24	1	0,98
					2	0,93
					3	0,87
					4	0,79
					5	0,74
					6	0,59
					7	0,43
					8	0,42
					9	0,40
					10	0,38
ПМЛ $I_H = 80 \text{ A}$	0,52	0,006	0,002	2,7	1	0,99
					2	0,95
					3	0,91
					4	0,85
					5	0,77
					6	0,63
					7	0,46
					8	0,44
					9	0,42
					10	0,40

По данным табл. 3.11 построена приблизительная зависимость среднего сопротивления и вероятности безотказной работы контактов магнитных пускателей от количества коммутационных циклов – рис. 3.32 (кривые 1, 2, 3). Графики показывают, что сопротивление контактов в начальный период эксплуатации меняется медленно, а затем по мере износа увеличивается практически до критического значения. На графиках (рис. 3.32) по оси абсцисс отложено число включений и отключений (циклов) магнитных пускателей

за время эксплуатации, по оси ординат отложены значения вероятности безотказной работы и значения сопротивления контактов магнитных пускателей во время эксплуатации.

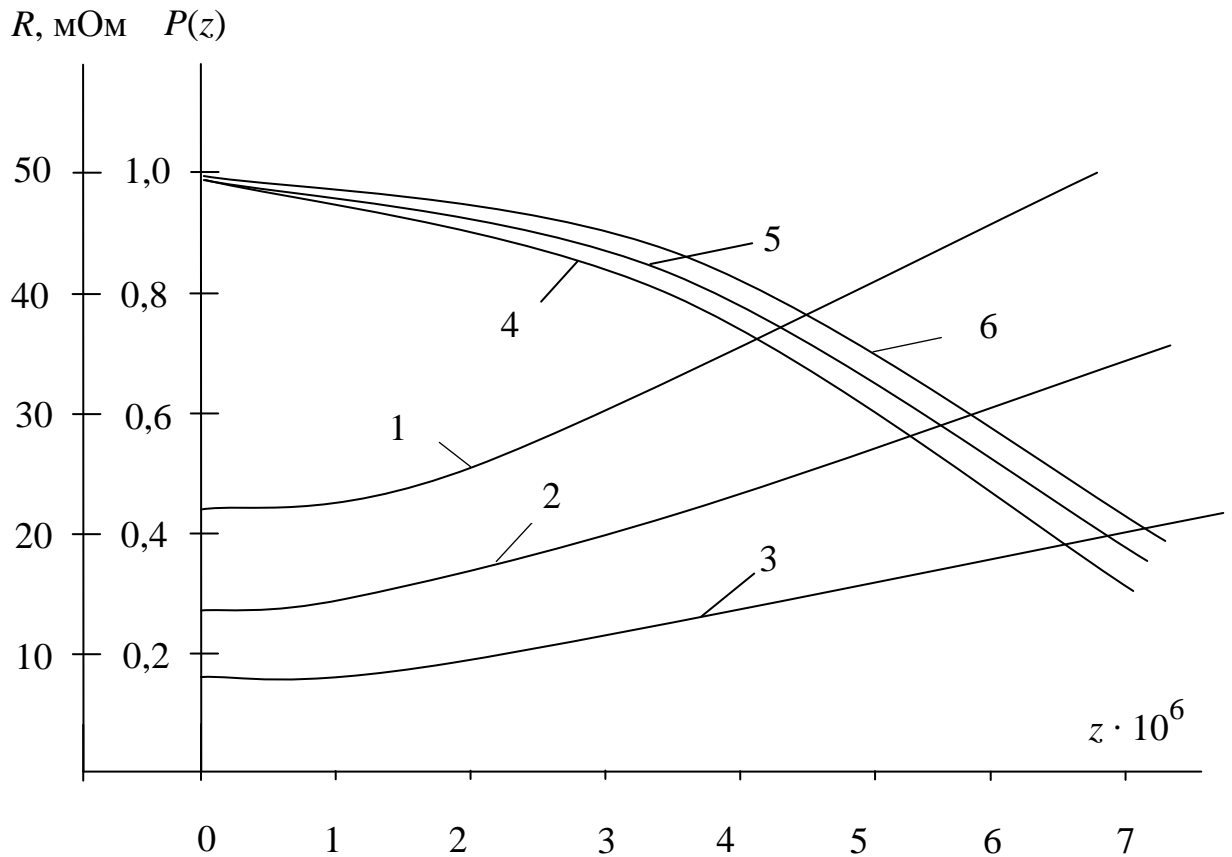


Рис. 3.32. Зависимость сопротивления контактов магнитных пускателей от количества коммутационных циклов:

1 – ПМЛ ($I_H = 40$ А), 2 – ПМЛ ($I_H = 63$ А), 3 – ПМЛ ($I_H = 80$ А);

зависимость вероятности безотказной работы контактов магнитных пускателей от количества коммутационных циклов:

4 – ПМЛ ($I_H = 40$ А), 5 – ПМЛ ($I_H = 63$ А), 6 – ПМЛ ($I_H = 80$ А)

3.4.3.2. Контактторы

Выборка начальных сопротивлений контактов контакторов составлена для контакторов серий КП1 и КТПВ600 [58; 244; 247] (табл. П.Б.4 Приложения Б). В табл. П.Б.4 Приложения Б также указаны начальные значения сопротивления контактов контакторов и критические значения контактного сопротивления. Алгоритм расчета аналогичен, как и для магнитных пускателей.

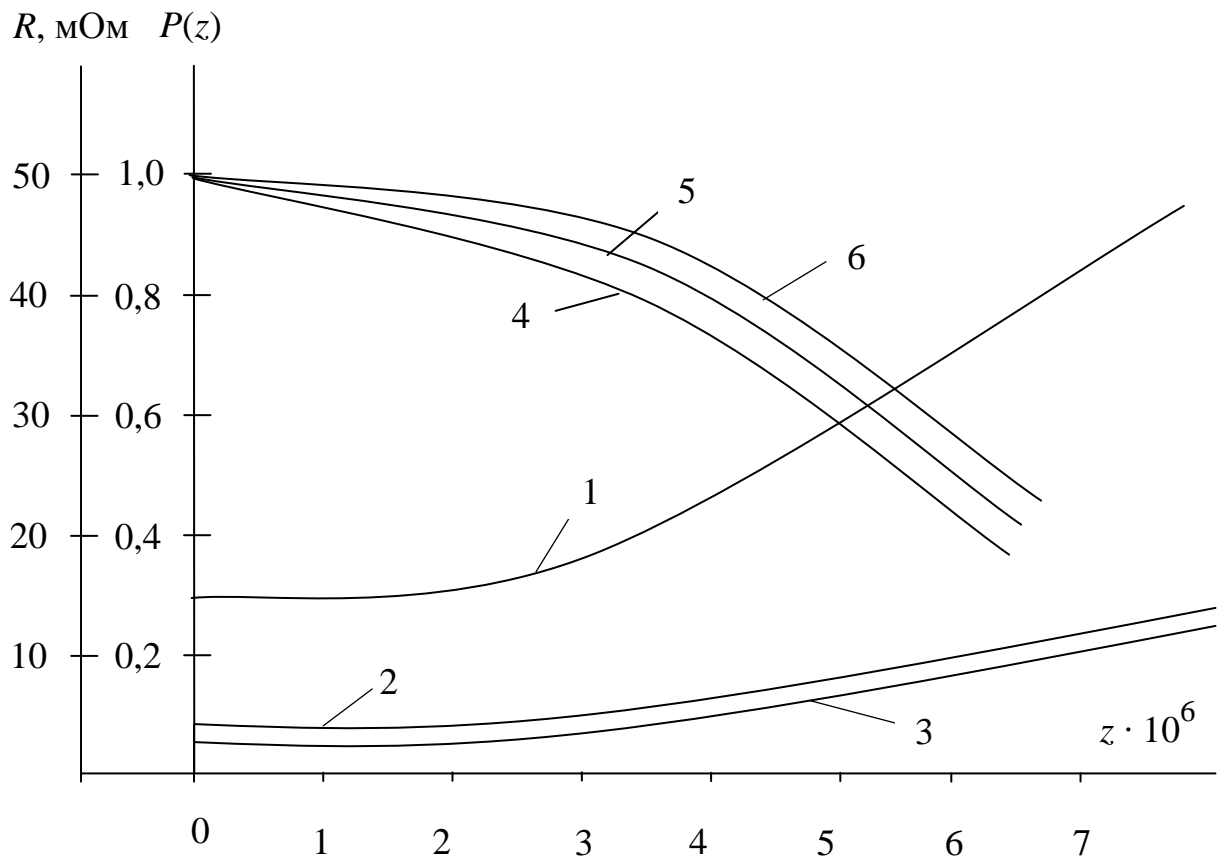


Рис. 3.33. Зависимость сопротивления контакторов

от количества коммутационных циклов:

1 – КП1 ($I_H = 20$ А), 2 – КТПВ600 ($I_H = 63$ А), 3 – КП1 ($I_H = 75$ А);

зависимость вероятности безотказной работы контактов контакторов

от количества коммутационных циклов:

4 – КП1 ($I_H = 20$ А), 5 – КТПВ600 ($I_H = 63$ А), 6 – КП1 ($I_H = 75$ А)

Данные для построения зависимости вероятности безотказной работы контакторов от количества коммутационных циклов рассчитываются аналогично, как и для магнитных пускателей. Результаты расчета представлены в табл. П.Б.5 Приложения Б. Графики, показывающие данную зависимость и приблизительную зависимость среднего сопротивления контактов контакторов от количества коммутационных циклов представлены на рис. 3.33.

На графике (рис. 3.33) по оси абсцисс отложено число включений и отключений (циклов) контакторов за время эксплуатации.

3.4.3.3. Автоматические выключатели

Выборка начальных сопротивлений контактов автоматических выключателей составлена для автоматических выключателей серии АЕ, АК-63 и А3110 [58; 244; 247] (табл. П.Б.10 Приложения Б). В табл. П.Б.6 Приложения Б указаны начальные значения сопротивления контактов автоматических выключателей и критические значения контактного сопротивления.

Данные для построения зависимости вероятности безотказной работы автоматических выключателей от количества коммутационных циклов рассчитываются аналогично, как и для магнитных пускателей. Результаты расчета представлены в табл. П.Б.7 Приложения Б. Графики, показывающие данную зависимость и приблизительную зависимость среднего сопротивления контактов автоматических выключателей от количества коммутационных циклов, представлены на рис. 3.34.

На графике (рис. 3.34) по оси абсцисс отложено число включений и отключений (циклов) автоматических выключателей за время эксплуатации. Гарантийный срок эксплуатации автоматических выключателей колеблется в пределах от 2 до 5 лет, а к 10 годам службы проводятся плановые ремонты. Это подтверждают и полученные зависимости: вероятность безотказной работы автоматических выключателей впервые 3 года близка к 1, а затем вероятность снижается, что указывает на необходимость осмотра оборудования.

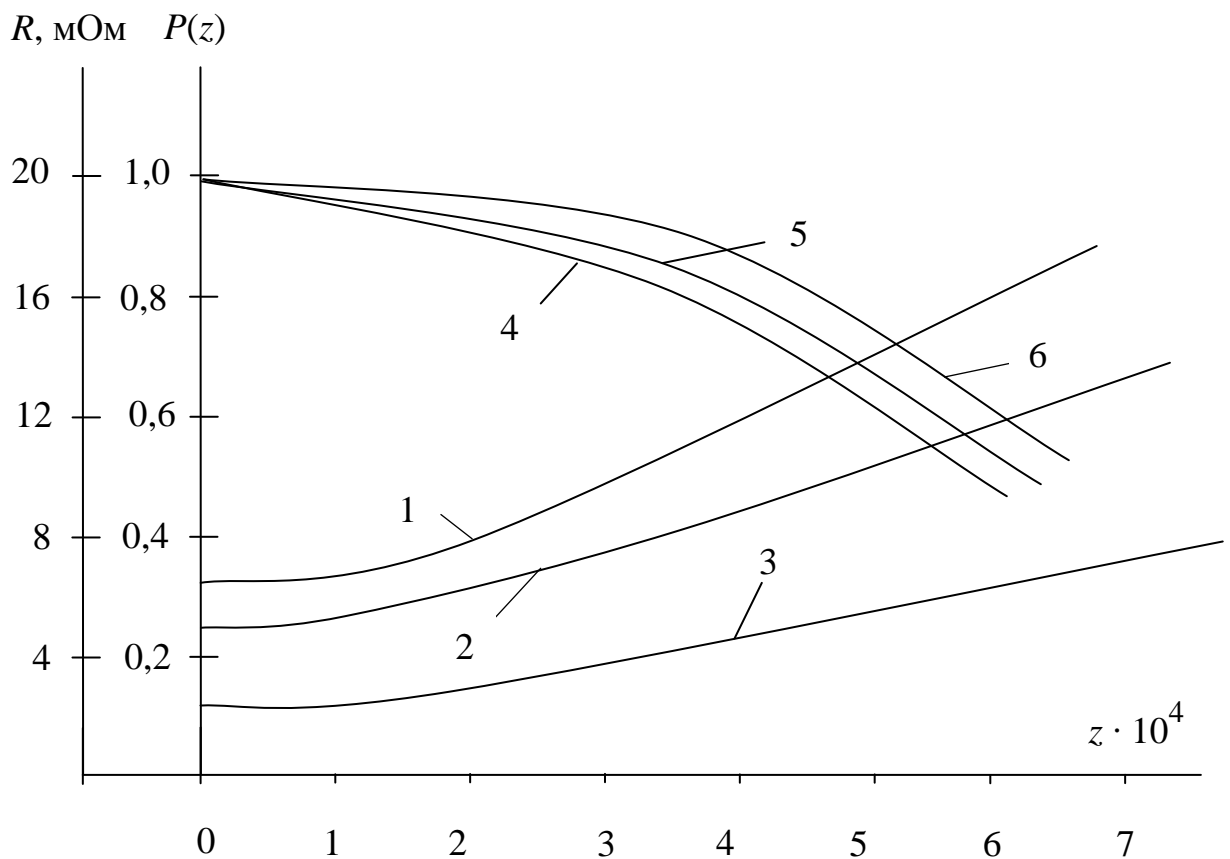


Рис. 3.34. Зависимость сопротивления контактов автоматических выключателей от количества коммутационных циклов:

1 – АЕ2443 ($I_H = 50$ А), 2 – АК63 ($I_H = 63$ А), 3 – А3110 ($I_H = 100$ А);

зависимость вероятности безотказной работы контактов автоматических выключателей от количества коммутационных циклов:

4 – АЕ2443 ($I_H = 50$ А), 5 – АК63 ($I_H = 63$ А), 6 – А3110 ($I_H = 100$ А)

3.4.3.4. Оценка функциональных параметров некоторых российских и зарубежных аппаратов

По результатам экспериментальных исследований установлено, что для автоматических выключателей ИЕК скорость изменения сопротивления будет находиться, как:

$$v = \frac{dR}{dz} = (-3,704 \cdot e^{-0,06I_{\text{НОМ}}} + 0,06)z \text{ при } I_{\text{НОМ}} < 60\text{А}; \quad (3.48)$$

$$v = \frac{dR}{dz} = (-0,0794 \cdot e^{-0,01I_{\text{НОМ}}} + 0,00175)z \text{ при } I_{\text{НОМ}} > 60 \text{ А.}$$

Графически изменение вероятности безотказной работы и сопротивления контактов показано на рис. 3.35.

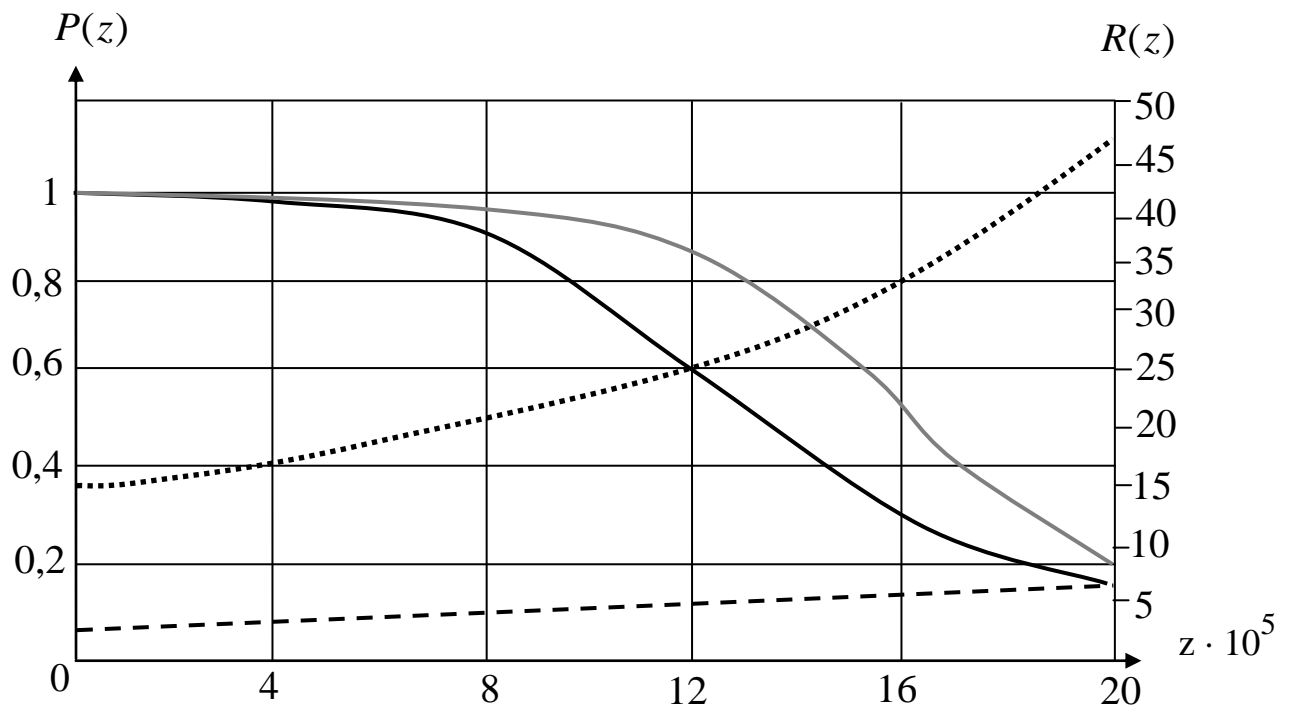


Рис. 3.35. Графики вероятности безотказной работы $P(z)$ и сопротивления контактов $R(z)$ автоматических выключателей ИЕК с $I_{\text{НОМ}} = 50 \text{ А}$ и 200 А :

$P(z)$ 50 А (—), 200 А (—); $R(z)$ 50А (······), 200 А (- - -)

Для автоматических выключателей АВВ скорость изменения сопротивления по результатам исследований имеет следующий вид:

$$v = \frac{dR}{dz} = (-2,5 \cdot e^{-0,05I_{\text{НОМ}}} + 0,04)z \text{ при } I_{\text{НОМ}} < 60 \text{ А}; \quad (3.49)$$

$$v = \frac{dR}{dz} = (-0,062 \cdot e^{-0,01I_{\text{НОМ}}} + 0,001)z \text{ при } I_{\text{НОМ}} > 60 \text{ А}.$$

Графически изменение вероятности безотказной работы и сопротивления контактов будет представлено на рис. 3.36.

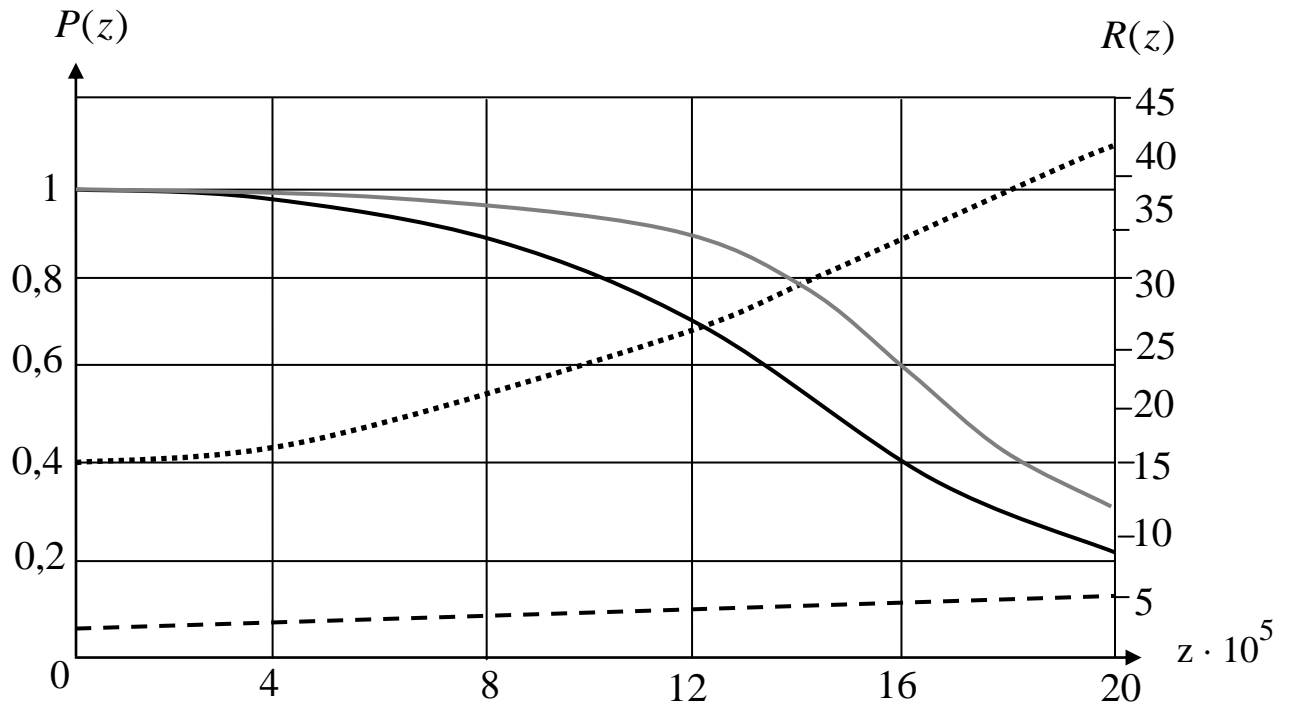


Рис. 3.36. Графики вероятности безотказной работы $P(z)$ и сопротивления контактов $R(z)$ автоматических выключателей АВВ с $I_{\text{НОМ}} = 50 \text{ А}$ и 200 А :

$P(z)$ 50 А (—), 200 А (—); $R(z)$ 50А (······), 200 А (- - -)

Наиболее распространенными характеристиками случайной величины X (в данном случае сопротивления R) являются математическое ожидание (среднее значение) m_x и среднеквадратичное отклонение:

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - m_x)^2}{n - 1}},$$

где x_i — значение величины X ; n — число значений.

Минимальный объем выборки, достаточный для определения математического ожидания сопротивления контактов с заданной точностью Δ , %, и достоверностью P , определяют по выражению:

$$\omega = \left(\frac{t\gamma_x \cdot 100}{\Delta} \right)^2,$$

где t – параметр, зависящий от желаемого значения P (при $P = 0,95$, $t = 2$); γ_x – коэффициент вариации величины X , определяемый по формуле:

$$\gamma_x = \sigma_x / m_x.$$

Проверим достоверность результатов сопротивления контактных соединений по минимальному объему выборки, чтобы с вероятностью 0,95 погрешность Δ не превышала 5 %.

В этом случае математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение сопротивления будут принимать значения (рис. 3.35):

$$M[\Delta R_{\text{IEK}}] = 84 \text{ мОм}; \quad \sigma[\Delta R_{\text{IEK}}] = 20,16 \text{ мОм},$$

откуда $\gamma[\Delta R_{\text{IEK}}] = 0,24$.

Определяем объем выборки, необходимый для обеспечения погрешности 5 %:

$$\omega = \left(\frac{2 \cdot 0,24 \cdot 100}{5} \right)^2 = 92.$$

Следовательно, минимальный объем выборки необходимый для показателей достоверности $P = 0,95$ составляет 92 аппарата, исследованное же количество автоматических выключателей фирмы IEK составляет более 200 аппаратов.

Для аппаратов АВВ аналогично высчитывается минимальный объем выборки: $\omega = \left(\frac{2 \cdot 0,21 \cdot 100}{5} \right)^2 = 72$, т. е. для показателей достоверности $P = 0,95$

необходимо 72 аппарата, исследованное количество автоматических выключателей фирмы АВВ составляет более 100 аппаратов.

Для магнитных пускателей ИЕК по данным исследований скорость изменения сопротивления будет находиться, как:

$$v = \frac{dR}{dz} = (-3,956 \cdot e^{-0,045I_{\text{НОМ}}} + 0,112)z \text{ при } I_{\text{НОМ}} < 70 \text{ А}; \quad (3.50)$$

$$v = \frac{dR}{dz} = (-0,2083 \cdot e^{-0,01I_{\text{НОМ}}} + 0,006)z \text{ при } I_{\text{НОМ}} > 70 \text{ А}.$$

Графически изменение вероятности безотказной работы и сопротивления контактов показано на рис. 3.37.

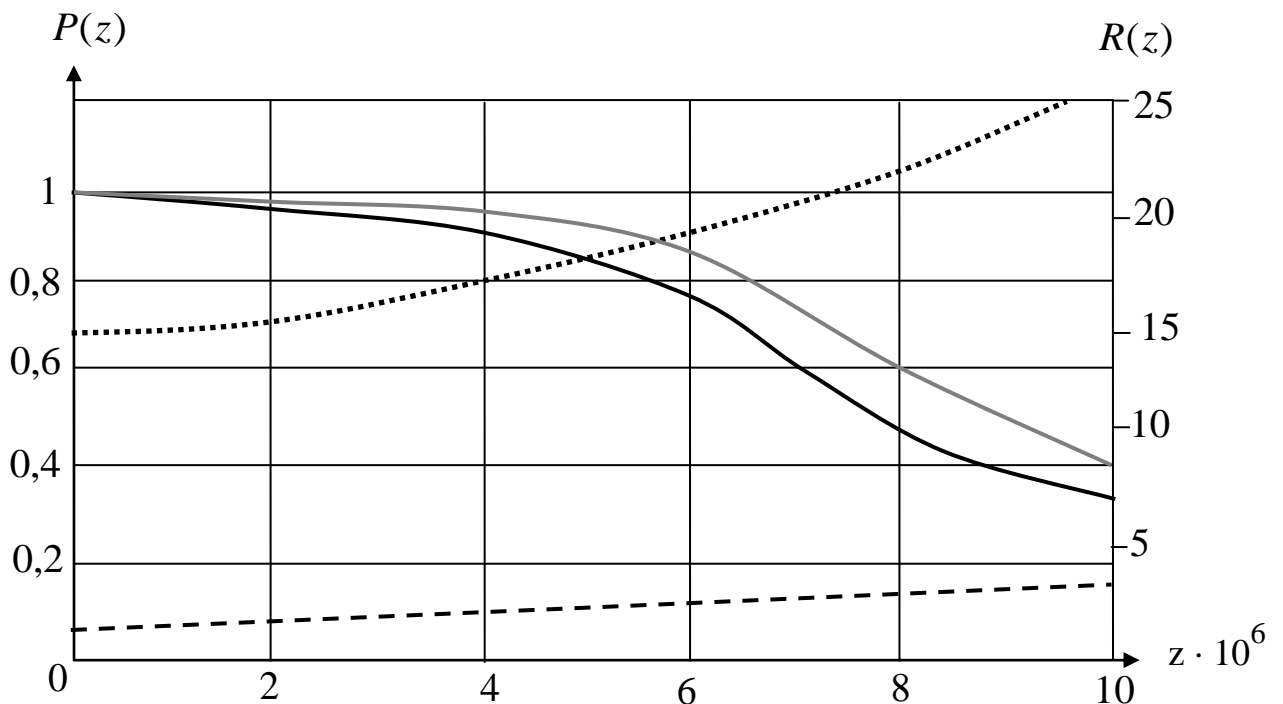


Рис. 3.37. Графики вероятности безотказной работы $P(z)$ и сопротивления контактов $R(z)$ магнитных пускателей ИЕК с $I_{\text{НОМ}} = 50 \text{ А}$ и 200 А :
 $P(z)$ 50 А (—), 200 А (—); $R(z)$ 50А (······), 200 А (- - -)

Режим работы магнитных пускателей АС4, 12–14 коммутаций/час.

Для магнитных пускателей АВВ по результатам исследований скорость изменения сопротивления находится:

$$v = \frac{dR}{dz} = (-3,2 \cdot e^{-0,04I_{\text{НОМ}}} + 0,1)z \text{ при } I_{\text{НОМ}} < 70 \text{ А}; \quad (3.51)$$

$$v = \frac{dR}{dz} = (-0,175 \cdot e^{-0,01I_{\text{НОМ}}} + 0,005)z \text{ при } I_{\text{НОМ}} > 70 \text{ А}.$$

Графически изменение вероятности безотказной работы и сопротивления контактов представлено на рис. 3.38.

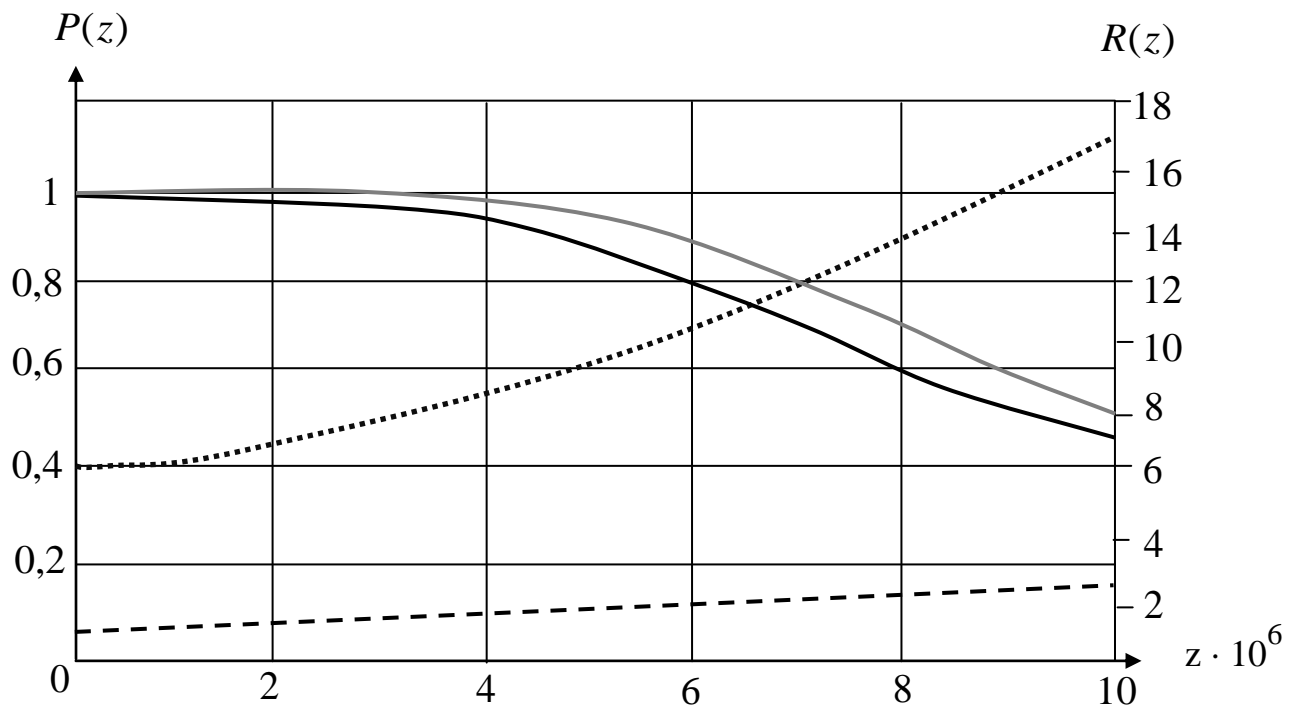


Рис. 3.38. Графики вероятности безотказной работы $P(z)$ и сопротивления $R(z)$

контактов магнитных пускателей АВВ с $I_{\text{НОМ}} = 50 \text{ А}$:

$P(z)$ 50 А (—), 200 А (—); $R(z)$ 50А (······), 200 А (- - -)

Для магнитных пускателей, аналогично автоматическим выключателям, математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение сопротивления будут принимать значения (рис. 3.33):

$$M[\Delta R_{\text{IEK}}] = 102 \text{ мОм}; \quad \sigma[\Delta R_{\text{IEK}}] = 21,5 \text{ мОм},$$

откуда $\gamma[\Delta R_{\text{IEK}}] = 0,21$.

Определяем объем выборки, необходимый для обеспечения погрешности 5 %:

$$\omega = \left(\frac{2 \cdot 0,21 \cdot 100}{5} \right)^2 = 71.$$

Следовательно, минимальный объем выборки необходимый для показателей достоверности $P = 0,95$ составляет 71 аппарат, исследованное количество магнитных пускателей фирмы IEK составляет более 100 аппаратов.

Для магнитных пускателей фирмы АВВ минимальный объем выборки составил 64 аппарата ($\omega = \left(\frac{2 \cdot 0,20 \cdot 100}{5} \right)^2 = 64$), исследовано более 70 аппаратов.

Как показали результаты исследований, пределы изменения сопротивлений контактных систем и вероятности безотказной работы автоматических выключателей и магнитных пускателей марок ITEK и АВВ примерно равны.

Таким образом, представленный метод оценки функциональных параметров позволяет прогнозировать надежность низковольтных аппаратов по результатам изменения сопротивлений их контактных соединений.

Как отмечалось выше, в процессе эксплуатации коммутационных аппаратов происходит износ их контактов, за счет чего увеличивается эквивалентное сопротивление. Естественно, что этот процесс постепенный и сопротивление в данном случае рассматривается как величина, зависящая от множества факторов: износ при замыкании и размыкании, влияние тока и материала контактов, влияние среды, влияние частоты операций, влияние кривизны контактной поверхности, места контактирования, нажатия, массы

контактов и скорости их сближения на износ при замыкании и др. Эти и многие другие факторы по-разному изменяются при эксплуатации коммутационного аппарата, но в совокупности они влияют на сопротивление контактов, изменение которого представлено на графиках рис. 3.28–3.34.

Естественно, что с увеличением сопротивления контактов растут и потери в коммутационных аппаратах, установленных на линии.

Например, потери мощности в автоматическом выключателе АЕ-2443 ($I_{\text{НОМ}} = 50 \text{ А}$) при загрузке аппарата номинальным током при начальном сопротивлении $r_{\text{нач}} = 7 \text{ мОм}$ составили 5,2 Вт, а для сопротивления $r_{\text{кр}} = 21 \text{ мОм}$ – 15,6 Вт.

Износ контактов ведет не только к снижению надежности работы коммутационных аппаратов, но и к росту потерь мощности в них. Это является весьма важным при определении потерь ЭЭ в цеховых сетях, где при короткой длине линий цеховых сетей эквивалентное сопротивление линии определяется суммой сопротивлений проводов или кабелей и сопротивлением контактных соединений коммутационных аппаратов, установленных на линии [36; 247].

3.5. Выводы по третьей главе

1. Проанализировано по результатам экспериментальных исследований низковольтных коммутационных аппаратов, применяемых в цеховых сетях промышленного электроснабжения, что по конструктивным особенностям аппараты можно разделить на следующие 3 группы:

– аппараты, имеющие кроме силовых контактов в силовой цепи добавочные элементы (датчики тепловых реле, катушки максимальных реле), такие как автоматические выключатели, магнитные пускатели, контакторы;

– аппараты, имеющие относительно большое сопротивление силовой цепи, такие как предохранители;

– аппараты, имеющие только переходное сопротивление контактов (такие как рубильники, пакетные выключатели).

2. Установлено, что сопротивления различных групп элементов силовой цепи аппаратов подчиняются общим для каждой группы закономерностям изменения, так, например, сопротивление болтовых присоединений подключения аппарата кабелем составляет незначительную долю в общем сопротивлении аппарата, а основное сопротивление аппарата составляют сопротивления следующих элементов:

- контактной группы;
- датчика теплового реле;
- катушки максимального реле.

3. По результатам экспериментальных и теоретических исследований разработаны методы и аналитические выражения для определения сопротивлений контактных соединений низковольтных коммутационных аппаратов в зависимости от их номинальных данных и построены номограммы.

4. Проведен комплексный анализ теоретических и экспериментальных значений сопротивлений контактных соединений низковольтных коммутационных аппаратов.

5. Проведена оценка величины сопротивлений контактных систем аппаратов с использованием нормального закона распределения.

6. В результате экспериментальных исследований предложен критерий оценки технического состояния низковольтных коммутационных аппаратов, в качестве которого выступает сопротивление контактных соединений, позволяющий учесть динамику изменения потерь мощности, и установлены коэффициенты кратности (превышения) значения сопротивления контактов по величине их допустимого перегрева относительно номинальных значений.

7. Разработан метод комплексной оценки эффективности функционирования низковольтных аппаратов и выявлены законы изменения сопротивлений контактных соединений низковольтных коммутационных аппаратов в зависимости от режимов эксплуатации.

Глава 4. ПЛАНИРОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОГО ОПИСАНИЯ СИСТЕМ ЦЕХОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ НА БАЗЕ ДОСТОВЕРИЗАЦИИ СХЕМНО-РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ

4.1. Агрегированная форма представления цеховой сети для определения потерь электроэнергии

Оценка текущего состояния цеховых сетей по потерям и их моделирование должны проводиться исходя из режимной информативности сетей [153].

Переток активной мощности из сети 6–10 кВ в сеть 0,4 кВ определяется по известному выражению:

$$P_{0,4\text{кВ}} = \sum_i P_{i\text{ТП}} - \Delta P_{\text{тр}}^{\text{xx}}, \quad i = 1, \dots, f, \quad (4.1)$$

где f – число линий (фидеров) распределительной сети 6–10 кВ; $P_{i\text{ТП}}$ – активные мощности трансформаторных подстанций i -й линии (фидера), определяемые при расчете режима распределительной сети 6–10 кВ, исключая абонентские ТП; $\Delta P_{\text{тр}}^{\text{xx}}$ – потери холостого хода трансформаторов.

Переток мощности по выражению (4.1) является важной информацией для определения потерь в сети 0,4 кВ. Из-за большой размерности сети 0,4 кВ и недостатка информации о нагрузке ее элементов методика определения потерь основана на агрегированной форме ее представления – с использованием либо эквивалентного сопротивления, либо эквивалентной длины линии [85].

Как известно, потери активной энергии в сетях 0,4 кВ определяются с помощью выражения [182]:

$$\Delta W_{0,4\text{кВ}} = \frac{W_{0,4\text{кВ}}^2 R_{\text{экрв}0,4} dK_{\text{н}}}{1,05 U^2 T} (1 + \text{tg}^2 \varphi), \quad (4.2)$$

где $W_{0,4кВ}$ – переток активной энергии из сети 6–10 кВ в сеть 0,4 кВ; $R_{экв0,4кВ}$ – эквивалентное сопротивление сети 0,4 кВ; U – напряжение рассматриваемой сети; $\text{tg}\varphi^2$ – учитывает загрузку сети реактивной мощностью; K_H – коэффициент увеличения потерь из-за несимметрии нагрузки в сетях 0,4 кВ, равный 1,1–1,4 для ступени номинального напряжения 0,4 кВ; $d = 1,4–1,75$ – повышающий дисперсионный коэффициент, учитывающий увеличение потерь от неравномерности графика нагрузки [182], T – период времени.

Так как речь идет о расчете мгновенных режимов, где $T = 1$, выражение для потерь ЭЭ (4.2) заменяется уравнением для потерь мощности [153]:

$$\Delta P_{0,4} = \frac{P_{0,4кВ}^2 R_{экв} d K_H}{1,05 U^2} (1 + \text{tg}\varphi^2), \quad (4.3)$$

где $P_{0,4кВ}$ – переток активной мощности из сети 6–10 кВ в сеть 0,4 кВ, определяемый на основе выражения (4.1).

Таким образом, для использования уравнения (4.3) необходимо определение эквивалентного сопротивления сети 0,4 кВ $R_{0,4кВ}$ [153]. Эквивалентное сопротивление отдельной линии определяется из равенства [182]:

$$R_{экв} = \left(\sum_{i=1}^n r_i \cdot S_i^2 \right) / S_{л}^2, \quad (4.4)$$

где S_i – суммарные установленные мощности участков; $S_{л}$ – суммарная присоединенная мощность линии или сумма мощностей всех трансформаторов, присоединенных к данной линии.

Распределительные линии 0,4 кВ обычно представляют собой разветвленные древообразные схемы с большим по сравнению с линиями других ступеней номинального напряжения числом участков. Поэтому для вывода расчетной формулы $S_{экв0,4кВ}$ реальные линии 0,4 кВ заменяются условной линией, для которой формируется последовательность из участков в порядке убывания их суммарной присоединенной мощности. Затем линия

представляется в виде неразветвленной топологической схемы с участками бесконечно малой длины ∂X [153].

Выразив сопротивления в формуле (4.4) через удельные параметры:

$$R_{i_{\text{ЭКВ}}} = \rho l_i / F_i, \quad (4.5)$$

где ρ – удельное сопротивление линии; l_i – длина i -го участка; F_i – сечение i -го участка, получим [153]:

$$R_{\text{ЭКВ}} = \frac{1}{S_{\text{Л}}^2} \sum_{i=1}^n \frac{\rho l_i S_i^2}{F_i}. \quad (4.6)$$

Полагая, что присоединенная мощность распределена равномерно вдоль линии, ее расчетную величину [87] для каждого элементарного участка определим по формуле:

$$S_i(X) = \frac{S_{\text{Л}}(L_{\text{Л}} - X_i)}{L_{\text{Л}}}, \quad (4.7)$$

где $L_{\text{Л}}$ – длина условной линии 0,4 кВ, равная средней длине линии 0,4 кВ; X – переменная длины условной линии 0,4 кВ; $S_{\text{Л}}$ – суммарная присоединенная мощность условной линии 0,4 кВ, равная среднему значению суммарной присоединенной мощности линий 0,4 кВ.

В выражении (4.7) также присутствует параметр линии – сечение $F(X)$, являющийся функцией ее длины. Как известно, максимальное сечение находится в головном участке линии и далее к ее периферийным областям резко снижается. На основе статистических данных, полученных разработчиками программы SLAMO [153], зависимость сечения участков условной линии 0,4 кВ с наименьшей погрешностью описывается параболической зависимостью:

$$F(X) = F_{\text{max}} - \frac{(F_{\text{max}} - F_{\text{min}})X^2}{L_{\text{Л}}^2}. \quad (4.8)$$

Аналогичную зависимость ими предлагается использовать и для определения присоединенной мощности вместо выражения (4.7):

$$S(X) = S_{\max} - \frac{(S_{\max} - S_{\min})X^2}{L_{\text{л}}^2}, \quad (4.9)$$

где S_{\max} , S_{\min} – соответственно максимальное и минимальное значение мощности, присоединенной к участкам линии.

Разбивая условную линию 0,4 кВ на бесконечное число интервалов и полагая, что функции (4.8) и (4.9) непрерывны, суммирование в выражении (4.6) заменяем интегрированием:

$$R_{\text{экв}} = \frac{1}{S^2} \int_0^l \frac{pS^2(X)}{F(X)} dX. \quad (4.10)$$

Линии 0,4 кВ разбиваются на две группы – кабельные и воздушные – и по выражению (4.10) вычисляются $R_{\text{экв.вл}}$, $R_{\text{экв.кл}}$.

При расчете суммарных потерь мощности в сети 0,4 кВ их умножение может быть произведено на интегрирующий множитель, определенный по какому-то одному графику – обычно графику суммарной нагрузки. Как известно, дальнейшее уточнение расчетов возможно при использовании информации о графиках узловых нагрузок, получаемых в дни контрольных замеров. В этом случае расчет потерь ЭЭ проводят за средние сутки месяца, рассчитывая потери мощности на каждой ступени графика. График нагрузки узлов получают на основе известного значения энергии, потребленной в узле за расчетный срок, и конфигурации, соответствующей графику контрольного замера.

По уравнению (4.10) определяется результирующее эквивалентное сопротивление линии 0,4 кВ.

4.2. Выбор обобщенных параметров оборудования систем цехового электроснабжения

Во избежание недостатков, присущих методу эквивалентного сопротивления [216], представляется целесообразным применение для целей определения потерь, специализированных моделей, параметры которых легко находятся отдельно для каждой конкретной цеховой сети. При составлении таких моделей все линии радиальной цеховой сети заменяются одной эквивалентной линией.

Эквивалентные параметры моделей вычисляются на основе вероятностно-статистического подхода и учитывают обобщенные физические характеристики сетей.

Первоначально для этой цели синтезировались различного рода упрощающие допущения: фиксированные законы загрузки линий, наличие определенного числа коммутационной аппаратуры на линии и т. д. На основании проведенных исследований, используя детерминированный подход, не удалось получить более простые и удобные выражения для определения эквивалентного сопротивления даже для радиальной сети без существенной потери точности.

Нагрузочные потери ΔW_n ЭЭ в элементе трехфазной сети сопротивлением R находят по выражению (2.10).

Точное определение потерь ЭЭ за интервал времени T возможно при известных значениях параметра R и функции тока от времени $I(t)$ на всем интервале.

Как показывают исследования [52; 58], погрешность определения фактического значения активного сопротивления соизмерима с погрешностью определения среднеквадратичного тока.

Известно, что сопротивление проводника зависит в первую очередь от его токовой нагрузки и может быть вычислено согласно нашего опыта [244]

из уравнения (2.11). Сопротивление автоматических выключателей, установленных на линии, может быть вычислено по данным табл. 3.2:

$$r_k = 349 / I_H.$$

Определение потерь ЭЭ в цеховых сетях является задачей, решаемой в условиях неопределенности, поскольку имеется неопределенность в исходных данных, обусловленная неточными значениями длин и количества линий сети, температурными режимами, эксплуатационными характеристиками оборудования и т. п.

Наличие указанных погрешностей приводит к тому, что фактические потери энергии будут в большей или меньшей степени отличаться от их расчетного значения. Это приводит к необходимости не только получить вероятностно-статистические модели зависимости потерь ЭЭ сети от ее обобщенных параметров, но и наиболее точно рассчитать интервалы изменения этих параметров, что впервые реализовано в наших поисках [52; 246].

Для построения полиномиальных моделей, в которых зависимыми переменными являются потери мощности и эквивалентное сопротивление цеховой сети, в качестве факториальных признаков нами выбраны основные характеристики радиальной цеховой сети:

x_1 – отношение суммарной длины линий цеховой сети к количеству линий, т. е. средняя длина линий:

$$l_{\text{ср}} = \frac{\sum_{i=1}^n l_i}{n},$$

где l_i – длина i -й линии цеховой сети, м; n – количество линий;

x_2 – величина, равная количеству линий n ;

x_3 – величина, равная эквивалентному удельному сопротивлению линий сети r_{20} при 20 °С, соответствующего сечения S_i ;

$$r_{\text{Э}20} = 31,3 \frac{\sum_{i=1}^n l_i}{\sum_{i=1}^n S_i l_i},$$

где S_i – сечение i -й линии, мм^2 ; $31,3/S_i$ – сопротивление 1 м алюминиевой линии сечением S_i при 20°C , Ом/м;

x_4 – параметр квадрата среднеквадратичной загрузки линий сети:

$$k_3^2 = \frac{\sum_{i=1}^n k_{3i}^2}{n},$$

где $k_{3i} = I_i / I_{\text{ном}i}$ – коэффициент загрузки i -й линии; I_i – ток в i -й линии, А; $I_{\text{ном}i}$ – номинальный ток в линии S_i -го сечения, А.

При этом принимается, что на линии установлены два автоматических выключателя;

x_5 – температура окружающей среды θ_0 , $^\circ\text{C}$.

С параметром фактора x_3 имеет прямую связь величина сопротивления коммутационных аппаратов, принятых к установке на линии данного сечения. Определив по значению x_3 номинальный ток линии, можно вычислить сопротивление аппарата, используя зависимости табл. 3.2. На основании статистических данных считаем, что в среднем на линии цеховой сети установлены 2 коммутационных аппарата.

Проиллюстрируем вышеизложенное примером. Пусть даны 2 линии цеховой сети с параметрами $l_1 = 20$ м, $s_1 = 25 \text{ мм}^2$, $l_2 = 30$ м, $s_2 = 10 \text{ мм}^2$. В этом случае значение $r_{\text{Э}20}$ определится как:

$$r_{\text{Э}20} = 31,3 \frac{20 + 30}{20 \cdot 25 + 30 \cdot 10} = 1,95 \text{ мОм/м},$$

т. е. эквивалентное сечение для данных линий составит 16 мм^2 . Аппараты, устанавливаемые в линиях с таким сечением, могут быть рассчитаны на номинальный ток до 90 А.

Сопротивления автоматических выключателей, установленных на линиях, вычисляем, используя зависимости табл. 3.2:

$$r_k = 307 / I_H = 3,4 \text{ мОм.}$$

Первоначальные диапазоны варьирования факторов охватывают сети со средней площадью цехов, средняя длина линий сети заключена в пределах от 10 до 100 м при количестве линий от 10 до 20; номинальная мощность цеховых трансформаторов – 250–1600 кВ · А, чему соответствует предел изменения средней величины сечения линий от 16 до 120 мм^2 . При этом допустимый суммарный ток линий – 380–2400 А (при полной их загрузке). Диапазон изменения коэффициента загрузки линий находится в пределах от 0,3 (что соответствует малонагруженной сети) до 1 (что соответствует полной загрузке оборудования). Для температуры цехов приняты пределы, соответствующие крайним значениям температуры помещений цехов $+5 \div +35 \text{ }^\circ\text{C}$.

Первоначальные границы изменения факторов представлены в табл. 4.1.

Таблица 4.1

Первоначальные границы изменения факторов

Фактор	$X_{i\min}$	$X_{i\text{cp}}$	$X_{i\max}$	$\Delta X_i = \frac{X_{i\max} - X_{i\min}}{2}$
$x_1 \rightarrow l_{\text{cp}}, \text{ м}$	10	55	100	45
$x_2 \rightarrow n$	10	15	20	5
$x_3 \rightarrow r_{320}, \text{ мОм/м};$ ($S \rightarrow \text{мм}^2$)	0,261	1,108	1,956	0,848
$x_4 \rightarrow k_3^2$	0,09	0,545	1,00	0,455
$x_5 \rightarrow \theta_0, \text{ }^\circ\text{C}$	5	20	35	15

Таким образом, эквивалентное сопротивление радиальных сетей вычисляем по выражению, в котором представлены все влияющие факторы, впервые обновленные в наших исследованиях [244]:

$$R = \{r_{320} \cdot l[1 + 0,004(\theta_{\text{ж}} - 20)] + \sum r_k\} \cdot 1/n, \quad (4.11)$$

$$\theta_{\text{ж}} = k_3^2(80 - \theta_0) + \theta_0, \quad (4.12)$$

где $\theta_{\text{ж}}$ – температура жилы кабеля, 80 – допустимая температура нагрева жилы кабеля.

Предварительно для качественного определения вида связи (линейная или нелинейная) между результативным и факториальными признаками в плоскости последних были построены корреляционные поля точек (рис. 4.1), из анализа которых был сделан вывод о том, что зависимости эквивалентного сопротивления от рассматриваемых обобщенных характеристик по своему характеру близки к линейным в выбранном факторном пространстве, что впервые обосновано в работах [52; 58].

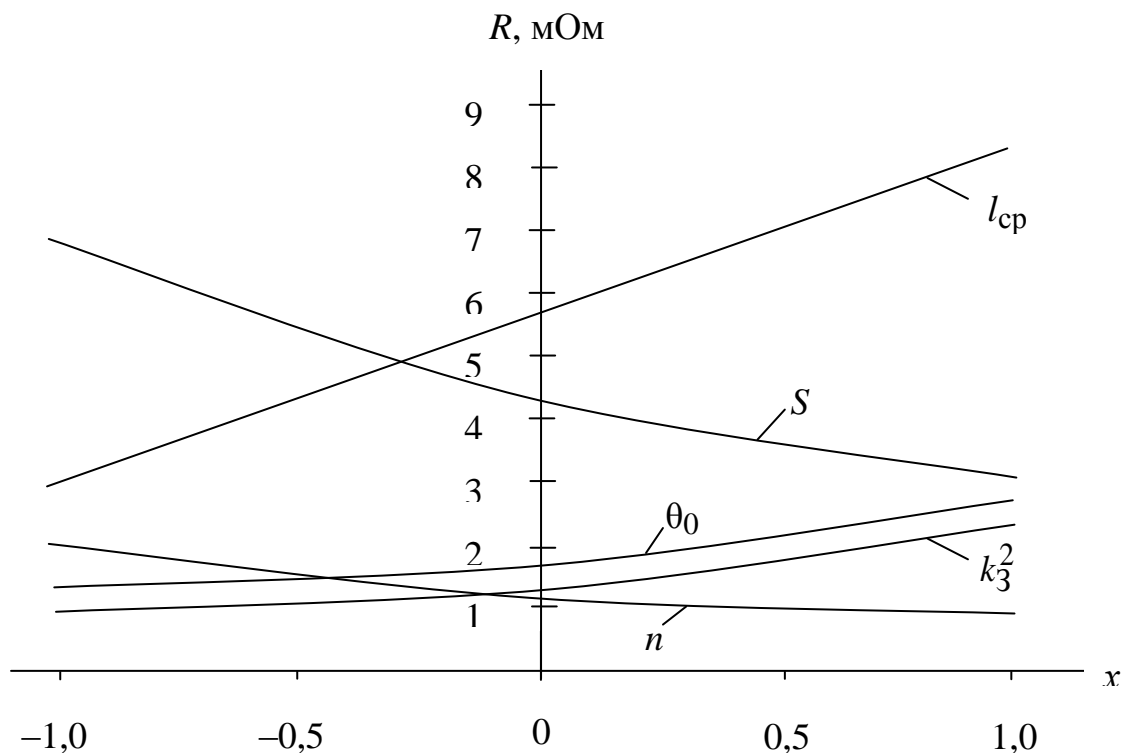


Рис. 4.1. Зависимости результирующего показателя от факториальных признаков

Физический смысл линейной модели регрессии состоит в постоянстве удельных приростов зависимой переменной при изменении факторов – аргументов, т. е.

$$\frac{\partial y_i}{\partial x_i} = b_i = \text{const.}$$

Для многофакторной корреляционной модели рассматривается следующая форма связи результативного показателя с факториальными:

$$\begin{aligned} Y = & b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_4 x_4 + b_5 x_5 + b_{12} x_1 x_2 + \\ & + b_{13} x_1 x_3 + b_{14} x_1 x_4 + b_{15} x_1 x_5 + b_{23} x_2 x_3 + b_{24} x_2 x_4 + \\ & + b_{25} x_2 x_5 + b_{34} x_3 x_4 + b_{35} x_3 x_5 + b_{45} x_4 x_5. \end{aligned} \quad (4.13)$$

4.3. Методы планирования эксперимента для разработки математических моделей потерь электроэнергии в зависимости от основных параметров электрооборудования

Для реализации задачи интерполяции используем дробный факторный эксперимент [156] типа 2^{5-1} с генерирующим соотношением $x_5 = x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \cdot x_4$. Этот план позволяет разделить линейные эффекты и парные взаимодействия. Тройными и выше взаимодействиями (4.13) пренебрегаем. Матрица планирования представлена в табл. П.В.1 Приложения В. Значения функции цели при различных диапазонах варьирования факторов вычисляем, используя выражение (4.11)–(4.12) применительно к радиальной сети.

В уравнении (4.13) коэффициенты $b_0 \dots b_{45}$ – искомые коэффициенты уравнения регрессии, вычисляемые по методу наименьших квадратов [104]:

$$b_i = \frac{\sum_{u=1}^N y_u \cdot x_{iu}}{N}; \quad b_{ij} = \frac{\sum_{u=1}^N y_u \cdot x_{iu} \cdot x_{ju}}{N}, \quad (4.14)$$

где i, j – номера факторов; x_i, x_j – кодированные значения факторов (+1 или -1); y_u – значение выходной величины (потерь мощности и эквивалентного сопротивления); u – номер опыта; N – число опытов (в нашем случае $N = 16$).

Так как каждый фактор (кроме x_0) варьируется на двух уровнях: +1 и -1, то вычисления сводятся к приписыванию столбцу Y знаков соответствующего фактору столбца и алгебраическому сложению полученных значений. Деление результата на число опытов в матрице планирования (табл. П.В.1 Приложения В) дает искомый коэффициент.

Представленный алгоритм расчета впервые реализован в работе [58].

После вычисления значений коэффициентов b_i и b_{ij} полином (4.13) примет вид регрессионных зависимостей R_3 – эквивалентного сопротивления цеховой сети и ΔP – потерь мощности:

$$\begin{aligned}
 R_3 = & 5,4 + 4,2 x_1 - 1,7 x_2 - 3,9 x_3 + 0,53 x_4 + 0,23 x_5 - \\
 & - 1,3 x_1 x_2 - 3,19 x_1 x_3 + 0,44 x_1 x_4 + 0,22 x_1 x_5 + \\
 & + 1,22 x_2 x_3 - 0,24 x_2 x_4 - 0,35 x_2 x_5 - 0,4 x_3 x_4 - \\
 & - 0,23 x_3 x_5 + 0,95 x_4 x_5;
 \end{aligned} \tag{4.15}$$

$$\begin{aligned}
 \Delta P = & 48 + 36,4 x_1 - 16 x_2 + 11,2 x_3 + 41,5 x_4 + \\
 & + 3,34 x_5 - 12 x_1 x_2 + 11 x_1 x_3 + 31,4 x_1 x_4 + \\
 & + 11,05 x_1 x_5 + 3,62 x_2 x_3 - 13,9 x_2 x_4 - 9,6 x_2 x_5 + \\
 & + 9,8 x_3 x_4 + 10,5 x_3 x_5 + 3,53 x_4 x_5.
 \end{aligned} \tag{4.16}$$

При использовании полученного уравнения необходимо отбросить члены с незначимыми коэффициентами. Равенство нулю дисперсии воспроизводимости и «нестатический» характер задачи не позволяют применить здесь стандартную процедуру с использованием критерия

Стьюдента. Вместе с тем нет никакой необходимости загромождать полином лишними членами.

Поэтому в рассматриваемой задаче проводились расчеты в ряде дополнительных точек факторного пространства и полученные в них разности $\left| R_3 - \hat{R} \right|$ и $\left| \Delta P - \hat{\Delta P} \right|$ (значком $\hat{\quad}$ обозначены значения, предсказанные аппроксимирующим выражением) использовались в качестве основы для формальной процедуры исключения незначимых коэффициентов, выбрасывание которых лишь весьма слабо влияло на величину указанных разностей. Результаты вычислений представлены в табл. П.В.2 Приложения В.

Как видно из табл. П.В.2, относительная погрешность расчетов эквивалентного сопротивления сети по уравнению регрессии не превышает 10,5 %, что позволяет отнести данные полиномы к классу точных.

Таким образом, после исключения незначимых коэффициентов $b_{15} = 0,22$; $b_{25} = -0,35$; $b_{35} = -0,23$, отражающих взаимное влияние длины, количества, сечения линий и температуры окружающей среды, в полиноме (4.15) и $b_{15} = -11,05$; $b_{25} = -9,6$; $b_{45} = 3,53$ в полиноме (4.16) они примут следующий вид:

$$\begin{aligned}
 R_3 = & 5,4 + 4,2 x_1 - 1,7 x_2 - 3,9 x_3 + 0,53 x_4 + \\
 & + 0,23 x_5 - 1,3 x_1 x_2 - 3,19 x_1 x_3 + 0,44 x_1 x_4 + \\
 & + 1,22 x_2 x_3 - 0,24 x_2 x_4 - 0,4 x_3 x_4 + 0,95 x_4 x_5;
 \end{aligned} \tag{4.17}$$

$$\begin{aligned}
 \Delta P = & 48 + 36,4 x_1 - 16 x_2 + 11,2 x_3 + 41,5 x_4 + \\
 & + 3,34 x_5 - 12 x_1 x_2 + 11 x_1 x_3 + 31,4 x_1 x_4 + 3,62 x_2 x_3 - \\
 & - 13,9 x_2 x_4 + 9,8 x_3 x_4 + 10,5 x_3 x_5.
 \end{aligned} \tag{4.18}$$

Из полученных выражений (4.17), (4.18) следует, что длина, количество линий и их сечения приблизительно одинаково влияют на величину

эквивалентного сопротивления радиальной сети. Слабее влияют параметры загрузки линий и температуры окружающей среды, но вклад, вносимый их парным взаимодействием ($b_{45} = 0,95$), ощутим.

По полиномиальной модели (4.17) построены номограммы, представленные на рис. П.В.1–П.В.7 в Приложении В. Номограммы построены для различных значений средней длины линий, загрузки и температуры окружающей среды.

Для определения эквивалентного сопротивления сети по оси абсцисс требуется отложить значение суммарной величины сечения линий ($s \cdot n$) и по кривой соответствующего коэффициента загрузки линий на оси ординат найти искомое значение.

Получив значения коэффициентов для кодированных факторов, можно перейти к записи полиномов в натуральных величинах. Для преобразования воспользуемся выражением

$$\tilde{x}_i = \frac{x_i - x_{i0}}{\Delta x_i},$$

где \tilde{x}_i – кодированное значение фактора; x_i – действительное значение фактора; x_{i0} – нулевой уровень фактора; Δx_i – шаг варьирования фактора.

Ниже приводятся значения кодированных факторов:

$$x_1 = \frac{l_{\text{ср}} - 55}{45} = \frac{l_{\text{ср}}}{45} - 1,22;$$

$$x_2 = \frac{n - 15}{5} = \frac{n}{5} - 3;$$

$$x_3 = \frac{r_{\text{э}20} - 1,108}{0,848} = \frac{r_{\text{э}20}}{0,848} - 1,3;$$

$$x_4 = \frac{k_3^2 - 0,545}{0,455} = \frac{k_3^2}{0,455} - 1,199;$$

$$x_5 = \frac{\theta_0 - 20}{15} = \frac{\theta_0}{15} - 1,33.$$

После подстановки указанных значений кодированных факторов в уравнения регрессии и преобразований получим полиномы в натуральном масштабе, которые будут иметь вид

$$\begin{aligned}
 R_3 = & 2,5 + 1,3 \cdot l_{\text{cp}} - 0,01 \cdot n - 6,5 \cdot 10^{-4} \cdot s + 0,16 \cdot k_3^2 + \\
 & + 0,002 \cdot \theta_0 - 6,5 \cdot 10^{-4} \cdot l_{\text{cp}} \cdot n + 1,7 \cdot 10^{-6} \cdot l_{\text{cp}} \cdot s + \\
 & + 0,003 \cdot l_{\text{cp}} \cdot k_3^2 - 4,03 \cdot 10^{-5} \cdot n \cdot s - 0,007 \cdot n \cdot k_3^2 - \\
 & - 1,5 \cdot 10^{-4} \cdot s \cdot k_3^2 + 1,9 \cdot 10^{-3} \cdot k_3^2 \cdot \theta_0; \quad (4.19)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \Delta P = & 5,47 + 0,1 \cdot l_{\text{cp}} - 0,3 \cdot n + 0,1 \cdot s + 15,9 \cdot k_3^2 + \\
 & + 0,9 \cdot \theta_0 - 0,01 \cdot l_{\text{cp}} \cdot n + 0,002 \cdot l_{\text{cp}} \cdot s + 0,3 \cdot l_{\text{cp}} \cdot k_3^2 + \\
 & + 0,01 \cdot n \cdot s - 1,5 \cdot n \cdot k_3^2 + 0,3 \cdot s \cdot k_3^2 + 0,003 \cdot s \cdot \theta_0, \quad (4.20)
 \end{aligned}$$

где входящие в полиномы величины имеют следующие размерности:

$$R_3 - [\text{МОм}];$$

$$\Delta P - [\text{кВт}];$$

$$l_{\text{cp}} - [\text{м}];$$

$$r_{320} - [\text{МОм/м}] (S \rightarrow \text{мм}^2);$$

$$\theta_0 - [^\circ\text{C}].$$

Для магистральных сетей, в качестве которых рассматриваются распределительные шинопроводы параметрами, определяющими потери ЭЭ и эквивалентное сопротивление, выступают такие величины, как длина шинопровода, количество приемников, подключенных к шинопроводу и т. д.

Потери мощности в магистральных сетях определяются по выражению

$$\Delta P_{\text{ш}} = 3I_{\text{Э}}^2 R_{\text{Эш}}, \quad (4.21)$$

где $R_{\text{Эш}}$ – эквивалентное сопротивление шинопровода, вычисляемое из уравнения:

$$R_{\text{эш}} = \left[r_{20} \cdot l \cdot \frac{1}{6} (1 + 1/n)(2 + 1/n) + r_{\text{п}} / n \right] \cdot [1 + \alpha(\theta - \theta_0)] + r_{\text{к}} / n, \quad (4.22)$$

предложенного нами [53; 246].

Здесь: r_{20} – сопротивление 1 м шинпровода при 20 °С, мОм;

l – длина шинпровода, м;

n – количество приемников, присоединенных к шинпроводу;

$r_{\text{п}}$ – сопротивление провода ответвления от шинпровода, мОм;

$I_{\text{э}}$ – эффективный ток, А;

$r_{\text{к}}$ – сопротивление коммутационного аппарата ответвления, мОм;

α – температурный коэффициент увеличения сопротивления, 1 / °С;

θ – температура шинпровода, °С;

θ_0 – температура окружающей среды, °С.

В качестве факторов используем следующие обобщенные параметры:

x_1 – суммарная длина шинпровода, l , м;

x_2 – величина, равная количеству присоединенных к шинпроводу приемников, n ;

x_3 – величина, равная r_{20} , где $r_{20} = 52 / I_{\text{н}}$, мОм/м ($I_{\text{н}}$ – номинальный ток шинпровода, А); отношение $52 / I_{\text{н}}$ представляет собой сопротивление 1 м шинпровода при 20 °С;

x_4 – квадрат коэффициента загрузки шинпровода, k_3^2 ;

x_5 – температура окружающей среды, θ_0 , °С.

При известных величинах номинального тока шинпровода, коэффициента загрузки шинпровода, известном количестве присоединенных приемников можно определить ток, потребляемый одним приемником, по выражению:

$$I_{\text{п}} = \frac{I_{\text{н}}}{n}.$$

В соответствии с током приемника определяется сопротивление коммутационного аппарата ответвления (табл. 3.2) и сопротивление провода ответвления от шинпровода к приемнику (длина ответвительного провода принимается равной в среднем 2 м).

Средние и граничные уровни каждого фактора представлены в табл. 4.2. Диапазоны изменения обусловлены взаимосвязью таких факторов, как длина шинпровода и количество присоединенных приемников.

Матрица планирования ДФЭ приведена в табл. П.В.3 Приложения В. Значения функций цели – потери мощности и эквивалентного сопротивления шинпровода – вычислены в соответствии с выражениями (4.21) и (4.22).

Таблица 4.2

Уровни варьирования факторов

Фактор	X_{imin}	X_{icp}	X_{imax}	$\Delta X_i = \frac{X_{imax} - X_{imin}}{2}$
$x_1 \rightarrow l, \text{ м}$	14	32	50	18
$x_2 \rightarrow n$	8	11	14	3
$x_3 \rightarrow r_{20}, \text{ мОм/м}$	0,085	0,143	0,200	0,058
$x_4 \rightarrow k_3^2$	0,250	0,625	1,00	0,375
$x_5 \rightarrow \theta_0, \text{ }^\circ\text{C}$	5	20	35	15

Для исключения незначимых коэффициентов и вычисления разностей

$$\left| R_{\text{ЭШ}}^{\wedge} - R_{\text{ЭШ}} \right|, \left| \Delta P_{\text{Ш}}^{\wedge} - \Delta P_{\text{Ш}} \right|, \text{ а также для оценки погрешности моделей } \delta_R, \delta_{\Delta P}$$

произведем расчеты значений функции цели в дополнительных точках. Результаты вычислений представлены в табл. П.В.4 Приложения В.

После вычисления значений коэффициентов b_i и b_{ij} по формуле (4.14) и исключения незначимых коэффициентов $b_{23} = 0,089$; $b_{25} = -0,0025$; $b_{45} = -0,01$ уравнение регрессии для определения эквивалентного сопротивления магистральных сетей будет

$$R_{\text{эш}} = 5,31 + 1,19 x_1 - 0,074 x_2 - 2,27 x_3 - 0,63 x_4 + \\ + 0,32 x_5 - 0,083 x_1 x_2 - 0,41 x_1 x_3 + 0,15 x_1 x_4 - \\ - 0,31 x_1 x_5 + 0,24 x_2 x_4 + 0,18 x_3 x_4 - 0,18 x_3 x_5. \quad (4.23)$$

После вычисления значений коэффициентов b_i и b_{ij} по формуле (4.14) и исключения незначимых коэффициентов $b_{15} = 196,3$; $b_{25} = 144,7$; $b_{35} = -1,0$ уравнение регрессии для определения потерь мощности будет иметь вид:

$$\Delta P_{\text{ш}} = 1349,0 + 410,1 x_1 - 0,4 x_2 + 471,5 x_3 + 675,8 x_4 + \\ + 68,8 x_5 - 20,6 x_1 x_2 + 196,3 x_1 x_3 + 285,3 x_1 x_4 + 21,7 x_2 x_3 + \\ + 4,6 x_2 x_4 + 214,3 x_3 x_4 + 28,7 x_4 x_5. \quad (4.24)$$

Таким образом, наибольшее влияние на эквивалентное сопротивление шинпровода оказывают его длина (коэффициент при факторе x_1 (длина) $b_1 = 1,19$) и удельная мощность (при факторе x_3 (мощность) $b_3 = 2,27$).

Причем при росте загрузки шинпровода (без изменения количества присоединенных приемников) увеличивается ток, потребляемый одним приемником, что приводит к уменьшению сопротивлений ответвительного провода и коммутационного аппарата ответвления. Этим объясняется уменьшение эквивалентного сопротивления шинпровода при росте его загрузки.

По результатам расчетов, представленным в табл. П.В.4, видно, что относительная погрешность вычислений эквивалентного сопротивления

шинопровода по уравнению регрессии не превышает 6,7 %, что позволяет отнести данный полином к классу точных.

По полиномиальной модели (4.23) построены номограммы, представленные на рис. П.В.8–П.В.16 в приложении В. Номограммы построены для различных значений длины шнопровода, его загрузки и температуры окружающей среды. Кроме вышеперечисленных величин эквивалентное сопротивление является функцией значения $(s \cdot n)$, где s – сечение шнопровода, n – количество присоединенных приемников.

А наибольшее влияние на потери мощности в шнопровode оказывают его длина (коэффициент при факторе x_1 (длина) $b_1 = 410,1$), удельная мощность (коэффициент при факторе x_3 (мощность) $b_3 = 471,5$) и загрузка шнопровода (при факторе x_4 (коэффициент загрузки) $b_4 = 675,8$). Менее сильно влияют количество присоединенных к шнопроводу приемников и температура окружающей среды.

Преобразуем полиномы (4.23) и (4.24) к виду в натуральных величинах. Ниже приводятся значения кодированных факторов:

$$x_1 = \frac{l}{18} - 1,78;$$

$$x_2 = \frac{n}{3} - 3,7;$$

$$x_3 = \frac{r_{20}}{0,058} - 2,47;$$

$$x_4 = \frac{k_3^2}{0,375} - 1,67;$$

$$x_5 = \frac{\theta_0}{15} - 1,33.$$

После преобразований полиномы в натуральном масштабе будут иметь вид

$$\begin{aligned}
 R_{\text{ЭШ}} = & 8,47 + 0,147 \cdot l - 11,7 / n - 2,76 \cdot r_{20} - 5,83 \cdot k_3^2 + \\
 & + 0,088 \cdot \theta_0 - 0,164 \cdot l / n - 0,392 \cdot l \cdot r_{20} + 0,022 \cdot l \cdot k_3^2 + \\
 & + 22,8 \cdot k_3^2 / n - 8,29 k_3^2 r_{20} - 0,208 \cdot \theta_0 r_{20};
 \end{aligned} \tag{4.25}$$

$$\begin{aligned}
 \Delta P_{\text{Ш}} = & 5213,9 + 5,1 \cdot l - 3938,1 / n + 9052,3 \cdot r_{20} + \\
 & + 1494,7 \cdot k_3^2 + 359,3 \cdot \theta_0 - 40,9 \cdot l / n + 188,0 \cdot l \cdot r_{20} + \\
 & + 42,3 \cdot l \cdot k_3^2 + 438,1 \cdot k_3^2 / n + 9852,9 \cdot k_3^2 \cdot r_{20} - \\
 & - 13362 \cdot n \cdot r_{20} + 5,1 \cdot \theta_0 k_3^2,
 \end{aligned} \tag{4.26}$$

где входящие в полиномы величины имеют следующие размерности:

$$R_{\text{ЭШ}} - [\text{МОм}];$$

$$\Delta P_{\text{Ш}} - [\text{кВт}];$$

$$l - [\text{м}];$$

$$r_{20} - [\text{МОм/м}];$$

$$\theta_0 - [^\circ\text{C}].$$

Для определения эквивалентного сопротивления смешанных схем требуется выделить радиальные и магистральные участки сети. Затем при помощи соответствующих номограмм найти эквивалентные сопротивления выделенных радиальных и магистральных участков – $R_{\text{Э(р)}}$ и $R_{\text{Э(м)}}$. Эквивалентное сопротивление смешанной схемы сети при параллельном соединении радиального и магистрального участка определится как

$$R_{\text{Э(см)}} = \frac{R_{\text{Э(р)}} \cdot R_{\text{Э(м)}}}{R_{\text{Э(р)}} + R_{\text{Э(м)}}.$$

4.4. Моделирование погрешности расчета эквивалентных сопротивлений цеховых сетей с использованием метода статистических испытаний

В практике расчетов потерь мощности и электроэнергии в цеховых сетях получил распространение метод эквивалентного сопротивления [218].

Эквивалентное сопротивление низковольтных радиальных сетей предлагается вычислять по выражению (4.11).

Непосредственное применение формулы (4.11) для расчета эквивалентных сопротивлений значительного числа цеховых линий, например в объеме крупного промышленного предприятия, практически невозможно из-за отсутствия достоверной информации о коэффициентах загрузки многочисленных цеховых линий.

Множество возможных конфигураций реальных электрических сетей укладывается в две граничные схемы: радиальную (рис. 4.2) и магистральную (распределительный шинопровод) (рис. 4.3). Этим же схемам соответствуют экстремальные значения коэффициента разветвленности и погрешности расчета эквивалентных сопротивлений линий. Отметим, что эквивалентное сопротивление магистральной линии (распределительного шинопровода) определяется согласно выражению (4.22).

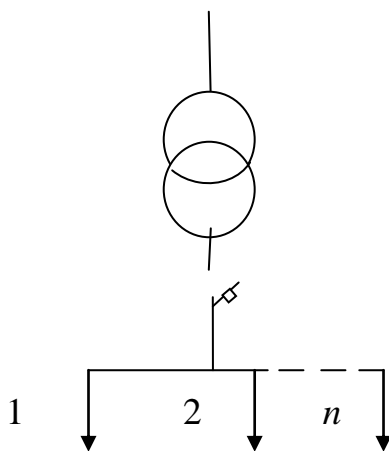


Рис. 4.2. Радиальная схема

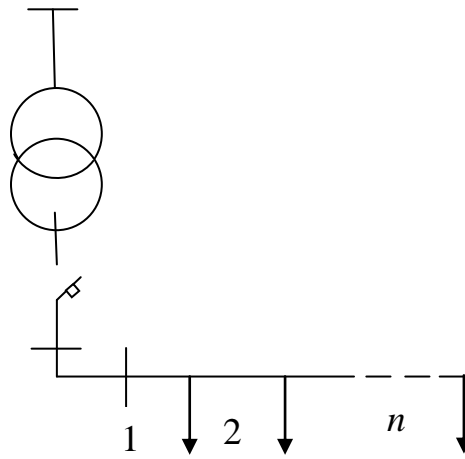


Рис. 4.3. Магистральная схема – распределительный шинопровод

Рассматривая коэффициент загрузки линий сети как случайную величину, будем использовать для исследования погрешностей метод статистических испытаний (Монте-Карло). На основе этого метода разработан алгоритм оценки погрешностей расчета эквивалентных сопротивлений. По этому алгоритму для конкретной схемы электрической сети с числом линий, равным n , разыгрывается случайная величина коэффициента загрузки линий k_{3j} ($j = \overline{1, n}$) из совокупности возможных ее значений, подчиняющихся нормальному закону распределения, с соответствующими математическим ожиданием $M(k_3)$ и среднеквадратическим отклонением $\sigma(k_3)$. Используем последовательность n псевдослучайных чисел ξ_i ($i = \overline{1, n_c}$) с равномерным законом распределения в интервале $[0, 1]$, которые формируются посредством модели источника случайного сигнала с равномерным распределением Uniform Random Number из библиотеки блоков Simulink на рис. 4.4. По этой последовательности чисел посредством линейного преобразования определяем случайную величину k_3 , имеющую принятый закон распределения. Для задания необходимых значений используются блоки Constant, для совершения арифметических операций блоки Fcn, Product (умножение) и Sum (сумма), согласно выражению (4.27):

$$k_{3j} = 3n_c^{-1}\sigma(k_3) \sum_{i=1}^{n_c} (2\xi_i - 1) + M(k_3), \quad j = \overline{1, n}. \quad (4.27)$$

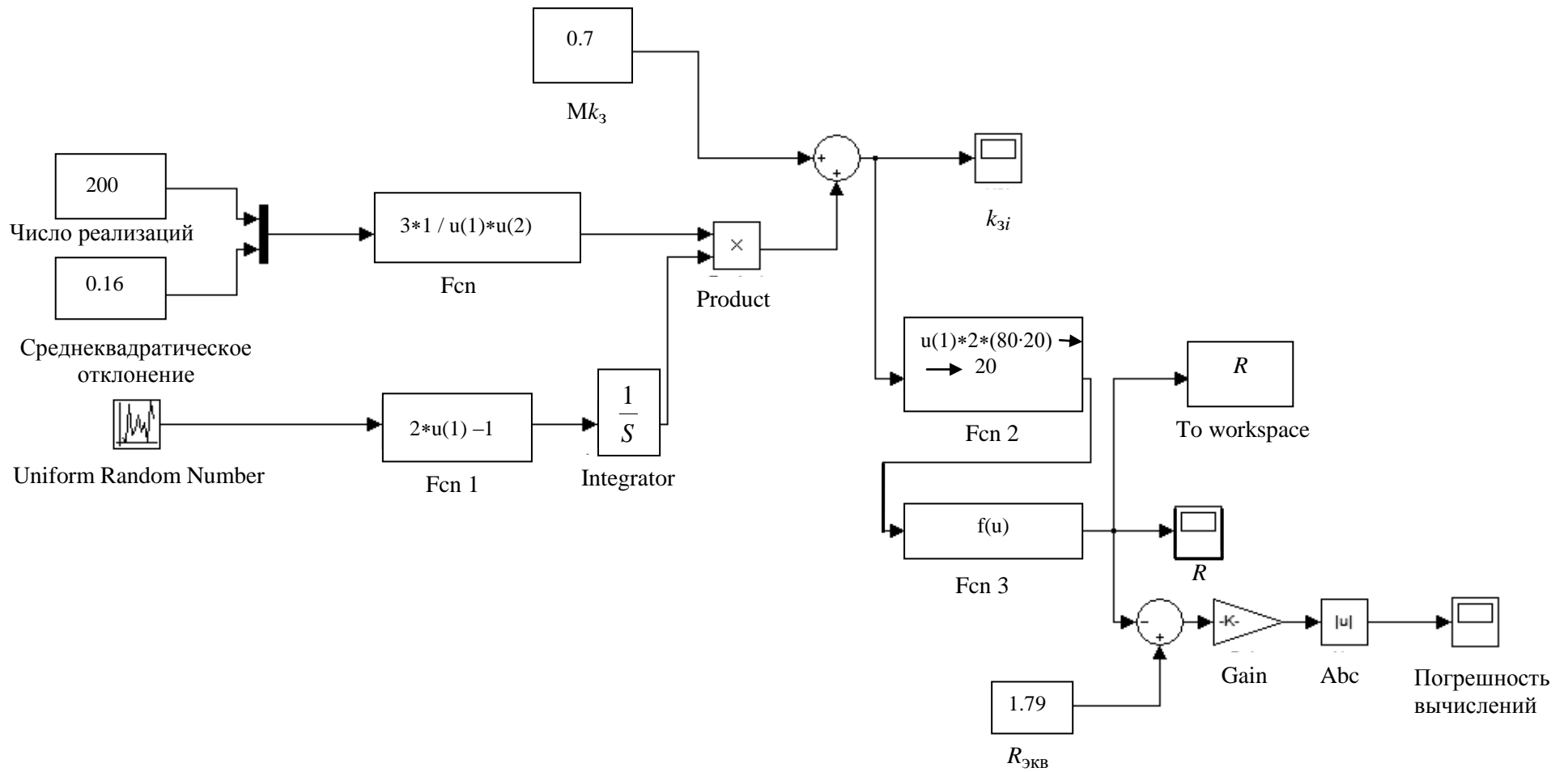


Рис. 4.4. Модель для расчета погрешности оценки эквивалентных сопротивлений

Производится расчет погрешности вычислений путем сравнения значений эквивалентных сопротивлений R_3 , полученных методом статических испытаний (Монте-Карло) и значений, полученных по выражению (4.11). Рассчитанные данные выводятся на осциллограф.

Затем, с учетом разыгранных значений k_{3j} по выражению (4.27) определяем эквивалентные сопротивления R_3 .

Таким образом, выполняется первая реализация, в результате которой моделируется один из возможных режимов электрической сети. На следующем шаге описанная процедура повторяется и моделируется второй режим, но уже с другими случайными значениями k_{3j} , которые выбираются из той же совокупности.

Указанный процесс повторяется N_0 раз (N_0 – предварительно выбранное число реализаций; в расчетах оно принималось равным 200).

По изложенному алгоритму составлена модель в программной среде Matlab и выполнены расчеты погрешностей определения эквивалентного сопротивления для радиальной схемы при различном числе участков сети (от 10 до 20). Для магистральных схем расчет аналогичен при этом использовались следующие исходные данные $M(k_3) = 0,7$, $\sigma(k_3) = 0,16$.

Фиксированные значения коэффициента загрузки примем в качестве исходных для оценки погрешности эквивалентного сопротивления. При этом погрешность определения эквивалентного сопротивления:

$$\delta = \frac{k_{3\phi} - k_{3c}}{k_{3\phi}} \cdot 100 \%,$$

где $k_{3\phi}$ – фиксированное значение коэффициента загрузки;

k_{3c} – случайное значение коэффициента загрузки.

Результаты моделирования представлены на рис. 4.5–4.7.

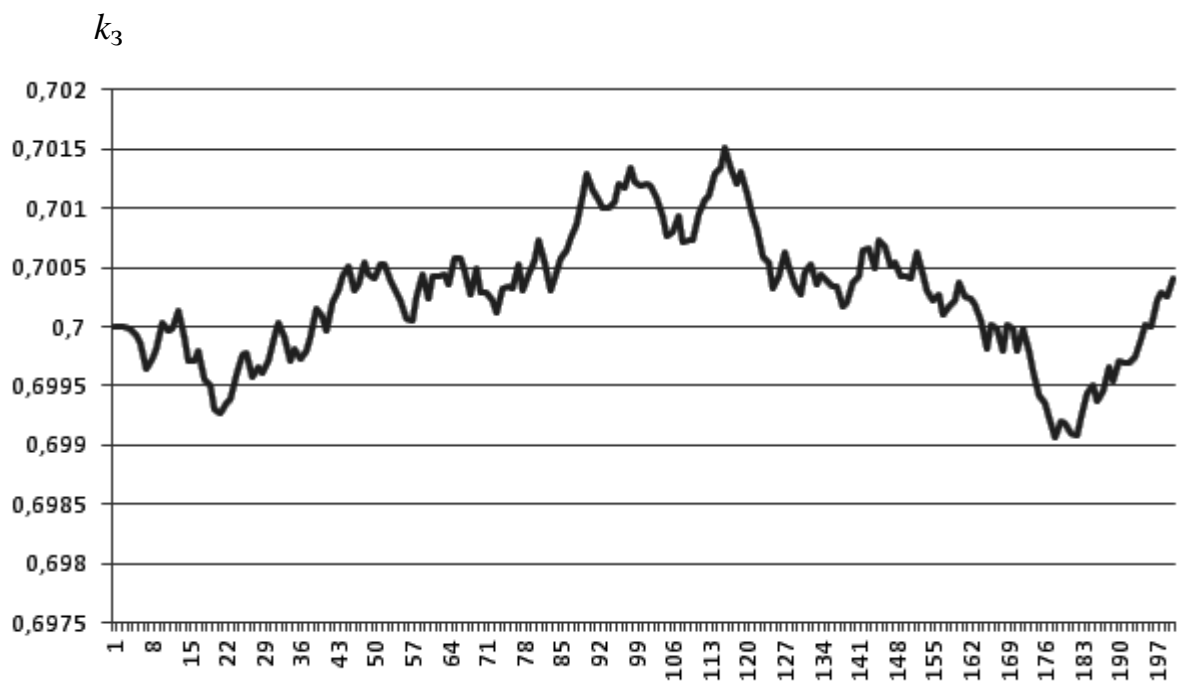


Рис. 4.5. Разыгранные случайные значения k_3 (—)
при числе реализаций, равном 200



Рис. 4.6. Значения эквивалентного сопротивления $R_3, \text{МОм}$ (—)
при числе реализаций, равном 200, при $n = 10$



Рис. 4.7. Погрешность вычислений δ (%) (—) значения эквивалентного сопротивления R_3 при числе реализаций, равном 200, при $n = 10$

4.5. Применение методики оценки величины потерь электроэнергии в низковольтных цеховых сетях

Одной из важнейших характеристик функционирования внутрицеховых сетей промышленного электроснабжения является уровень потерь ЭЭ.

Снижение потерь ЭЭ в современных условиях быстрого роста стоимости энергоносителей является актуальной задачей общего комплекса энергосберегающих мероприятий. ЭЭ является единственным видом продукции, транспортировка которой осуществляется за счет потери определенной части самой продукции, поэтому потери при ее передаче неизбежны и возникает необходимость в определении их достоверного значения.

Цеховые сети напряжением до 1000 В вследствие их большой протяженности характеризуются высокими значениями потерь ЭЭ. Непосредственное их измерение вызывает определенные трудности и

существенную ошибку в результатах. Поэтому наиболее точный способ определения потерь ЭЭ – расчетный, который широко применяется на практике [1; 4; 5; 84–88].

Потери ЭЭ для участка трехфазной сети определяются по известному выражению (2.10).

Общеизвестно, что сопротивление участка сети зависит от марки, сечения и длины провода, температуры его токопроводящей жилы, являющейся функцией температуры окружающей среды и нагрузки провода.

При этом установлено, что линии цеховых сетей имеют большое количество последовательных узлов с коммутационной аппаратурой при небольшой протяженности линий, и при этом сопротивление коммутационных аппаратов оказывается соизмеримым с сопротивлением линии [244; 246; 248].

В связи с этим исследуем изменение сопротивления коммутационных аппаратов при эксплуатации, а также влияние увеличения сопротивления коммутационных аппаратов на потери ЭЭ в цеховой сети.

Расчет проводится по схеме цеховой сети канализационной насосной станции (рис. 4.8).

В цеховой сети канализационной насосной станции (рис. 4.8) установлены следующие коммутационные аппараты: автоматический выключатель АЕ2026-10 ($I_H = 16 \text{ А}$), магнитный пускатель с контактным блоком мгновенного действия ПМЛ1100+ПКЛ22 ($I_H = 10 \text{ А}$), магнитный пускатель ПМЛ2100 ($I_H = 25 \text{ А}$), пакетный выключатель ПВЗ-60 ($I_H = 40 \text{ А}$), автоматический выключатель трехфазный АП50Б-3МТ ($I_H = 63 \text{ А}$).

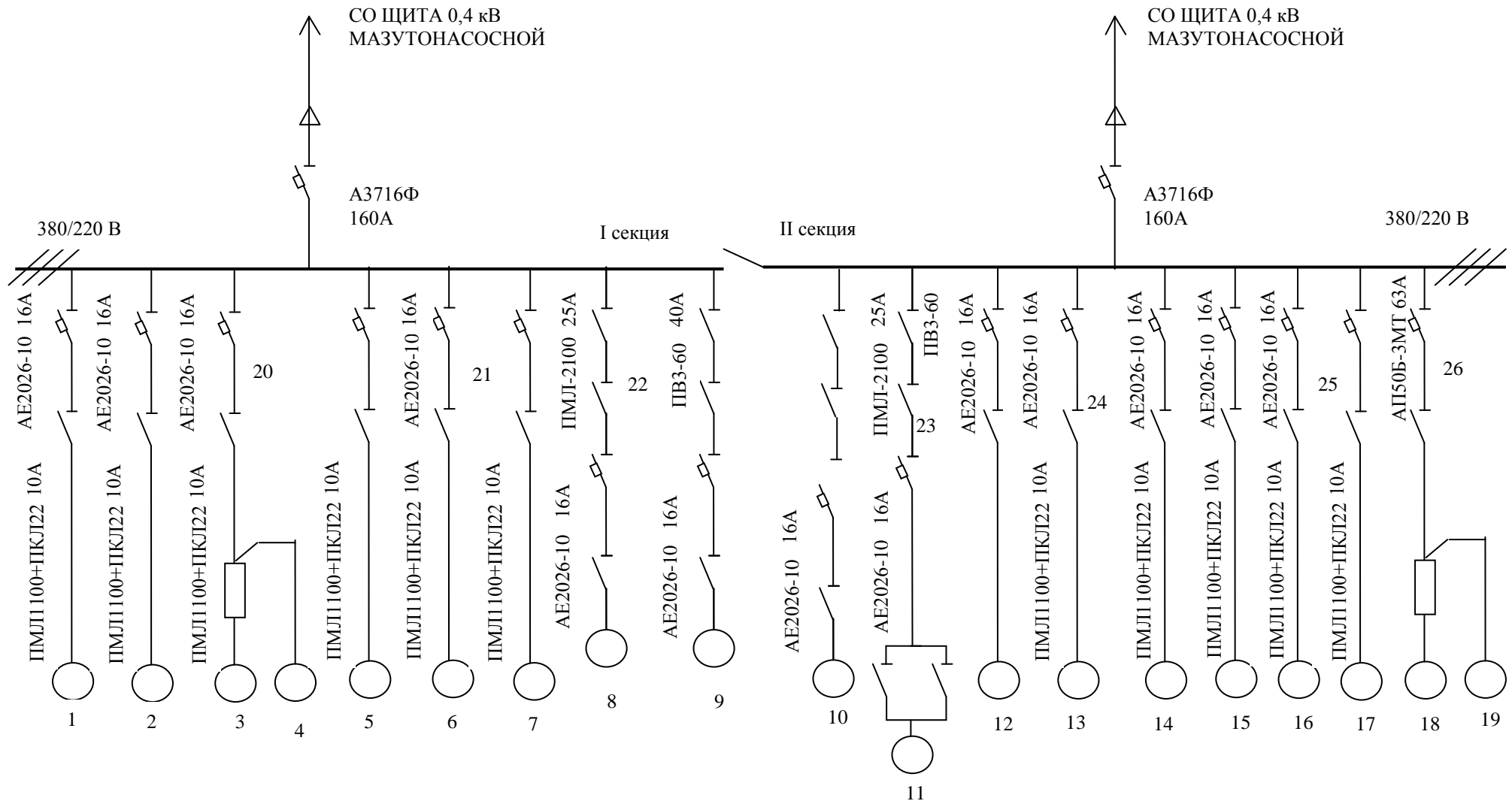


Рис. 4.8. Схема электрическая канализационной насосной станции

В табл. 4.3 указаны начальные значения сопротивления контактов и критическое значение сопротивления контактных соединений коммутационных аппаратов, впервые приведенные нами в работах [244; 66]:

$$R = \frac{307}{I_H} = \frac{307}{63} = 4,9 \text{ Ом (для АП50Б-3МТ);}$$

$$R_{кр} = 3 \cdot R_0 = 3 \cdot 4,9 = 14,6 \text{ Ом (для АП50Б-3МТ).}$$

Таблица 4.3

Данные для расчета надежности коммутационных аппаратов

№	Тип коммутационного аппарата	Номинальный ток I_H , А	Среднее начальное сопротивление r_{0cp} , Ом	Среднее критическое значение сопротивления $r_{кр}$, Ом	Средняя скорость изменения сопротивления v_{cp} , Ом/цикл
1	АЕ2026-10	16	21,8	65,4	$8 \cdot 10^{-6}$
2	ПВЗ-60	40	1,7	5,1	$8 \cdot 10^{-5}$
3	АП50Б-3МТ	63	4,9	14,6	$5 \cdot 10^{-7}$
4	ПМЛ1100	10	82,5	247,5	$4,8 \cdot 10^{-6}$
5	ПМЛ2100	25	33	99	$1,2 \cdot 10^{-5}$

Вычисляем коэффициенты вариации скорости и начального сопротивления соответственно S и S_1 , для автоматического выключателя АП50Б-3МТ по выражениям (3.42)–(3.45):

$$S = \frac{\sigma_v}{v_{cp}} = \frac{5 \cdot 10^{-7}}{5 \cdot 10^{-7}} = 1;$$

$$S_1 = \frac{\sigma_r}{r_{o.c.p}} = \frac{0,01}{4,87} = 0,002;$$

$$\theta_1 = \frac{3S_1 \cdot r_{o.c.p}}{v_{c.p}} = \frac{3 \cdot 0,002 \cdot 4,87}{5 \cdot 10^{-7}} = 0,06 \cdot 10^6;$$

$$\theta_2 = \frac{r_{кp} - r_{o.c.p}}{v_{c.p}} = \frac{14,6 - 4,87}{5 \cdot 10^{-5}} = 1,9.$$

В табл. П.В.7 Приложения В представлены данные для построения зависимости вероятности безотказной работы коммутационных аппаратов цеховой сети насосной станции от количества коммутационных циклов. Зависимость определяется по выражению (3.47) и представлена на рис. 4.9 и рис. 4.10:

$$\begin{aligned}
 P(z_1) &= 1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi z^2}} \left\{ \frac{\theta_1}{S} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{1 + \frac{\theta_1}{S}}{z} \right)^2 \right] + \right. \\
 &\quad \left. + \frac{\theta_2}{S} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{1 - \frac{\theta_2}{S}}{z} \right)^2 \right] \right\} = \\
 &= 1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi(10^3)^2}} \left\{ \frac{0,06 \cdot 10^6}{1} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{1 + \frac{0,06 \cdot 10^6}{10^3}}{1} \right)^2 \right] + \right. \\
 &\quad \left. + \frac{1,9 \cdot 10^6}{1} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{1 - \frac{1,9 \cdot 10^6}{10^3}}{1} \right)^2 \right] \right\} = 1.
 \end{aligned}$$

На графиках (рис. 4.9, 4.10) по одной оси абсцисс отложено число включений и отключений (циклов) коммутационных аппаратов за время эксплуатации, а по второй оси время эксплуатации аппаратов.

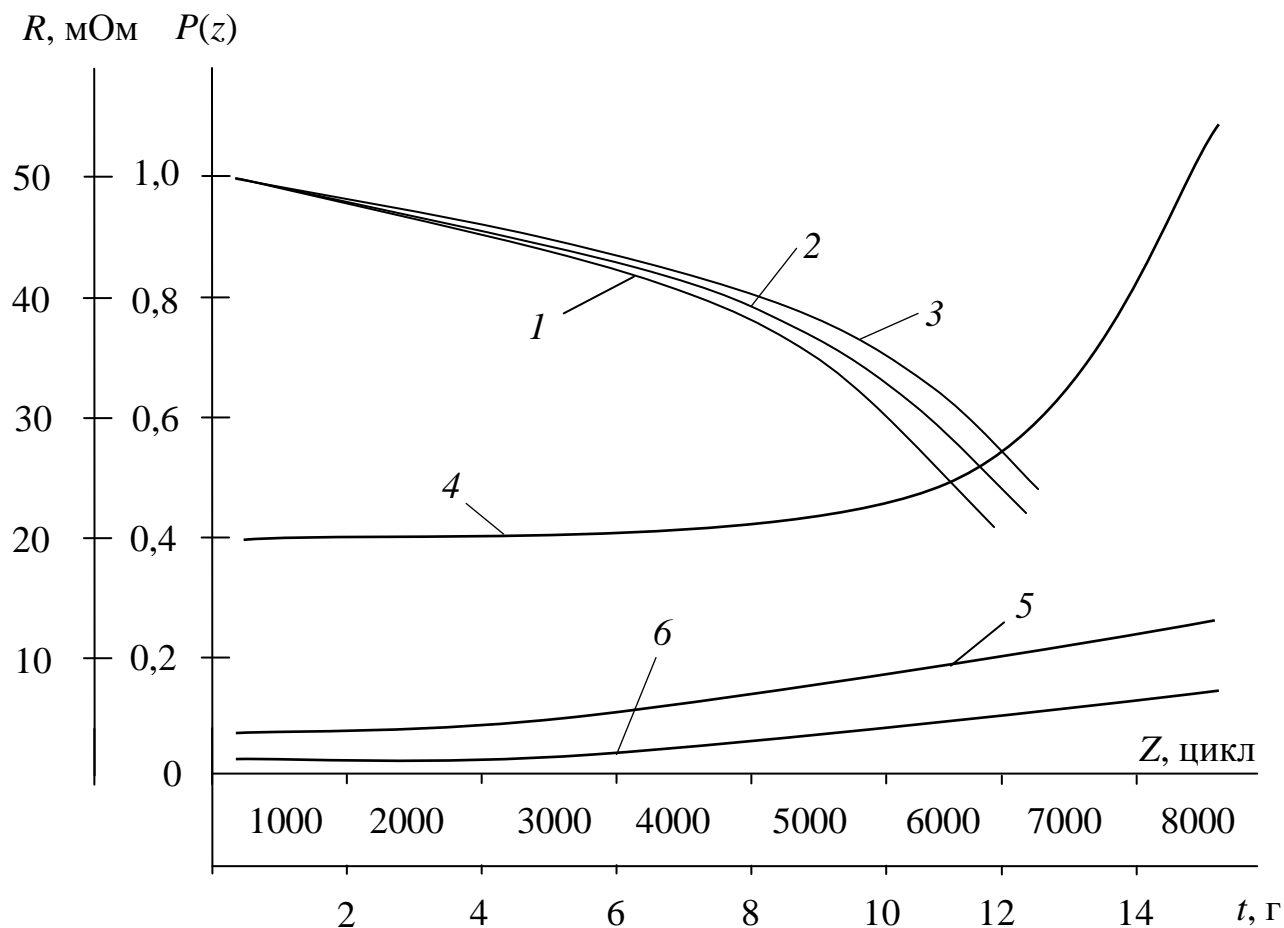


Рис. 4.9. Зависимости вероятности безотказной работы контактов автоматических и пакетных выключателей от количества коммутационных циклов:

1 – АЕ2026 ($I_H = 16$ А), 2 – ПВЗ-60 ($I_H = 40$ А), 3 – АП50Б-3МТ ($I_H = 63$ А);

зависимости сопротивления контактов автоматических и пакетных выключателей от количества коммутационных циклов:

4 – АЕ2026 ($I_H = 16$ А), 5 – ПВЗ-60 ($I_H = 40$ А), 6 – АП50Б-3МТ ($I_H = 63$ А)

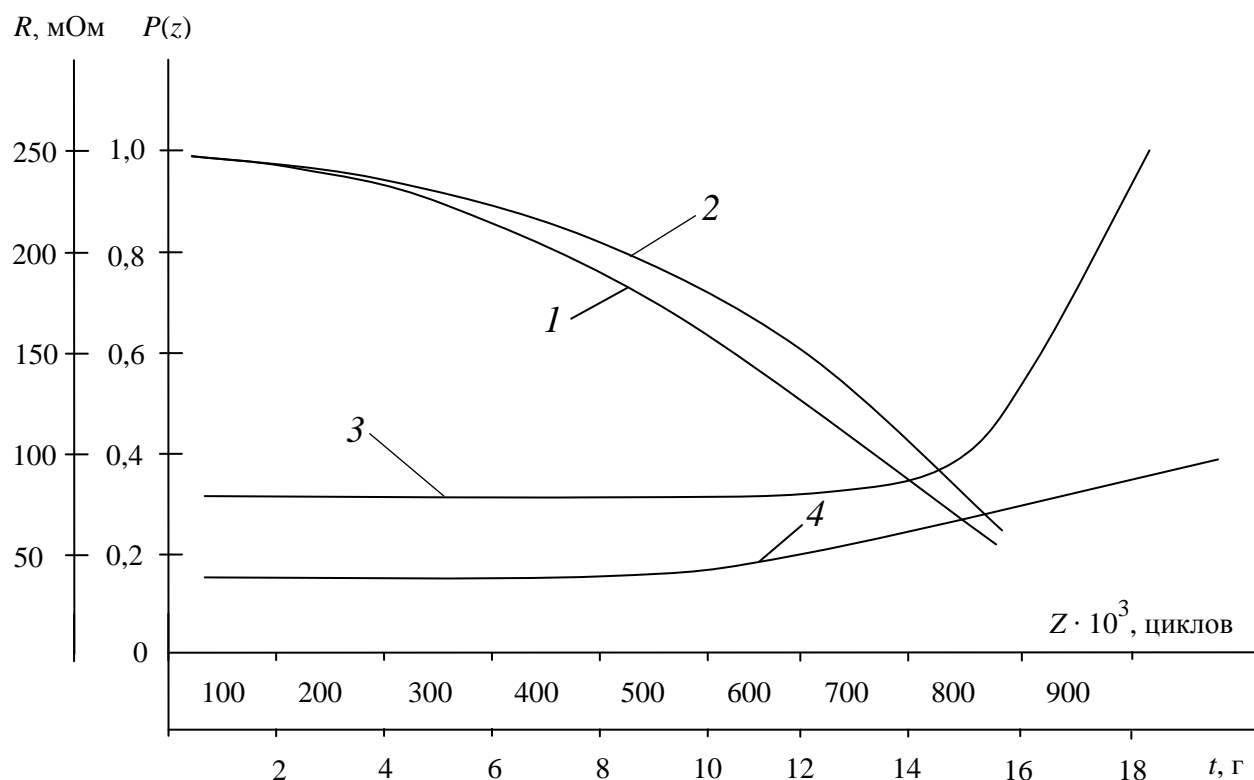


Рис. 4.10. Зависимости вероятности безотказной работы контактов магнитных пускателей от количества коммутационных циклов:

1 – ПМЛ1100 ($I_H = 10$ А), 2 – ПМЛ2100 ($I_H = 25$ А);

зависимости сопротивления контактов магнитных пускателей от количества коммутационных циклов:

3 – ПМЛ1100 ($I_H = 10$ А), 4 – ПМЛ2100 ($I_H = 25$ А)

Большинство автоматических выключателей и магнитных пускателей данных серий рассчитаны на срок службы в течение 20 лет. Кроме того, гарантийный срок эксплуатации автоматических выключателей колеблется в пределах от 2 до 5 лет, а к 10 годам службы проводятся плановые ремонты. Это подтверждают и полученные зависимости: вероятность безотказной работы выключателей в первые 5 лет близка к 1, а затем вероятность снижается, что указывает на необходимость осмотра оборудования.

При расчете сопротивления R участка сети учитывается влияние температуры токопроводящих жил и сопротивлений контактных соединений коммутационных аппаратов [244].

Эквивалентное сопротивление радиальных сетей вычисляем по выражению (4.11). Потери мощности в магистральных сетях определяем по известному выражению (4.21):

В табл. П.В.8 Приложения В приведены параметры электрической схемы канализационной насосной станции (рис. 4.8), а также значения сопротивлений линий и потерь мощности в линиях. Рисунок 4.11 иллюстрирует соотношение сопротивлений линии и коммутационной аппаратуры для схемы (рис. 4.8). Определим сопротивления линий и потери мощности в линиях методом поэлементного расчета и по регрессионным моделям (4.19), (4.20).

Поэлементный метод определения потерь ЭЭ имеет следующий порядок расчета:

1) по выражению (4.11) для радиального участка сети или вычисляется сопротивление каждой линии цеховой сети R_i ;

2) по выражению (2.10) определяются потери ЭЭ в каждой линии ΔW_i , которые затем суммируются;

3) определяется эквивалентное сопротивление цеховой сети по выражению:

$$R_{\text{Э}} = \frac{\Delta W_{\Sigma}}{3 \cdot I_y^2 \cdot \tau}, \quad (4.28)$$

где I_y – ток головного участка сети; ΔW_{Σ} – суммарные потери ЭЭ, определенные по п. 2.

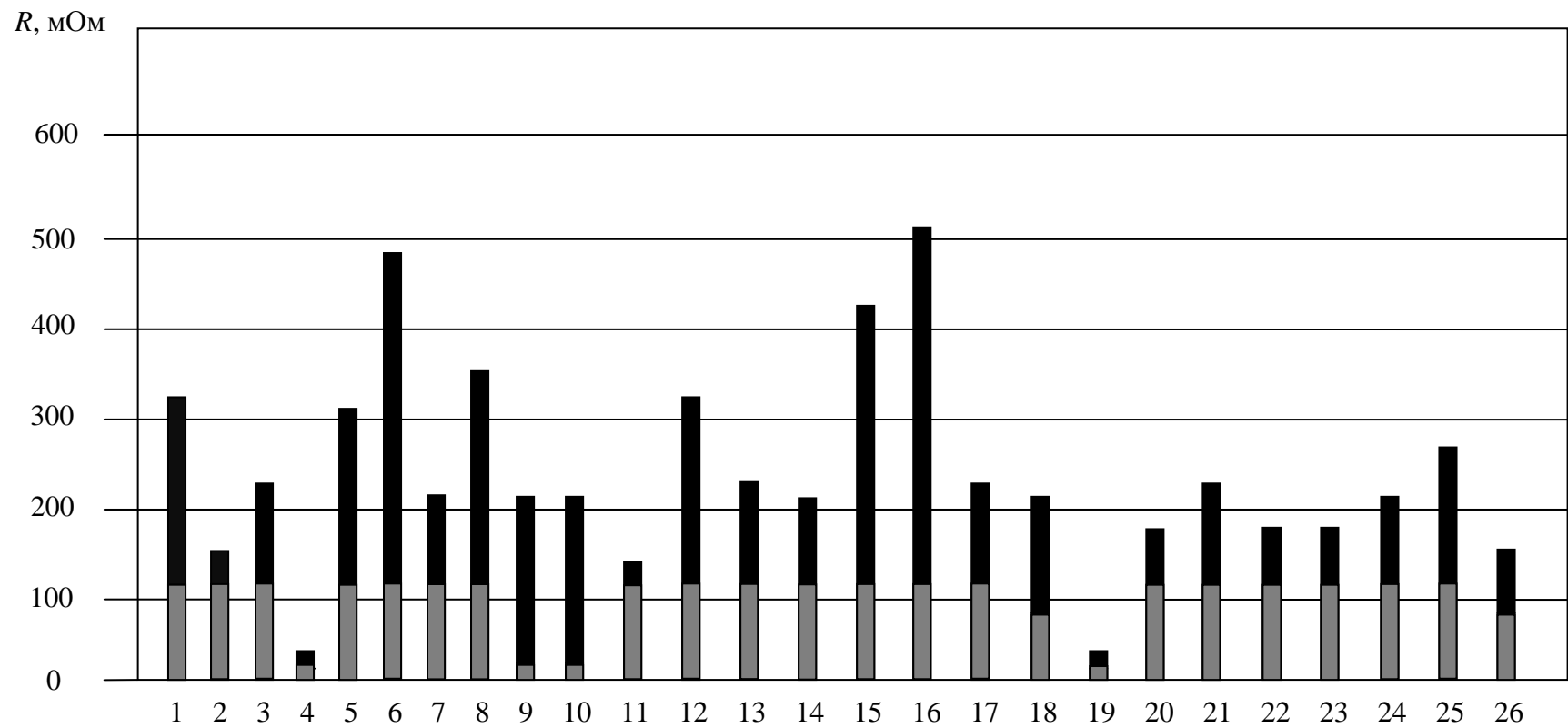


Рис. 9. Соотношение сопротивления линии $R_{л}$ (■) и коммутационной аппаратуры $R_{к}$ (■)

Подробный расчет представлен для линии № 1 длиной $l = 18$ м, $k_3 = 0,3$; сечением $s = 2,5$ мм². Сопротивления контактов коммутационных аппаратов, установленных на линии, представлены в табл. 4.3. Эквивалентное удельное сопротивление линии сети $r_{э20}$ при 20 °С:

$$r_{э20} = 31,3 \frac{l_i}{S_i l_i} = 31,3 \frac{18}{18 \cdot 2,5} = 12,52 \text{ мОм};$$

$$R = r_{э20} \cdot l [1 + 0,004(\theta_{ж} - 20)] + \sum r_k =$$

$$= 12,52 \cdot 18 \cdot [1 + 0,004(25,4 - 20)] + (21,8 + 82,5) = 333,7 \text{ мОм};$$

$$\theta_{ж} = k_3^2 (80 - \theta_0) + \theta_0 = 0,3^2 (80 - 20) + 20 = 25,4 \text{ °С}.$$

Потери активной мощности в линии № 1 при $k_3 = 0,3$ и, следовательно, $I_p = 0,3 \cdot 8,6 = 2,58$ А, вычисляются по выражению (2.10):

$$\Delta P = 3 \cdot 2,58^2 \cdot 333,7 = 6,7 \text{ Вт}.$$

Погрешности вычисления сопротивления и потерь мощности в линии определяются по выражениям:

$$\delta_R = \frac{\left| \overset{\wedge}{R_{э}} - R_{э} \right|}{R_{э}} \cdot 100 = \frac{334,5 - 333,7}{334,5} \cdot 100 = 0,2 \text{ \%};$$

$$\delta_{\Delta P} = \frac{\left| \overset{\wedge}{\Delta P} - \Delta P \right|}{\Delta P} \cdot 100 = \frac{6,7 - 6,7}{6,7} = 0.$$

Результаты расчета сопротивлений и потерь мощности для остальных линий представлены в табл. П.В.8 Приложения В.

В табл. П.В.9 Приложения В представлен расчет сопротивления и потерь активной энергии в линиях цеховой сети по регрессионным моделям (4.19), (4.20) при коэффициенте загрузке линий $k_3 = 0,3$.

Данные табл. П.В.8 и П.В.9 Приложения В показывают, что поэлементный расчет является наиболее точным, однако погрешность вычисления сопротивлений в линиях и потерь активной мощности по регрессионным моделям, составляющая в отдельных случаях 10 %, объясняется приблизительным учетом в моделях сопротивления контактов коммутационных аппаратов. Этот факт еще раз доказывает необходимость учета сопротивления контактов коммутационных аппаратов не только для точного вычисления потерь ЭЭ, но и для учета износа коммутационных аппаратов в процессе эксплуатации.

Определим эквивалентное сопротивление цеховой сети по выражению (4.28) при $k_3 = 0,3$:

$$R_э = \frac{\Delta W_{\Sigma}}{3 \cdot I_y^2 \cdot \tau} = \frac{5300,7}{3 \cdot 100,2^2 \cdot 8760} = 20 \text{ мОм},$$

где $I_y = 100,2 \text{ А}$ – ток головного участка сети; $\Delta W_{\Sigma} = 5300,7 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$ – суммарные потери ЭЭ цеховой сети.

Учитывая, что срок службы коммутационных аппаратов, установленных на линии цеховой сети насосной станции (рис. 4.8), рассчитан приблизительно на 20 лет, на основе данных табл. П.В.10 можно построить зависимость изменения потерь ЭЭ в линиях цеховой сети в процессе эксплуатации (рис. 4.12).

График на рис. 4.12 показывает, что в процессе эксплуатации цеховой сети насосной станции вследствие износа контактов коммутационных аппаратов увеличиваются потери ЭЭ в линиях.

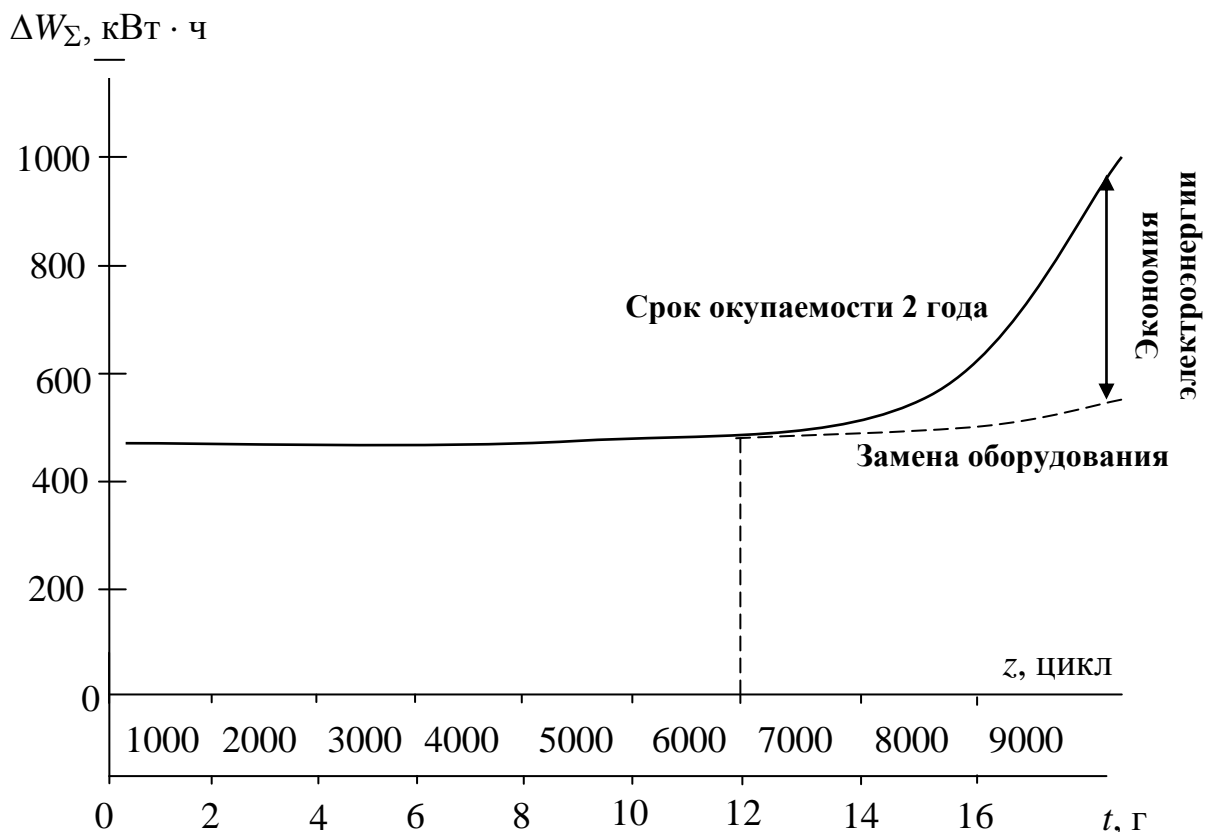


Рис. 4.12. Изменение величины потерь ЭЭ в линиях цеховой сети насосной станции в процессе эксплуатации

При замене 34 аппаратов (автоматических выключателей и магнитных пускателей) по истечении 12 лет эксплуатации на новые аппараты срок окупаемости составит около 2 лет и в дальнейшем приведет к годовой экономии в 5000 кВт · ч в год. При этом следует отметить, что силовая нагрузка и количество коммутационных аппаратов участка цеховой сети составляет менее сотой доли процента в объеме предприятия. Замена автоматических выключателей и магнитных пускателей после 12-ти лет эксплуатации позволяет снизить величину потерь ЭЭ до 50 %. При этом возможно уточнение сроков и повышение эффективности проведения планово-предупредительных ремонтов для улучшения качества эксплуатации оборудования, снижения потерь и экономии ЭЭ.

4.6. Выводы по четвертой главе

1. Показано, что при определении и прогнозировании потерь ЭЭ целесообразно составлять специализированные модели, параметры которых следует определять в функции обобщенных характеристик сети, используя регрессионный анализ.

2. Обосновано, что целесообразно формировать вероятностно-статистические модели для определения потерь мощности и эквивалентного сопротивления низковольтных цеховых сетей с учетом основных характеристик оборудования таких, как средняя длина линий, квадрат среднеквадратичной загрузки и удельное сопротивление линий сети, количество низковольтных аппаратов радиальных и температура помещений цехов. Эти модели учитывают динамику изменения электрических сетей, а значит, пригодны для многократного использования.

3. Обосновано, что целесообразно формировать аналитические и графические зависимости, позволяющие определять эквивалентное сопротивление цеховых сетей любой конфигурации; точность предлагаемой методики определения потерь ЭЭ подтверждена поэлементным расчетом.

4. Разработаны алгоритм и программа расчета погрешностей вычисления эквивалентных сопротивлений цеховых сетей в зависимости от режимов эксплуатации.

5. Показано, что разработанные стандартные регрессионные модели при доступном объеме исходной информации обеспечивают достаточную (10 %) точность, подтвержденную поэлементным расчетом, для схем цеховых сетей различной конфигурации позволяют учитывать динамику изменения схемы цеховой сети и могут использоваться для многократного применения.

Глава 5. ПРИМЕНЕНИЕ МНОЖЕСТВЕННОЙ РЕГРЕССИИ ДЛЯ РАСЧЕТА И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В СИСТЕМАХ ЦЕХОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

5.1. Общие положения и исходная информация

В связи с возможной неопределенностью исходной информации о сети расширим границы изменения факторов. Тогда длина линий сети будет заключена в пределах от 5 до 150 м при количестве линий от 6 до 24. Предел изменения средней величины сечения линий от 10 до 150 мм². Диапазон изменения загрузки линий находится в пределах от 0,2, что соответствует малонагруженной сети, до 1,3, что соответствует перегруженной сети. Для температуры окружающей среды приняты пределы, соответствующие крайним значениям температуры цеховых структур 0 – +40 °С.

Границы изменения факторов, а также кодированные значения представлены в табл. 5.1.

Таблица 5.1

Границы изменения факторов

Фактор	$X_{i\min}$	$X_{i\max}$	$\tilde{x}_i \min$	$\tilde{x}_i \max$
$x_1 \rightarrow l_{\text{cp}}, \text{ м}$	5	150	-1,1	2,1
$x_2 \rightarrow n$	6	24	-1,8	1,8
$x_3 \rightarrow r_{20}, \text{ МОм/м}$	0,21	3,13	-2,4	1,1
$x_4 \rightarrow k_3^2$	0,04	1,69	-1,1	2,5
$x_5 \rightarrow \theta_0, \text{ °С}$	0	40	-1,3	1,3

При этом следует выделить следующие этапы стратегии исследования объектов электроснабжения:

1. Выбор оптимального плана эксперимента исследования факторного пространства системы электроснабжения.

2. Построение математической модели процесса функционирования системы электроснабжения по данным эксперимента.

3. Постановка задачи рационализации технологического процесса взаимодействия элементов системы электроснабжения и ее решение с использованием найденной экспериментально-статистической модели.

При определении статистической оценки параметров регрессионной модели иногда пренебрегают ошибками модели, и при решении задачи рассматривают ее как точно определенную, детерминированную.

Отсюда выявляются следующие недостатки традиционной схемы моделирования:

1. Не учитывается неточность модели оценки параметров систем электроснабжения.

2. Не позволяет априори предъявлять требования к точности оценки оптимального решения для получения гарантированного решения и не использует информацию о дисперсии прогноза модели характеристик системы электроснабжения в условиях неопределенности исходной информации.

3. Критерий оптимальности плана не связан с точностью оценки оптимального решения, что может привести к снижению достоверности результата или к неоправданному увеличению числа опытов в эксперименте по формированию математической модели процесса функционирования системы электроснабжения.

Применение методов планирования эксперимента, т. е. построение регрессионных зависимостей по результатам пассивных экспериментов или расчетов, повышает вычислительную эффективность регрессионного управления, что показано и в наших работах [70; 246].

Очевидно, что после расширения границ изменения факторов возникает вопрос о том, насколько правомерно это расширение. Не оказалась ли область изменения какого-либо фактора слишком заужена или наоборот значительно расширена. И в том, и в другом случае не будут получены достоверные сведения о функции цели, а именно об эквивалентном сопротивлении и потерях мощности (ЭЭ). В частности, зауженная область изменения какого-либо фактора не даст нам возможности рассмотреть более полно изменение функции цели, может быть упущение какого-либо критического значения. А большое расширение диапазона изменения факторов приведет к неоправданно громоздким и долгим расчетам.

В идеальном варианте [27] данная задача полностью описывается математической моделью

$$\langle X, f(x) \rangle, \quad (5.1)$$

т. е. указанием допустимой области X и скалярной функцией $f(x)$ (потерями мощности и эквивалентным сопротивлением).

Однако эквивалентное сопротивление характеризуется не единственным показателем $f(x)$, а вектором показателей $f(x) = \{f_1(x), f_2(x), f_3(x), f_4(x), f_5(x)\}$.

При этом возникает задача векторной оптимизации вида [27]

$$x > z \quad \hat{f}(x) < \hat{f}(z) \quad \text{и} \quad x \approx z,$$

т. е.

$$\{f_1(x), f_2(x), f_3(x), f_4(x), f_5(x)\} \rightarrow \min_{x \in X}, \quad (5.2)$$

где $f_1(x) = x_1$ – средняя длина линий;

$f_2(x) = x_2$ – величина, равная количеству линий n ;

$f_3(x) = x_3$ – величина, равная эквивалентному удельному сопротивлению линий сети $r_{\text{Э}20}$ при 20 °С;

$f_4(x) = x_4$ – квадрат среднеквадратичного коэффициента загрузки линий сети;

$f_5(x) = x_5$ – температура окружающей среды;

X – допустимое множество решений (альтернатив).

Необходимо заметить, что попытка найти единственное решение векторной задачи представляется бессмысленной, так как объективная информация, содержащаяся в постановке (5.2) позволяет указать лишь множество недоминируемых альтернатив. Таким образом, можно лишь задать систему предпочтений на допустимом множестве решений X , т. е. описать задачу моделью [27]

$$\langle X, \approx, \succ \rangle, \quad (5.3)$$

где X – допустимое множество решений (альтернатив); \succ – отношение предпочтения решений на X .

При этом напомним, что запись [13]

$$x \succ z, \quad x, z \in X$$

означает, что решение x предпочтительнее решения z , а запись

$$x \approx z, \quad x, z \in X$$

будет обозначать, что допустимые решения x, z являются неразличимыми.

Если учитывать, что x и z – это величины изменяющегося фактора, то их неразличимость указывает на то, что с изменением x на z значение эквивалентного сопротивления изменилось незначительно. Следовательно, интервал изменения между x и z можно изменить еще.

При этом отношение неразличимости можно представить в следующем виде [27]

$$x \approx z \Leftrightarrow [y(x) - y(z)]^2 \leq \rho^2(x, z), \quad (5.4)$$

где x и z – значения факторов;

$y(x)$ и $y(z)$ – значения функции цели при x и z соответственно;

$\rho^2(x, z)$ – определенная на X симметричная, неотрицательная функция, порожденная неточностью модели $\hat{y}(x)$ и задающая порог различимости допустимых решений, что впервые для цехового электроснабжения опубликовано в наших работах [60; 70].

5.2. Отношение предпочтения и неразличимости решений оценки параметров систем электроснабжения

Основные предпосылки для построения регрессионных зависимостей в задачах оценки и анализа критериальных параметров систем электроснабжения включают в себя следующие аспекты. Функция потерь мощности (ЭЭ) в системах цехового электроснабжения в общем случае является случайной величиной. Факторы, влияющие на функцию потерь мощности (ЭЭ) тоже являются случайными величинами, но дисперсия погрешности их определения мала по сравнению с погрешностью определения потерь мощности (ЭЭ). Дисперсии результатов определения потерь мощности (ЭЭ) во всех расчетах, обусловленных действием неконтролируемых факторов, равны друг другу. Случайные величины результатов расчетов рассматриваются как истинные значения функции потерь, на которую наложена случайная погрешность, обусловленная неконтролируемыми факторами. В результате регрессионного анализа находятся выборочные средние значения функции цели. Точность оценки потерь мощности (ЭЭ) в зависимости от динамики изменения влияющих факторов определяется числом расчетов, которые используются для определения коэффициентов регрессии.

При рассмотрении детерминированной задачи с известной допустимой областью факторного пространства X предположим, что имеется лишь неточная модель критерия оценок параметра исследуемой системы электроснабжения $\hat{f}(x)$.

Если пренебречь ошибками в регрессионной модели $\hat{f}(x)$, то при сравнении решений $x, z \in X$ необходимо считать, что

$$x \succ z \rightarrow \hat{f}(x) < \hat{f}(z). \quad (5.5)$$

Вместе с тем ясно, что пренебрежение ошибками модели не всегда оправдано, так как возможна ситуация, при которой [13]

$$\hat{f}(x) > \hat{f}(z), \text{ хотя } \hat{f}(x) < \hat{f}(z). \quad (5.6)$$

Чтобы избежать неверных выводов, целесообразно, используя информацию об ошибке регрессионной модели, ввести отношение неразличимости решений, порожденное неточностью модели критерия оценок параметра исследуемой системы электроснабжения. Неполнота информации заставляет использовать модели и методы расчета, основанные на тех или иных допущениях, определяющих предполагаемое влияние отсутствующей информации на результаты расчетов функциональных характеристик систем электроснабжения [263–266].

Отношение неразличимости решений обозначают символом \approx , тогда запись

$$x \approx z, \quad x, z \in X$$

будет обозначать, что допустимые решения, т. е. значения параметров области факторного пространства x, z , являются неразличимыми.

В зависимости от особенностей действия факторов неопределенности в исходных данных, характеризующих исследуемый объект, и имеющейся информации об ошибке модели $\hat{f}(x)$ могут быть предложены разные способы введения отношения неразличимости [27].

Для широкого круга практических ситуаций, возникающих в процессе функционирования систем электроснабжения, оно может быть задано в виде (5.4) [27]

$$x \approx z \rightarrow [f(x) < f(z)]^2 \leq \rho^2(x, z),$$

где $\rho(x, z)$ – определенная на X симметричная, неотрицательная функция, порожденная неточностью модели $f(x)$ и задающая порог различения допустимых решений.

В схему, задаваемую соотношением

$$x \approx z \rightarrow [f(x) < f(z)]^2 \leq \rho^2(x, z),$$

укладываются ситуации, когда в пространстве оценок критерия моделей параметров системы электроснабжения задана некоторая метрика (расстояние) и решения объявляются неразличимыми, если это расстояние не превышает заданный порог.

Для модели вида [27]

$$f(x) = f(x) + e \tag{5.7}$$

e – неизвестная ошибка модели, такая что $|e| \leq \frac{\Delta}{2}$, где Δ – известная величина предельной ошибки. Тогда отношение неразличимости решений может быть записано в виде

$$x \approx z \rightarrow [f(x) < f(z)]^2 \leq \Delta^2. \tag{5.8}$$

При этом легко установить, что

$$\rho^2(x, z) = \Delta^2. \tag{5.9}$$

Введенное выше отношение неразличимости решений при определении функциональных параметров исследуемых объектов позволяет достаточно

естественно ввести на X отношение строгого предпочтения решений при их сравнении по неточной модели $\hat{f}(x)$, которое задается из условия [27]:

$$x \succ z \iff \hat{f}(x) < \hat{f}(z) \text{ и } x \approx z. \quad (5.10)$$

Если отношение неразличимости задается выражением (5.4):

$$x \approx z \rightarrow [\hat{f}(x) < \hat{f}(z)]^2 \leq \rho^2(x, z),$$

то можно записать следующее конструктивное выражение:

$$x \succ z \leftrightarrow \{ \hat{f}(x) < \hat{f}(z) \text{ и } [\hat{f}(x) < \hat{f}(z)]^2 \leq \rho^2(x, z) \}. \quad (5.11)$$

Введенные отношения используются для построения и анализа общей математической модели функциональных параметров системы электроснабжения в условиях неопределенности исходной информации о фактических характеристиках электрооборудования.

5.3. R-оптимальные планы для исследования регрессионных моделей функциональных характеристик систем цехового электроснабжения от основных параметров оборудования

Наиболее распространенным вероятностно-статистическими методом оценки потерь ЭЭ в системах внутрицехового электроснабжения является регрессионный анализ, позволяющий получить уравнение регрессии, связывающее потери с воздействующими на них обобщенными факторами. Однако для построения регрессионных моделей необходим исходный объем точной статистической информации о потерях и воздействующих факторах.

Всю исходную информацию, необходимую для расчета потерь ЭЭ, часто разделяют в зависимости от скорости ее изменения во времени на две составляющие, а именно – схемную и режимную. К первой относится информация о параметрах элементов схемы электроснабжения. При этом

предметом исследования является такой параметр, как эквивалентное сопротивление системы внутрицехового электроснабжения, являющийся критериальным параметром анализа и оценки уровня потерь ЭЭ.

Ко второй составляющей относится информация о параметрах режима элементов систем электроснабжения, в частности о режимах загрузки электрооборудования.

Процесс изменения нагрузок в системах электроснабжения является совокупностью реализации случайных процессов [254], поэтому получить полную информацию о режимных параметрах достаточно сложно. Вследствие этого широкое применение для определения потерь ЭЭ находят методы, основывающиеся на зависимостях, которые получены в результате обработки проведенных заранее схмотехнических расчетов, что впервые показано в системах цеховых сетей в наших исследованиях [40; 248].

Выбор переменных, предварительно включаемых в регрессионную зависимость, осуществляется на основании экспертных оценок из факторов, оказывающих существенное влияние на потери ЭЭ в системах цехового электроснабжения. Вопрос об окончательном включении фактора в регрессионную зависимость решается на основании стандартных статистических процедур с использованием критериев Стьюдента и Фишера. В качестве факторов принимаются основные рассматриваемые параметры оборудования цехов. При определении размаха варьирования факторов обязательно должно выполняться условие совместимости факторов, т. е. интервал варьирования выбирается так, чтобы любые сочетания факторов в этих интервалах были реализуемы и не нарушались технические характеристики режима эксплуатации, что показано в работах [60; 70].

Проанализируем поставленную задачу с позиции априорного планирования регрессионного эксперимента в системах электроснабжения. Для этого проведем нормировку порога неразличимости и получим [27]

$$x \approx z \leftrightarrow \left\{ \frac{[\hat{y}(x) - \hat{y}(z)]^2}{g^2(\alpha)\sigma^2} \leq \rho^2(x, z) \right\}, \quad (5.12)$$

где α – уровень значимости; σ^2 – дисперсия помехи; $g(\alpha)$ – квантиль нормального нормированного распределения; $\rho^2(x, z)$ функция задает нормированный порог различения и определяется как

$$\tilde{\rho}^2(x, z) = [\varphi(x) - \varphi(z)]^T C(\varepsilon) [\varphi(x) - \varphi(z)]. \quad (5.13)$$

Порог $\tilde{\rho}^2(x, z)$ зависит от плана регрессионного эксперимента ε . Очевидно, чем больше его величина, тем больше шансов, что решения $x, z \in X$ окажутся неразличимыми.

Предполагая, что базисные функции $\varphi(x_i)$ регрессионной модели параметров системы электроснабжения дифференцируемы на X , рассмотрим поведение функции $\tilde{\rho}^2(x, z, \varepsilon)$ в окрестности некоторого решения области факторного пространства x , считая, что $z = x + \Delta x$.

Для этого разложим $\tilde{\rho}^2(x, z, \varepsilon)$ в ряд Тейлора. С точностью до членов третьего порядка можно получить

$$\tilde{\rho}^2(x, z, \varepsilon) = \Delta x^T \Gamma \Delta x, \quad (5.14)$$

где $\Delta x = x - z$ – приращение в точке x ,

$$\Gamma(x, \varepsilon) = \Phi(x)C(\varepsilon)\Phi^T(x); \quad (5.15)$$

$$\Phi(x) = \begin{vmatrix} \frac{\partial \varphi_1(x)}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial \varphi_m(x)}{\partial x_1} \\ \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial \varphi_1(x)}{\partial x_k} & \dots & \frac{\partial \varphi_m(x)}{\partial x_k} \end{vmatrix}. \quad (5.16)$$

Выражение $\tilde{\rho}^2(x, z, \varepsilon) = \Delta x^T \Gamma \Delta x$ имеет ясный физический смысл, а именно: $\tilde{\rho}^2(x, \varepsilon)$ при заданном плане регрессионного эксперимента ε есть нормированная дисперсия приращения оценки регрессионной модели $\hat{y}(x)$ при изменении аргумента в точке x на величину Δx .

Матрица $\Gamma(x, \varepsilon)$ зависит от частных производных функций $\varphi(x_i)$, и регрессионной модели параметров системы электроснабжения и выбранного плана эксперимента.

5.4. Разработка алгоритма матричных преобразований при определении порога различения допустимых решений оценки параметров электрооборудования

Выражение (5.4) указывает на такую ситуацию, когда в пространстве оценок критерия задано некоторое расстояние (интервалы изменения факторов) и решения объявляются неразличимыми, если это расстояние не превышает заданный порог $\rho^2(x, z)$. Неразличимость означает, что интервал изменения некоторого фактора мал, при этом значения функций цели меняются, не превышая величину $\rho^2(x, z)$. Таким образом, разности функций цели оказываются настолько малыми, что предыдущее и последующее значение функции можно считать приблизительно равным, т. е. неразличимым. Методика представленного алгоритма впервые реализована в наших работах [60; 70].

Значение $\rho^2(x, z)$ определяется по выражению [27]:

$$\tilde{\rho}^2(x, z) = \Delta x_i^T \Gamma(x) \Delta x_i. \quad (5.17)$$

Здесь Δx_i – матрица интервалов варьирования i -го фактора, т. е. значение фактора в точке z , путем изменения фактора в точке x на величину Δx ; таким образом

$$\Delta x_i = z_i - x_i, \quad (5.18)$$

Δx_i – приращение в точке x_i ;

Δx_i^T – транспонированная матрица интервалов варьирования каждого фактора;

$\Gamma(x)$ – ковариационная матрица, зависящая от частных производных функций факторов $\varphi(x_i)$, показывающая изменения значений принятых факторов $x_1 \dots x_5$.

$\Gamma(x)$ вычисляется по формуле [15]:

$$\Gamma(x) = \Phi(x)C(\varepsilon)\Phi^T(x), \quad (5.19)$$

где

$$\Phi(x) = \begin{vmatrix} \frac{\partial \varphi_1(x)}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial \varphi_m(x)}{\partial x_1} \\ \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial \varphi_1(x)}{\partial x_k} & \dots & \frac{\partial \varphi_m(x)}{\partial x_k} \end{vmatrix}. \quad (5.20)$$

$\Phi(x)$ – матрица, содержащая приращения функций факторов $x_1 \dots x_5$, т. е.

$\frac{\partial \varphi_i(x)}{\partial x_i}$ не что иное, как изменение каждого фактора на величину $\Delta x_i = z_i - x_i$;

$\Phi^T(x)$ – транспонированная матрица приращений функций факторов $x_1 \dots x_5$;

$C(\varepsilon)$ – ковариационная (дисперсионная) матрица.

Составляем матрицу $\Phi(x)$. Для этого разбиваем диапазоны варьирования каждого фактора $x_1 \dots x_5$ на 16 интервалов, что позволяет рассмотреть все возможные сочетания факторов. Тогда интервал варьирования в диапазоне каждого фактора $x_1 \dots x_5$ определяем по выражению:

$$\Delta x_i = \frac{x_{i \max} - x_{i \min}}{16}, \quad (5.21)$$

где $x_{i \max}$ – максимальное значение фактора $x_1 \dots x_5$; $x_{i \min}$ – минимальное значение фактора $x_1 \dots x_5$.

Так для фактора x_1 , равного средней длине линий, интервал варьирования в диапазоне фактора x_1 определится по выражению:

$$\Delta x_1 = \frac{x_{1 \max} - x_{1 \min}}{16} = \frac{150 - 5}{16} = 9,1.$$

В кодированных единицах интервал варьирования для фактора x_1 имеет вид

$$\Delta \tilde{x}_1 = \frac{\tilde{x}_{1 \max} - \tilde{x}_{1 \min}}{16} = \frac{2,1 + 1,1}{16} = 0,21.$$

Для остальных факторов диапазоны их варьирования в натуральной ($x_{i \min} \div x_{i \max}$) и кодированной форме ($\tilde{x}_{i \min} \div \tilde{x}_{i \max}$), а также интервалы в диапазонах варьирования в натуральной Δx_i и кодированной форме $\Delta \tilde{x}_i$ приведены в табл. 5.2.

Таблица 5.2

Интервалы варьирования факторов

Фактор	$x_{i \min} \div x_{i \max}$	$\tilde{x}_{i \min} \div \tilde{x}_{i \max}$	Δx_i	$\Delta \tilde{x}_i$
$x_1 \rightarrow l_{\text{ср}}, \text{ м}$	5 \div 150	-1,1 \div 2,1	9,1	0,21
$x_2 \rightarrow n$	6 \div 24	-1,8 \div 1,8	1,125	0,225
$x_3 \rightarrow r_{\text{э20}}, \text{ мОм/м}$	0,21 \div 3,13	-2,4 \div 1,1	0,19	0,23
$x_4 \rightarrow k_3^2$	0,04 \div 1,69	-1,1 \div 2,5	0,103	0,225
$x_5 \rightarrow \theta_0, \text{ }^\circ\text{C}$	0 \div 40	-1,3 \div 1,3	2,5	0,162

Используя выражения (5.19) и (5.21), составляем матрицы $\Phi(x)$ и $\Phi^T(x)$, т. е.

$$\Phi(x) = \begin{array}{cccc|c} -1,1 & & & & \\ -1,1 + 0,21 = -0,89 & & & & \\ -0,9 + 0,21 = -0,67 & \cdot & \cdot & \cdot & \frac{\partial \varphi_m(x)}{\partial x_1} \\ -0,7 + 0,21 = -0,46 & & & & \\ -0,5 + 0,21 = -0,25 & & & & \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \dots & & & & \\ \dots & & \cdot & \cdot & \cdot \\ \dots & & & & \frac{\partial \varphi_m(x)}{\partial x_k} \\ 1,9 + 0,21 = 2,1 & & & & \end{array}$$

С учетом остальных факторов матрица $\Phi(x)$ представлена в Приложении Г. Поскольку матрица $\Phi^T(x)$ – транспонированная матрица приращений функций факторов $x_1 \dots x_5$, то ее получаем из матрицы $\Phi(x)$ заменой каждой строки матрицы $\Phi(x)$ столбцом с тем же номером (Приложение Г).

По выражению ковариационной (дисперсионной) матрицы (см. Приложение Г) имеем

$$C(\varepsilon) = [F(\varepsilon)]^{-1}; \quad (5.22)$$

$$F(\varepsilon) = \Phi^T(x) \cdot \Phi(x), \quad (5.23)$$

где $F(\varepsilon)$ – информационная матрица (Фишера); $[F(\varepsilon)]^{-1}$ – матрица, обратная к информационной матрице (Фишера).

5.5. Алгоритм и проверка условия неразличимости решений оценки параметров электрооборудования в зависимости от приращения факторов

Проверяем условие (5.4). Напомним, что уравнения регрессии для вычисления потерь мощности и эквивалентного сопротивления сети имеют вид

$$R_9 = 5,4 + 4,2x_1 - 1,7x_2 - 3,9x_3 + 0,53x_4 +$$

$$\begin{aligned}
& + 0,23x_5 - 1,3x_1x_2 - 3,19x_1x_3 + 0,44x_1x_4 + 1,22x_2x_3 - \\
& - 0,24x_2x_4 - 0,4x_3x_4 + 0,95x_4x_5; \tag{5.24}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\Delta P = & 48 + 36,4x_1 - 16x_2 + 11,2x_3 + 41,5x_4 + \\
& + 3,34x_5 - 12x_1x_2 + 11x_1x_3 + 31,4x_1x_4 + 3,62x_2x_3 - \\
& - 13,9x_2x_4 + 9,8x_3x_4 + 10,5x_3x_5. \tag{5.25}
\end{aligned}$$

Находим изменение функций цели R_3 и ΔP в зависимости от изменения факторов, значения которых представлены в табл. 5.2

Данные табл. 5.2 показывают, что при изменении фактора X_1 на величину $\Delta \tilde{x}_1 = 0,21$ (или в натуральной величине при изменении длины линии X_1 на 9,6 м (табл. 5.2)) величина потерь мощности ΔP изменится несущественно в соответствии с условием (5.4).

А именно при $X_1 = -1,1$ ($X_1 = 5$ м) получаем

$$\begin{aligned}
R_3 = & 5,4 + 4,2 \cdot (-1,1) - 1,7 \cdot (-2,4) - 3,9 \cdot (-1,1) + 0,53 \cdot (-1,1) + \\
& + 0,23 \cdot (-1,3) - 1,3 \cdot (-1,1) \cdot (-1,8) - 3,2 \cdot (-1,1) \cdot (-1,1) + 0,44 \cdot (-1,1) \cdot (-1,1) + \\
& + 1,22 \cdot (-1,1) \cdot (-1,8) - 0,24 \cdot (-1,1) \cdot (-1,8) - 0,42 \cdot (-1,1) \cdot (-1,1) + \\
& + 0,95 \cdot (-1,1) \cdot (-1,3) = 6,96 \text{ мОм}.
\end{aligned}$$

Затем изменяем значение фактора $x_1 \rightarrow l_{\text{ср}}$, $x_1 = -1,1 + 0,21 = -0,89$ (или $5 + 9,1 = 14,1$ м), тогда

$$\begin{aligned}
R_3 = & 5,4 + 4,2 \cdot (-0,89) - 1,7 \cdot (-2,4) - 3,9 \cdot (-1,1) + 0,53 \cdot (-1,1) + \\
& + 0,23 \cdot (-1,3) - 1,3 \cdot (-1,1) \cdot (-1,8) - 3,2 \cdot (-1,1) \cdot (-1,1) + 0,44 \cdot (-1,1) \cdot (-1,1) + \\
& + 1,22 \cdot (-1,1) \cdot (-1,8) - 0,24 \cdot (-1,1) \cdot (-1,8) - 0,42 \cdot (-1,1) \cdot (-1,1) + \\
& + 0,95 \cdot (-1,1) \cdot (-1,3) = 9,89 \text{ мОм}.
\end{aligned}$$

Проверяем условие (5.4). Для эквивалентного сопротивления R_9 :

$$x \approx z \leftrightarrow [y(x) - y(z)]^2 \leq \rho^2(x, z),$$

$$[6,96 - 9,89]^2 \leq 70,8,$$

$$8,6 < 70,8.$$

Условие (5.4) выполняется, следовательно, значения фактора $x_1 \rightarrow l_{\text{ср}}$, 5 м и 14,6 м оказывают несущественное влияние на функцию цели R_9 , а следовательно, диапазон изменения фактора x_1 можно увеличить до значения, согласно табл. 5.2, $\Delta \tilde{x}_i = 0,21 \cdot 3 = 0,63$. Тогда изменяем значение фактора $x_1 \rightarrow l_{\text{ср}}$, $x_1 = -1,1 + 0,63 = -0,47$ (или $5 + 3 \cdot 9,1 = 32,3$ м), следовательно,

$$\begin{aligned} R_9 = & 5,4 + 4,2 \cdot (-0,46) - 1,7 \cdot (-2,4) - 3,9 \cdot (-1,1) + 0,53 \cdot (-1,1) + \\ & + 0,23 \cdot (-1,3) - 1,3 \cdot (-1,1) \cdot (-1,8) - 3,2 \cdot (-1,1) \cdot (-1,1) + 0,44 \cdot (-1,1) \cdot (-1,1) + \\ & + 1,22 \cdot (-1,1) \cdot (-1,8) - 0,24 \cdot (-1,1) \cdot (-1,8) - 0,42 \cdot (-1,1) \cdot (-1,1) + \\ & + 0,95 \cdot (-1,1) \cdot (-1,3) = 15,8 \text{ мОм.} \end{aligned}$$

Проверяем условие (5.4).

$$x \approx z \leftrightarrow [y(x) - y(z)]^2 \leq \rho^2(x, z),$$

$$[6,96 - 15,8]^2 \leq 70,8,$$

$$77,4 > 70,8.$$

Условие (5.4) не выполняется, следовательно, значения фактора $x_1 \rightarrow l_{\text{ср}}$, 5 м и 32,3 м значимы и оказывают существенное влияние на функцию цели R_9 . Влияние изменений для остальных факторов на величину функции цели представлено в табл. П.Г.1–П.Г.5 Приложения Г.

На рис. 5.1 представлен общий вид модели для оценки параметров электрооборудования; на рис. 5.2 – общий вид подсистемы «Начальное

состояние» на основании данных табл. 5.2; на рис. 5.3 – общий вид подсистемы «Варьирование факторов» на основании данных табл. 5.2.

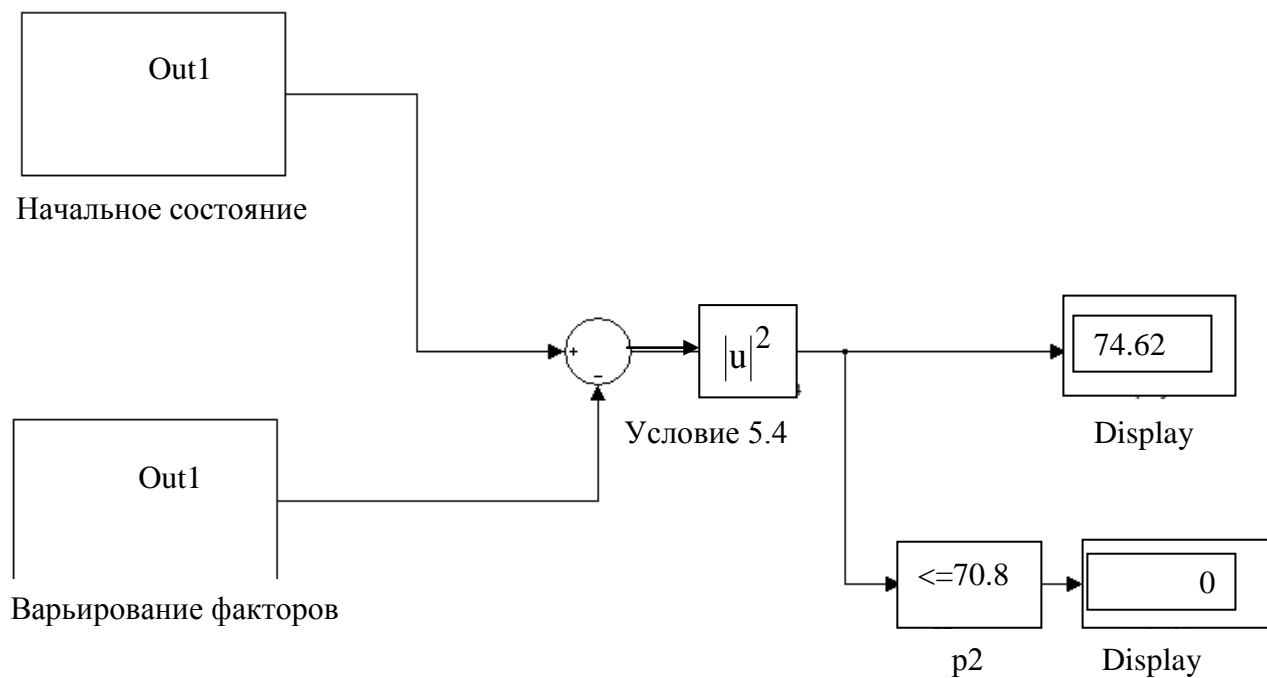


Рис. 5.1. Общий вид модели для оценки параметров электрооборудования

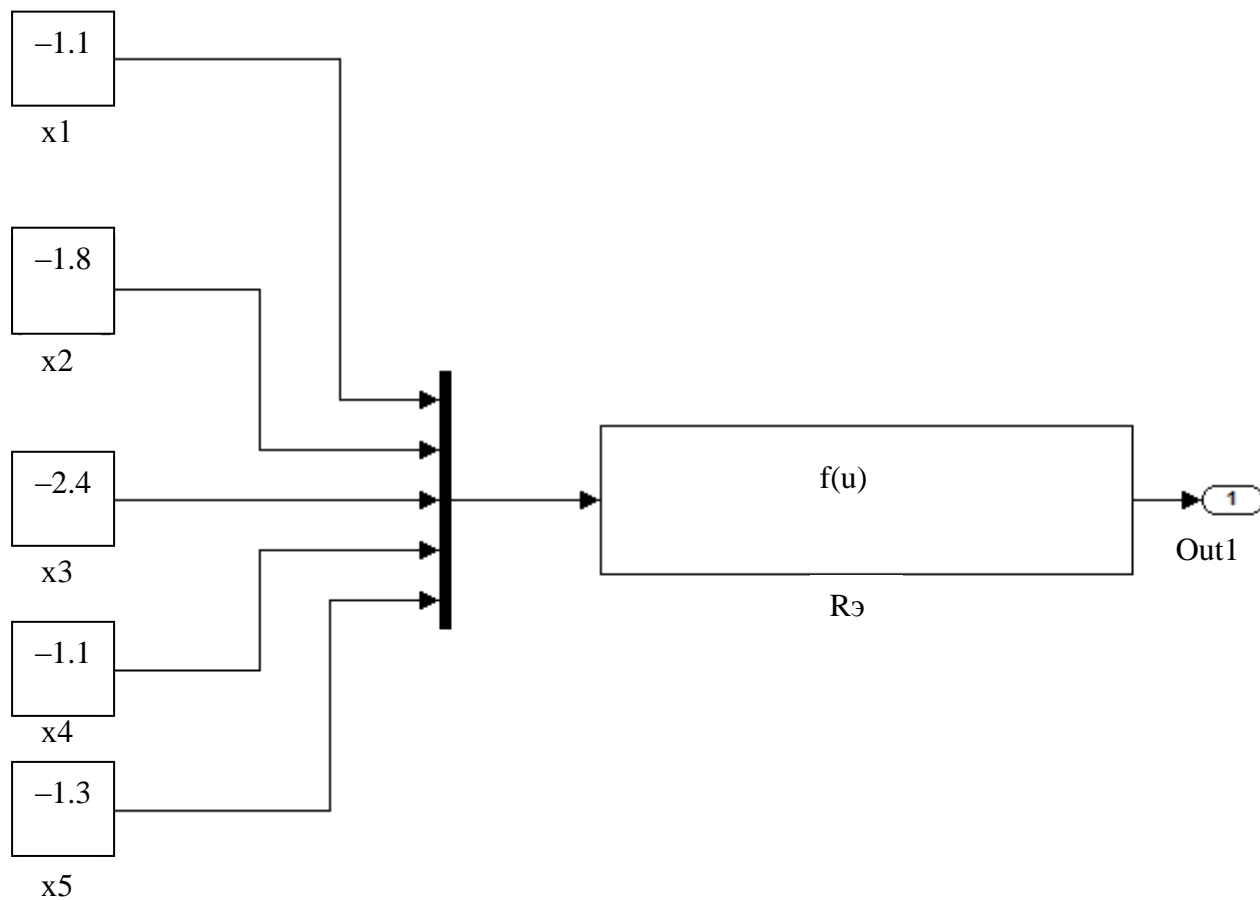


Рис. 5.2. Общий вид подсистемы «Начальное состояние» на основе данных табл. 5.2

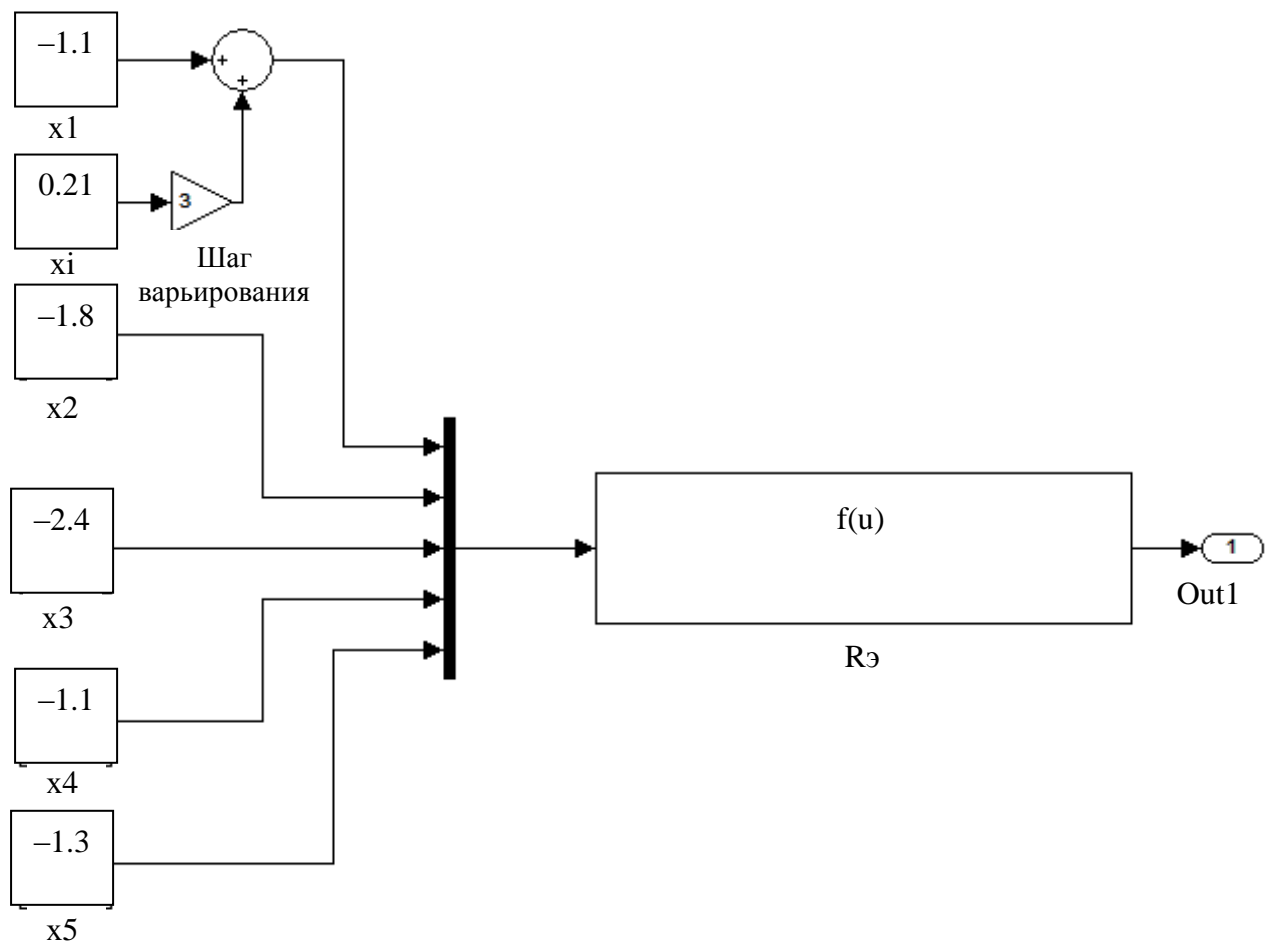


Рис. 5.3. Общий вид подсистемы «Варьирование факторов»
на основе данных табл. 5.2

Для задания необходимых значений используются блоки Constant, для совершения вычислительных операций блоки Fcn, Product (умножение) и Sum (сумма), согласно формуле 5.24. Производится расчет эквивалентного сопротивления $R_э$, с последующим варьированием факторов значений, согласно табл. 5.2. и проверкой условия 5.4. Рассчитанные данные выводятся на дисплей. Виды рассматриваемых матриц и факторов, расчеты сопротивлений по модели (рис. 5.1) приведены в Приложениях Г, Д.

Представленный алгоритм впервые реализован в наших исследованиях [70; 109].

Таким образом, результаты вычислений показывают, как изменяется функция цели R_3 – эквивалентное сопротивление сети – в зависимости от приращения факторов. В качестве оценочного критерия рассматривается параметр $[y(x) - y(z)]^2$ – квадрат разности значений функции цели при изменении параметров x и z соответственно. Чем ближе значение этого параметра к полученному – $\rho^2(x, z)$ (определенная на X симметричная, неотрицательная функция, порожденная неточностью модели $y(x)$ и задающая порог различимости допустимых решений), тем более существенное влияние на функцию цели оказывает варьирование значений факторов. Другими словами, если выполняется условие $[y(x) - y(z)]^2 < \rho^2(x, z)$, то эквивалентное сопротивление сети меняется незначительно.

Анализ результатов расчетов показывает, что наиболее целесообразно разбивать на мелкие интервалы варьирования и расширять границы изменения у таких факторов, как x_1 – средняя длина линий; x_2 – величина, равная количеству линий n ; x_3 – величина, равная среднему удельному сопротивлению линий сети r_{320} при 20 °С, так как $[y(x) - y(z)]^2 > \rho^2(x, z)$. Действительно, данные факторы оказывают наибольшее влияние на величину эквивалентного сопротивления сети, поэтому имеет смысл более детально рассмотреть интервалы варьирования этих факторов.

5.6. Применение нечеткого регрессионного анализа для оценки и прогнозирования потерь электроэнергии в системах цехового электроснабжения

Выше отмечалось, что в действительности процесс изменения нагрузок цеховых сетей является совокупностью реализаций случайных процессов, поэтому получить достаточно полную информацию о режимных параметрах сети практически затруднено. Вследствие этого, как известно, чаще применяются вероятностно-статистические методы определения потерь ЭЭ, которые являются оценочными. Эти методы, как правило, основываются на зависимостях, которые получают в результате обработки произведенных заранее схемотехнических расчетов.

Неполнота информации заставляет использовать методы расчета, основанные на тех или иных допущениях, определяющих предполагаемое влияние отсутствующей информации на результаты расчета. К таким способам расчета можно отнести методы нечеткого регрессионного анализа. В данном случае погрешности принимаются обусловленными нечеткостью описываемой системы, что позволяет использовать предложенную в [154] теорию нечетких множеств.

В настоящее время есть несколько подходов нечеткого регрессионного анализа: нечеткая регрессия, основанная на критерии минимизации нечеткости; нечеткая регрессия, комбинированная с методом наименьших квадратов, а также другие.

В нечетком регрессионном анализе функция отклика (в нашем случае это потери мощности и эквивалентное сопротивление сети) и коэффициенты нечеткого уравнения регрессии представляются в виде нечетких множеств, имеющих треугольные функции принадлежности [154].

Нечеткое подмножество A универсального множества X характеризуется функцией принадлежности $\mu_A : X \rightarrow [0, 1]$, которая ставит в соответствие каждому элементу $x \in X$ число $\mu_A(x)$ из интервала $[0, 1]$, характеризующее

степень принадлежности элемента x подмножеству A . Проще говоря, функция принадлежности (membership function) – это функция, которая каждому значению переменной (в границах каждого множества) ставит в соответствие значение в интервале от 0 до 1 [154].

Тогда нечеткое подмножество $A = \{x, \mu_A(x)\}$ определяется как совокупность упорядоченных пар, составленных из элементов x универсального множества X и соответствующих степеней принадлежности $\mu_A(x)$.

Для конечного нечеткого множества A с функцией принадлежности $\mu_A(x)$ в [168] введено следующее обозначение на основном множестве $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$:

$$A = \frac{\mu_A(x_1)}{x_1} + \frac{\mu_A(x_2)}{x_2} + \dots + \frac{\mu_A(x_n)}{x_n} = \sum_{i=1}^n \frac{\mu_A(x_i)}{x_i}. \quad (5.26)$$

Так как в нечетких регрессионных моделях наиболее распространенным типом функции принадлежности является треугольный тип, имеет смысл рассмотреть его. Треугольные функции принадлежности делятся на симметричные и асимметричные. В данном случае наибольший интерес представляет симметричная треугольная функция принадлежности.

Треугольная функция принадлежности с увеличением x монотонно растет, достигает максимума и затем монотонно падает. Для такой функции принадлежности характерны следующие основные особенности (рис. 5.4).

Прежде всего, следует отметить, что разброс по оси абсцисс влево (обозначается L , от английского слова left) от центра m равен разбросу вправо (обозначается R , от английского слова right). В целом такой тип функции принадлежности называют LR -изображением.

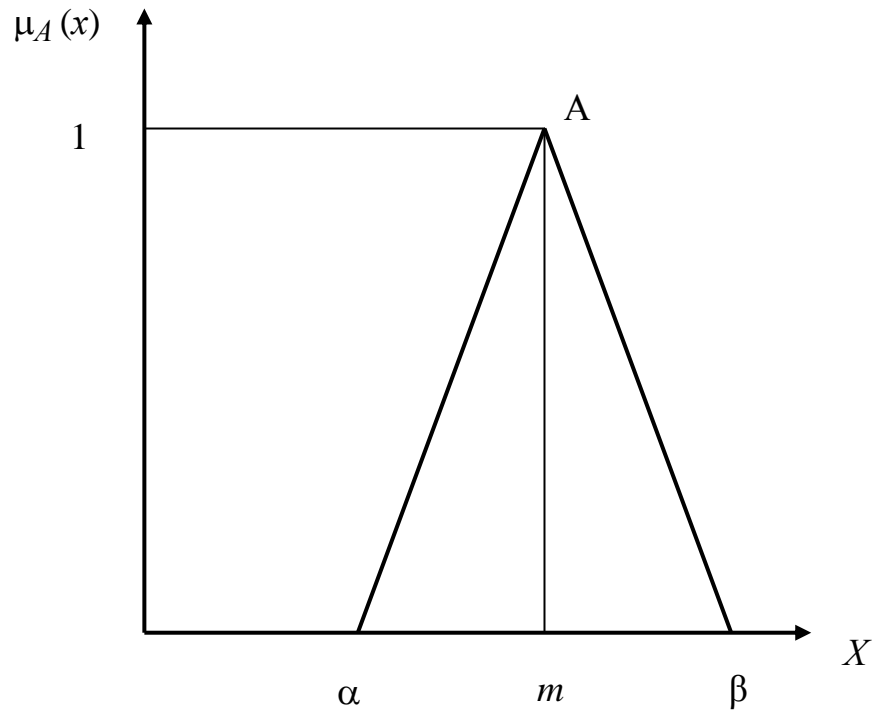


Рис. 5.4. Треугольная функция принадлежности $\mu_A(x)$ LR-типа

Значение функции принадлежности нечеткого множества A на основном интервале $[\alpha, \beta]$ можно определить, предварительно получив значение центра основного интервала m [154]:

$$m = \alpha + \frac{\beta - \alpha}{2}; \quad (5.27)$$

$$\mu_A(x) = \begin{cases} L(m - x) & \text{для } x \in [\alpha, m], \\ R(x - m) & \text{для } x \in [m, \beta]. \end{cases} \quad (5.28)$$

Таким образом, можно сказать, что нечеткий регрессионный анализ позволяет найти интервал оценивания коэффициентов регрессии $b_0 \dots b_n$.

Точечные значения коэффициентов регрессии b_i хороши в качестве первоначальных результатов обработки наблюдений. Их недостаток в том, что неизвестно, с какой точностью они дают оцениваемый параметр. Тогда и возникает задача о приближении параметра b_i не одним числом, а целым интервалом $\tilde{b}_i = (\tilde{\theta}_1, \tilde{\theta}_2)$ [168].

Оценка неизвестного параметра считается интервальной, если она определяется двумя числами – концами интервала.

Задачу интервального оценивания можно сформулировать так: по данным выборки (т. е. используя полученные значения функций эквивалентного сопротивления и потерь мощности (ЭЭ)) построить числовой интервал $(\tilde{\theta}_1, \tilde{\theta}_2)$, относительно которого с заранее выбранной вероятностью γ можно сказать, что внутри этого интервала находится точное значение оцениваемого параметра.

Интервал $(\tilde{\theta}_1, \tilde{\theta}_2)$, накрывающий с вероятностью γ истинное значение параметра \tilde{b}_i , называется доверительным интервалом (рис. 5.5), а вероятность γ – надежностью оценки или доверительной вероятностью [168].

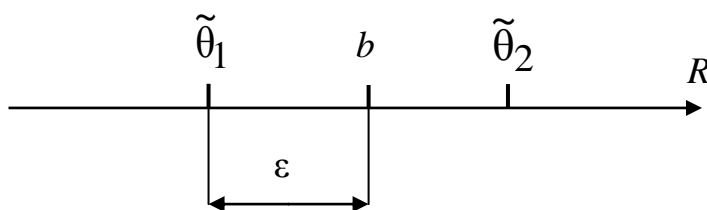


Рис. 5.5. Доверительный интервал

В нашем случае доверительный интервал выбирается на основе симметричной треугольной функции принадлежности относительно центра m (за центр m принимаем значения коэффициентов регрессии b_i), т. е. выбирается интервал вида $(\tilde{b}_i - \epsilon, \tilde{b}_i + \epsilon)$.

Число $\epsilon > 0$ характеризует точность оценки: чем меньше разность $|b - \tilde{b}|$, тем точнее оценка.

Величина γ выбирается заранее, ее выбор зависит от конкретно решаемой задачи. Надежность γ принято выбирать равной 0,9; 0,95; 0,99 или 0,999.

Тогда практически достоверно нахождение параметра b_i в доверительном интервале $(\tilde{b}_i - \epsilon, \tilde{b}_i + \epsilon)$.

Для определения доверительных интервалов и, соответственно, построения нечетких регрессионных моделей использованы данные табл. 5.3.

Таблица 5.3

Значения факторов и функций цели

N	X_0	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	R_3	\hat{R}_3	ΔP	$\hat{\Delta P}$
1	+	0	0	-	0	0	9,32	9,32	59,48	59,48
2	+	0	+	+	+	+	5,87	6,87	29,16	30,18
3	+	-	0	-	0,5	1,2	1,1	1,1	40,77	40,77
4	+	0,5	-	-	-	+	12,6	10,9	47,92	44,29
5	+	-	-	-	0	+	3,42	3,06	43,1	39,47
6	+	-1,2	-	+	+	-	2,37	2,11	6,382	5,99
7	+	0	0	+	-0,5	0	5,57	5,57	21,17	21,17
8	+	1,2	+	-	0	0	8,53	8,7	82,19	85,82
9	+	0	0	+	0	0	5,16	5,16	37,01	37,01
10	+	0	-	-	+	0	9,89	9,12	144,3	140,7

В табл. 5.3 $-0,5$, $-1,2$, $0,5$, 0 и $+1,2$ соответствуют значениям основных рассматриваемых параметров радиальной цеховой сети.

Значения факторов $-0,5$, $0,5$, $1,2$, $-1,2$ вычислены по выражению

$$\tilde{x}_i = \frac{x_i - x_{i0}}{\Delta x_i}, \quad (5.29)$$

где \tilde{x}_i – кодированное значение фактора; x_i – действительное значение фактора; x_{i0} – нулевой уровень фактора; Δx_i – шаг варьирования фактора.

Границы изменения факторов представлены в табл. 5.4.

Границы изменения факторов

Фактор	$X_{i\min}$ -1	$X_{i\text{ср}}$ 0	$X_{i\max}$ 1	$\Delta X_i = \frac{X_{i\max} - X_{i\min}}{2}$
$x_1 \rightarrow l_{\text{ср}}, \text{ м}$	10	55	100	45
$x_2 \rightarrow 1/n$	10	15	20	5
$x_3 \rightarrow r_{\text{э}20} (S \text{ мм}^2)$	0,261	1,108	1,956	0,848
$x_4 \rightarrow k_3^2$	0,09	0,545	1,00	0,455
$x_5 \rightarrow \theta_0, \text{ }^\circ\text{C}$	5	20	35	15

$\hat{R}_3, \hat{R}_3, \hat{\Delta P}, \hat{\Delta P}$ в табл. 5.3 – значения функций цели, вычисленные по регрессионным моделям (4.17) и (4.18):

$$\begin{aligned} R_3 = & 5,4 + 4,2 x_1 - 1,7 x_2 - 3,9 x_3 + 0,53 x_4 + \\ & + 0,23 x_5 - 1,3 x_1 x_2 - 3,19 x_1 x_3 + 0,44 x_1 x_4 + 1,22 x_2 x_3 - \\ & - 0,24 x_2 x_4 - 0,4 x_3 x_4 + 0,95 x_4 x_5. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta P = & 48 + 36,4 x_1 - 16 x_2 + 11,2 x_3 + 41,5 x_4 + \\ & + 3,34 x_5 - 12 x_1 x_2 + 11 x_1 x_3 + 31,4 x_1 x_4 + 3,62 x_2 x_3 - \\ & - 13,9 x_2 x_4 + 9,8 x_3 x_4 + 10,5 x_3 x_5. \end{aligned}$$

Таким образом, можно считать, что значения \hat{R}_3 и $\hat{\Delta P}$, представленные в табл. 5.3, это выборка, полученная в результате проведения $n = 10$ независимых наблюдений за случайной величиной X , которой в нашем случае является эквивалентное сопротивление цеховой сети \hat{R}_3 и потери мощности $\hat{\Delta P}$,

впервые опубликованные в работах [47; 109]. \hat{R}_3 и ΔP можно считать случайными величинами и разброс значений величины эквивалентного сопротивления \hat{R}_3 и потерь мощности ΔP из табл. 5.3 можно считать значениями случайной величины в i -м опыте, т. е. условно это можно записать $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_n\}$. Согласно [168] принимаем, что случайные величины y_1, y_2, \dots, y_n – независимы, закон распределения любой из них совпадает с законом распределения случайной величины X (т. е. $x_i \approx N(a, \sigma)$, где $a = MX$ – математическое ожидание, $\sigma = DX$ – дисперсия функции цели). Поскольку a и σ неизвестны, то доверительный интервал для математического ожидания определим на основе вычисления нечеткой регрессионной модели [47], комбинированной с методом наименьших квадратов.

Для этого сначала находим выборочное среднее, представляющее собой коэффициенты уравнений регрессии (4.17) и (4.18) по выражению:

$$\bar{X}_B = \bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i, \quad (5.30)$$

где n – число опытов, $n = 16$; y_i – значение \hat{R}_3 в i -м опыте.

Так, например, найдем доверительный интервал для $b_0 = 5,4$ из полинома для вычисления R_3 (данные для вычислений из табл. П.В.1).

1. Выборочное среднее:

$$\begin{aligned} \bar{X}_B = \bar{X} &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i = \\ &= \frac{2,5 + 19,3 + 1,12 + 10,7 + 0,59 + 3,15 + 0,31 + 1,43 + 2,7 + 24,6 + 1,38 + 12,3}{16} + \\ &+ \frac{0,66 + 3,58 + 0,33 + 1,79}{16} = 5,4. \end{aligned}$$

Принимаем доверительную вероятность $\gamma = 0,95$.

2. Затем находим исправленное среднее квадратическое отклонение R_3 ,
 вычисленное по выборке:

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{X})^2}, \quad (5.31)$$

где n – число опытов, $n = 16$; y_i – значение R_3 в i -м опыте; \bar{X} – выборочное среднее.

3. Среднее квадратическое отклонение:

$$\begin{aligned} S &= \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{X})^2} = \\ &= \sqrt{\frac{(2,5 - 5,4)^2 + (19,3 - 5,4)^2 + (1,12 - 5,4)^2 + (10,7 - 5,4)^2}{15}} + \\ &+ \sqrt{\frac{(0,59 - 5,4)^2 + (3,15 - 5,4)^2 + (0,31 - 5,4)^2 + (1,43 - 5,4)^2}{15}} + \\ &+ \sqrt{\frac{(2,77 - 5,4)^2 + (24,6 - 5,4)^2 + (1,38 - 5,4)^2 + (12,3 - 5,4)^2}{15}} + \\ &+ \sqrt{\frac{(0,66 - 5,4)^2 + (3,58 - 5,4)^2 + (0,33 - 5,4)^2 + (1,79 - 5,4)^2}{15}} = 7,4. \end{aligned}$$

4. Далее по [20] находим значение ε по выражению:

$$\varepsilon = t_\gamma \cdot \frac{S}{\sqrt{n}}, \quad (5.32)$$

где t_γ – квантиль уровня; $t_\gamma = 1 - \gamma = 1 - 0,95 = 0,05$.

Значение квантиля t_γ находим по таблице квантилей распределения Стьюдента [20], для доверительной вероятности $\gamma = 0,95$ и числа степеней свободы $k = n - 1 = 16 - 1 = 15$ $t_\gamma = 2,13$.

Определяем ε :

$$\varepsilon = t_\gamma \cdot \frac{S}{\sqrt{n}} = 2,13 \cdot \frac{7,4}{\sqrt{16}} = 3,9.$$

5. Тогда доверительный интервал:

$$(\bar{X} - \varepsilon, \bar{X} + \varepsilon) = (\tilde{\theta}_1, \tilde{\theta}_2); \quad (5.33)$$

$$(\bar{X} - \varepsilon, \bar{X} + \varepsilon) = (5,4 - 3,9; 5,4 + 3,9) = (1,5; 9,3).$$

Расчет для остальных b_i проводим аналогично, результаты представлены в табл. 5.5.

Таблица 5.5

Вычисление доверительных интервалов для регрессионной модели
определения эквивалентного сопротивления при $\gamma = 0,95$

Номер коэффициента регрессии	\bar{X}_B	S	ε	$\bar{X}_B - \varepsilon$	$\bar{X}_B + \varepsilon$
1	2	3	4	5	6
b_0	5,4	7,4	3,9	1,5	9,3
b_1	4,2	8,2	4,4	-0,2	8,6
b_2	-1,7	9,1	4,8	-6,6	3,1
b_3	-3,9	8,3	4,4	-8,4	0,5
b_4	0,53	9,2	4,9	-4,4	5,4
b_5	0,23	9,3	4,9	-4,7	5,2
b_{12}	-1,3	9,2	4,9	-6,2	3,6
b_{13}	-3,2	8,7	4,6	-7,8	1,4
b_{14}	0,44	9,3	4,9	-4,5	5,4

1	2	3	4	5	6
b_{23}	1,22	9,2	4,9	-3,7	6,1
b_{24}	-0,24	9,3	4,9	-5,2	4,7
b_{34}	-0,42	9,3	4,9	-5,3	4,5
b_{45}	0,95	9,3	4,9	-4	5,9

Пример определения $m_j = \bar{X}$ – нечеткого центра, $c_j = \varepsilon$ – половины нечеткого основания и доверительного интервала для b_0 из уравнения регрессии для определения потерь мощности ΔP выражение (4.18) (по табл. П.В.1).

1. Выборочное среднее:

$$\begin{aligned} \bar{X}_B = \bar{X} &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i = \\ &= \frac{2,38 + 18,7 + 1,08 + 10,4 + 2,3 + 12,2 + 1,21 + 5,57 + 29,9 + 26,6}{16} + \\ &+ \frac{14,9 + 13,3 + 28,7 + 155 + 14,3 + 77,3}{16} = 48. \end{aligned}$$

2. Среднее квадратическое отклонение:

$$\begin{aligned} S &= \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2} = \\ &= \sqrt{\frac{(2,38 - 48)^2 + (18,7 - 48)^2 + (1,08 - 48)^2 + (10,4 - 48)^2}{15} +} \\ &+ \sqrt{\frac{(2,3 - 48)^2 + (12,2 - 48)^2 + (1,21 - 48)^2 + (5,57 - 48)^2}{15} +} \\ &+ \sqrt{\frac{(29,9 - 48)^2 + (266 - 48)^2 + (14,9 - 48)^2 + (133 - 48)^2}{15} +} \\ &+ \sqrt{\frac{(28,7 - 48)^2 + (155 - 48)^2 + (14,3 - 48)^2 + (77,3 - 48)^2}{15}} = 74,6. \end{aligned}$$

3. Определяем ε :

$$\varepsilon = t_{\gamma} \cdot \frac{S}{\sqrt{n}} = 2,13 \cdot \frac{74,6}{\sqrt{16}} = 39,8.$$

4. Доверительный интервал:

$$(\bar{X} - \varepsilon, \bar{X} + \varepsilon) = (48 - 39,8; 48 + 39,8) = (8,5; 87,9).$$

Расчет для остальных b_i из уравнения регрессии определения потерь мощности ΔP проводим аналогично, результаты представлены в табл. 5.6.

Таблица 5.6

Вычисление доверительных интервалов для регрессионной модели
определения потерь мощности в сети при $\gamma = 0,95$

Номер коэффициента регрессии	\bar{X}_B	S	ε	$\bar{X}_B - \varepsilon$	$\bar{X}_B + \varepsilon$
1	2	3	4	5	6
b_0	48,2	74,6	39,75	8,491	87,99
b_1	36,4	81,5	43,4	-7	79,79
b_2	-16	88,2	46,97	-63	30,93
b_3	11,2	89	47,39	-36,16	58,6
b_4	41,5	78,9	41,99	-0,48	83,49
b_5	3,34	89,7	47,76	-44,4	51,1
b_{12}	-12,1	88,9	47,33	-59,4	35,24
b_{13}	11	89	47,41	-36,39	58,4
b_{14}	31,4	83,7	44,56	-13,2	75,96
b_{23}	3,62	89,7	47,75	-44,1	51,38
b_{24}	-13,9	88,6	47,18	-61,1	33,31
b_{34}	-9,83	89,2	47,49	-37,66	57,3
b_{35}	10,5	89,1	47,44	-36,93	58

Далее по данным табл. 5.5 и 5.6 составляем нечеткие регрессионные модели с нечеткими параметрами $\tilde{B}_j = (m_j, c_j)$, где $m_j = \bar{X}$ – нечеткий центр, $c_j = \varepsilon$ – половина нечеткого основания.

В результате получаем следующие нечеткие уравнения регрессии при доверительной вероятности $\gamma = 0,95$:

$$\begin{aligned}
 R_9 &= (m_0, c_0) + (m_1, c_1) x_1 + (m_2, c_2) x_2 + (m_3, c_3) x_3 + (m_4, c_4) x_4 + \\
 &+ (m_5, c_5) x_5 + (m_{12}, c_{12}) x_1 x_2 + (m_{13}, c_{13}) x_1 x_3 + (m_{14}, c_{14}) x_1 x_4 + \\
 &+ (m_{23}, c_{23}) x_2 x_3 + (m_{24}, c_{24}) x_2 x_4 + (m_{34}, c_{34}) x_3 x_4 + (m_{45}, c_{45}) x_4 x_5 = \\
 &= (5,4; 3,9) + (4,2; 4,4) x_1 + (-1,7; 4,8) x_2 + (-3,9; 4,4) x_3 + \\
 &+ (0,53; 4,9) x_4 + (0,23; 4,9) x_5 + (-1,3; 4,9) x_1 x_2 + \\
 &+ (-3,2; 4,6) x_1 x_3 + (0,44; 4,9) x_1 x_4 + (1,22; 4,9) x_2 x_3 + \\
 &+ (-0,24; 4,9) x_2 x_4 + (-0,42; 4,9) x_3 x_4 + (0,95; 4,9) x_4 x_5. \quad (5.34)
 \end{aligned}$$

Уравнение регрессии для вычисления эквивалентного сопротивления с учетом доверительных интервалов (по табл. 5.5):

$$\begin{aligned}
 R_9 &= (1,5; 9,3) + (-0,2; 8,6) x_1 + (-6,6; 3,1) x_2 + (-8,4; 0,5) x_3 + (-4,4; 5,4) x_4 + \\
 &+ (-4,7; 5,2) x_5 + (-6,2; 3,6) x_1 x_2 + (-7,8; 1,4) x_1 x_3 + (-4,5; 5,4) x_1 x_4 + \\
 &+ (-3,7; 6,1) x_2 x_3 + (-5,2; 4,7) x_2 x_4 + (-5,3; 4,5) x_3 x_4 + (-4; 5,9) x_4 x_5. \quad (5.35)
 \end{aligned}$$

Нечеткие уравнения регрессии для вычисления потерь мощности при доверительной вероятности $\gamma = 0,95$ (по табл. 5.6):

$$\begin{aligned}
 \Delta P &= (m_0, c_0) + (m_1, c_1) x_1 + (m_2, c_2) x_2 + (m_3, c_3) x_3 + (m_4, c_4) x_4 + \\
 &+ (m_5, c_5) x_5 + (m_{12}, c_{12}) x_1 x_2 + (m_{13}, c_{13}) x_1 x_3 + (m_{14}, c_{14}) x_1 x_4 + \\
 &+ (m_{23}, c_{23}) x_2 x_3 + (m_{24}, c_{24}) x_2 x_4 + (m_{34}, c_{34}) x_3 x_4 + (m_{45}, c_{45}) x_4 x_5 =
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= (48,2; 39,7) + (36,4; 43,4) x_1 + (-16; 46,97) x_2 + (11,2; 47,39) x_3 + \\
&\quad + (41,5; 41,9) x_4 + (3,34; 47,76) x_5 + (-12,1; 47,33) x_1 x_2 + \\
&\quad + (11; 47,41) x_1 x_3 + (31,4; 44,56) x_1 x_4 + (3,62; 47,75) x_2 x_3 + \\
&\quad + (-13,9; 47,18) x_2 x_4 + (-9,83; 47,49) x_3 x_4 + (10,5; 47,44) x_3 x_5. \quad (5.36)
\end{aligned}$$

Уравнение регрессии для вычисления потерь мощности с учетом доверительных интервалов (по табл. 5.6):

$$\begin{aligned}
\Delta P &= (8,4; 87,99) + (-7; 79,79) x_1 + (-63; 30,93) x_2 + \\
&\quad + (-36,16; 58,6) x_3 + (-0,48; 83,49) x_4 + (-44,4; 51,1) x_5 + \\
&\quad + (-59,4; 35,24) x_1 x_2 + (-36,39; 58,4) x_1 x_3 + (-13,2; 75,96) x_1 x_4 + \\
&\quad + (-44,1; 51,38) x_2 x_3 + (-61,1; 33,31) x_2 x_4 + (-37,66; 57,3) x_3 x_4 + \\
&\quad + (-36,93; 58) x_3 x_5. \quad (5.37)
\end{aligned}$$

В данных уравнениях доверительные интервалы позволяют наглядно доказать, что внутри этих интервалов лежат истинные значения коэффициентов регрессии, которые дают наиболее точные значения функций цели.

Далее составляем нечеткие регрессионные модели с доверительной вероятностью $\gamma = 0,9$. Тогда значение квантиля t_γ находим также по таблице квантилей распределения Стьюдента [20], для доверительной вероятности $\gamma = 0,9$ и числа степеней свободы $k = n - 1 = 16 - 1 = 15$ $t_\gamma = 1,75$. Очевидно, что уменьшение надежности γ приведет к сужению доверительного интервала, а следовательно, и к увеличению точности оценки. Расчет коэффициентов регрессии ведем аналогично по выражениям (5.30)–(5.33), результаты представлены в табл. 5.7, 5.8.

Вычисление доверительных интервалов для регрессионной модели
определения эквивалентного сопротивления при $\gamma = 0,9$

Номер коэффициента регрессии	\bar{X}_B	S	ε	$\bar{X}_B - \varepsilon$	$\bar{X}_B + \varepsilon$
1	2	3	4	5	6
b_0	5,4	7,4	3,2	2,16	8,6
b_1	4,2	8,2	3,6	0,62	7,8
b_2	-1,7	9,1	4	-5,7	2,2
b_3	-3,9	8,3	3,6	-7,6	-0
b_4	0,53	9,2	4	-3,5	4,6
b_5	0,23	9,3	4,1	-3,8	4,3
b_{12}	-1,3	9,2	4	-5,3	2,7
b_{13}	-3,2	8,7	3,8	-7	0,6
b_{14}	0,44	9,3	4	-3,6	4,5
b_{23}	1,22	9,2	4	-2,8	5,2
b_{24}	-0,24	9,3	4,1	-4,3	3,8
b_{34}	-0,42	9,3	4	-4,5	3,6
b_{45}	0,95	9,3	4,1	-3,1	5

Вычисление доверительных интервалов для регрессионной модели
определения потерь мощности в сети при $\gamma = 0,9$

Номер коэффициента регрессии	\bar{X}_B	S	ε	$\bar{X}_B - \varepsilon$	$\bar{X}_B + \varepsilon$
b_0	48,2	74,6	33	15,6	80,9
b_1	36,4	81,5	36	0,74	72,1
b_2	-16	88,2	39	-54,6	22,5
b_3	11,2	89	39	-27,7	50,2
b_4	41,5	78,9	34	7,01	76
b_5	3,34	89,7	39	-35,9	42,6
b_{12}	-12,1	88,9	39	-51	26,8
b_{13}	11	89	39	-27,9	50
b_{14}	31,4	83,7	37	-5,21	68
b_{23}	3,62	89,7	39	-35,6	42,9
b_{24}	-13,9	88,6	39	-52,6	24,9
b_{34}	-9,83	89,2	39	-29,2	48,8
b_{35}	10,5	89,1	39	-28,5	49,5

Таким образом, получаем следующие регрессионные зависимости для вычисления эквивалентного сопротивления при доверительной вероятности $\gamma = 0,9$ (табл. 5.7):

$$\begin{aligned}
 R_3 &= (m_0, c_0) + (m_1, c_1) x_1 + (m_2, c_2) x_2 + (m_3, c_3) x_3 + (m_4, c_4) x_4 + \\
 &+ (m_5, c_5) x_5 + (m_{12}, c_{12}) x_1 x_2 + (m_{13}, c_{13}) x_1 x_3 + (m_{14}, c_{14}) x_1 x_4 + \\
 &+ (m_{23}, c_{23}) x_2 x_3 + (m_{24}, c_{24}) x_2 x_4 + (m_{34}, c_{34}) x_3 x_4 + (m_{45}, c_{45}) x_4 x_5 = \\
 &= (5,4; 3,2) + (4,2; 3,6) x_1 + (-1,7; 4) x_2 + (-3,9; 3,6) x_3 +
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + (0,53; 4) x_4 + (0,23; 4,1) x_5 + (-1,3; 4) x_1 x_2 + \\
& + (-3,2; 3,8) x_1 x_3 + (0,44; 4) x_1 x_4 + (1,22; 4) x_2 x_3 + \\
& + (-0,24; 4,1) x_2 x_4 + (-0,42; 4) x_3 x_4 + (0,95; 4,1) x_4 x_5. \quad (5.38)
\end{aligned}$$

Уравнения регрессии для вычисления эквивалентного сопротивления с учетом доверительных интервалов

$$\begin{aligned}
R_9 = & (2,16; 8,6) + (0,62; 7,8) x_1 + (-5,7; 2,2) x_2 + \\
& + (-7,6; 0) x_3 + (-3,5; 4,6) x_4 + (-3,8; 4,3) x_5 + \\
& + (-5,3; 2,7) x_1 x_2 + (-7; 0,6) x_1 x_3 + (-3,6; 4,5) x_1 x_4 + (-2,8; 5,2) x_2 x_3 + \\
& + (-4,3; 3,8) x_2 x_4 + (-4,5; 3,6) x_3 x_4 + (-3,1; 5) x_4 x_5. \quad (5.39)
\end{aligned}$$

Нечеткие уравнения регрессии для вычисления потерь мощности при доверительной вероятности $\gamma = 0,9$ (табл. 5.8):

$$\begin{aligned}
\Delta P = & (m_0, c_0) + (m_1, c_1) x_1 + (m_2, c_2) x_2 + (m_3, c_3) x_3 + (m_4, c_4) x_4 + \\
& + (m_5, c_5) x_5 + (m_{12}, c_{12}) x_1 x_2 + (m_{13}, c_{13}) x_1 x_3 + (m_{14}, c_{14}) x_1 x_4 + \\
& + (m_{23}, c_{23}) x_2 x_3 + (m_{24}, c_{24}) x_2 x_4 + (m_{34}, c_{34}) x_3 x_4 + (m_{45}, c_{45}) x_4 x_5 = \\
& = (48,2; 33) + (36,4; 36) x_1 + (-16; 39) x_2 + (11,2; 39) x_3 + \\
& + (41,5; 34) x_4 + (3,34; 39) x_5 + (-12,1; 39) x_1 x_2 + \\
& + (11; 39) x_1 x_3 + (31,4; 37) x_1 x_4 + (3,62; 39) x_2 x_3 + \\
& + (-13,9; 39) x_2 x_4 + (-9,83; 39) x_3 x_4 + (10,5; 39) x_3 x_5. \quad (5.40)
\end{aligned}$$

Уравнение регрессии для вычисления потерь мощности с учетом доверительных интервалов (по табл. 5.8):

$$\Delta P = (15,6; 80,9) + (0,74; 72,1) x_1 + (-54,6; 22,5) x_2 +$$

$$\begin{aligned}
& + (-27,7; 50,2) x_3 + (7,01; 76) x_4 + (-35,9; 42,6) x_5 + \\
& + (-51; 26,8) x_1 x_2 + (-27,9; 50) x_1 x_3 + (-5,21; 68) x_1 x_4 + \\
& + (-35,6; 42,9) x_2 x_3 + (-52,6; 24,9) x_2 x_4 + (-29,2; 48,8) x_3 x_4 + \\
& + (-28,5; 49,5) x_3 x_5 .
\end{aligned} \tag{5.41}$$

Расчет по разработанным нечетким регрессионным моделям ведется, как и в случае стандартной регрессии. Значения факторов x_1, x_2, \dots, x_5 подставляются последовательно в каждое из уравнений (5.34)–(5.41), данные выражения рассматриваются в следующем виде.

Выражение (5.34):

$$\begin{aligned}
R_{\text{э1m}} = & 5,4 + 4,2 x_1 - 1,7 x_2 - 3,9 x_3 + 0,53 x_4 + 0,23 x_5 - 1,3 x_1 x_2 - \\
& - 3,2 x_1 x_3 + 0,44 x_1 x_4 + 1,22 x_2 x_3 - 0,24 x_2 x_4 - 0,42 x_3 x_4 + 0,95 x_4 x_5;
\end{aligned} \tag{5.42}$$

$$\begin{aligned}
R_{\text{э1с}} = & 3,9 + 4,4 x_1 + 4,8 x_2 + 4,4 x_3 + 4,9 x_4 + 4,9 x_5 + 4,9 x_1 x_2 + \\
& + 4,6 x_1 x_3 + 4,9 x_1 x_4 + 4,9 x_2 x_3 + 4,9 x_2 x_4 + 4,9 x_3 x_4 + 4,9 x_4 x_5.
\end{aligned} \tag{5.43}$$

Выражение (5.35):

$$\begin{aligned}
R_{\text{э2m}} = & 1,5 - 0,2 x_1 - 6,6 x_2 - 8,4 x_3 - 4,4 x_4 - 4,7 x_5 - \\
& - 6,2 x_1 x_2 - 7,8 x_1 x_3 - 4,5 x_1 x_4 - 3,7 x_2 x_3 - 5,2 x_2 x_4 - 5,3 x_3 x_4 - 4 x_4 x_5;
\end{aligned} \tag{5.44}$$

$$\begin{aligned}
R_{\text{э2с}} = & 9,3 + 8,6 x_1 + 3,1 x_2 + 0,5 x_3 + 5,4 x_4 + 5,2 x_5 + 3,6 x_1 x_2 + 1,4 x_1 x_3 + \\
& + 5,4 x_1 x_4 + 6,1 x_2 x_3 + 4,7 x_2 x_4 + 4,5 x_3 x_4 + 5,9 x_4 x_5.
\end{aligned} \tag{5.45}$$

Выражение (5.38):

$$\begin{aligned}
R_{\text{э3с}} = & 5,4 + 4,2 x_1 - 1,7 x_2 - 3,9 x_3 + 0,53 x_4 + 0,23 x_5 - 1,3 x_1 x_2 - \\
& - 3,2 x_1 x_3 + 0,44 x_1 x_4 + 1,22 x_2 x_3 - 0,24 x_2 x_4 - 0,42 x_3 x_4 + 0,95 x_4 x_5;
\end{aligned} \tag{5.46}$$

$$R_{93m} = 3,2 + 3,6 x_1 + 4 x_2 + 3,6 x_3 + 4 x_4 + 4,1 x_5 + 4 x_1 x_2 +$$

$$+ 3,8 x_1 x_3 + 4 x_1 x_4 + 4 x_2 x_3 + 4,1 x_2 x_4 + 4 x_3 x_4 + 4,1 x_4 x_5. \quad (5.47)$$

Выражение 5.39:

$$R_{94c} = 2,16 + 0,62 x_1 - 5,7 x_2 - 7,6 x_3 - 3,5 x_4 - 3,8 x_5 - 5,3 x_1 x_2 -$$

$$- 7 x_1 x_3 - 3,6 x_1 x_4 - 2,8 x_2 x_3 - 4,3 x_2 x_4 - 4,5 x_3 x_4 - 3,1 x_4 x_5; \quad (5.48)$$

$$R_{94m} = 8,6 + 7,8 x_1 + 2,2 x_2 - 0 x_3 + 4,6 x_4 + 4,3 x_5 + 2,7 x_1 x_2 +$$

$$+ 0,6 x_1 x_3 + 4,5 x_1 x_4 + 5,2 x_2 x_3 + 3,8 x_2 x_4 + 3,6 x_3 x_4 + 5 x_4 x_5. \quad (5.49)$$

На рис. 5.6 представлен общий вид модели расчета регрессионных зависимостей для вычисления эквивалентного сопротивления по выражениям 5.42–5.49.

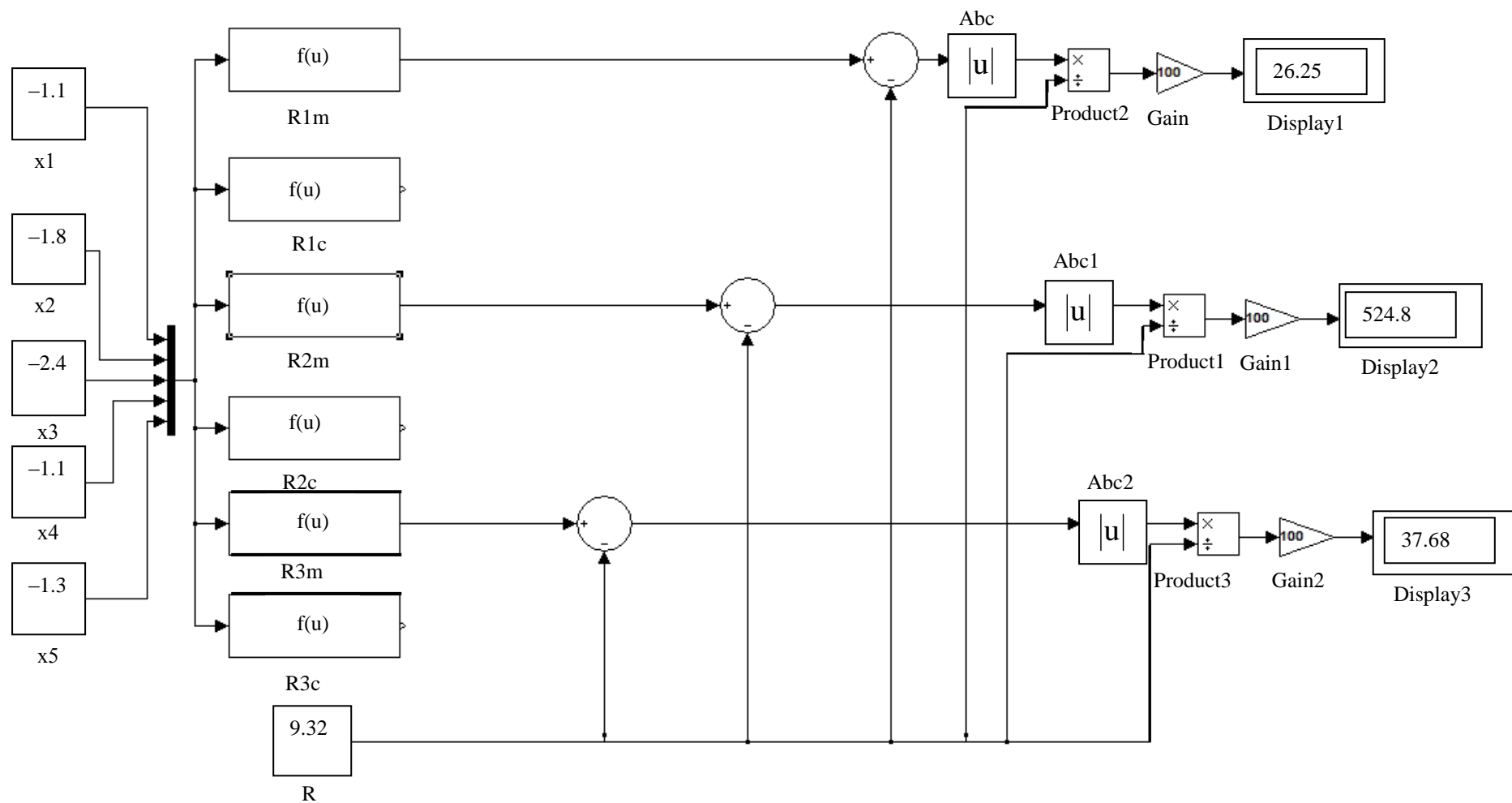


Рис. 5.6. Общий вид модели расчета регрессионных моделей для вычисления эквивалентного сопротивления на основе формул 5.42–5.49

Для задания необходимых значений используются блоки Constant, для совершения вычислительных операций блоки Fcn, Product (умножение) и Sum (сумма), согласно выражениям 5.42–5.49 Abs (абсолютное значение) отклонений предсказанных значений функции отклика от исходных данных. Производится расчет эквивалентного сопротивления R_3 , предсказанные значения эквивалентных сопротивлений и погрешность вычислений значений функции отклика от исходных данных для нечеткой и комбинированной регрессионных моделей. Рассчитанные данные выводятся на дисплей.

В табл. 5.9 представлены результаты расчета по разработанным регрессионным моделям. В табл. 5.9: \hat{R}_3 – предсказанные по модели значения функции отклика стандартной регрессионной модели; \hat{R}_{3m} – предсказанные по модели значения центра функции отклика нечеткой и комбинированной регрессионных моделей; \hat{R}_{3c} – предсказанные по модели значения половины разброса функции отклика нечеткой и комбинированной регрессионных моделей; $\left| \hat{R}_{3m} - R_3 \right|$ – абсолютные значения отклонений предсказанных значений функции отклика от исходных данных для стандартной регрессионной модели; $\left| \hat{R}_3 - R_3 \right|$ – абсолютные значения отклонений предсказанных значений функции отклика от исходных данных для нечеткой и комбинированной регрессионных моделей; R_3 – действительные значения функции отклика; δ_R – погрешность вычислений значений функции отклика от исходных данных для нечеткой и комбинированной регрессионных моделей.

Результаты расчета эквивалентного сопротивления по регрессионным моделям

Значение функции $R_э$	Стандартная регрессия			Результаты расчета регрессионных моделей								
				При $\gamma = 0,95$								
					Комбинированная регрессия				Нечеткая регрессия			
	$\hat{R}_э$	$ \hat{R}_э - R_э $	$\delta_R, \%$	$\hat{R}_{э1m}$	$\hat{R}_{э1c}$	$ \hat{R}_{э1m} - R_э $	$\delta_R, \%$	$\hat{R}_{э2m}$	$\hat{R}_{э2c}$	$ \hat{R}_{э2m} - R_э $	$\delta_R, \%$	
9,32	9,32	0	0	9,32	9,5	0	0	9,8	8,8	0,5	5,35	
5,87	6,11	0,24	4,1	6,11	4,3	0,24	4,1	5,19	5,5	0,68	11,6	
1,12	1,22	0,1	8,9	1,22	2,2	0,1	8,9	1,1	1,2	0,02	1,8	
12,6	11,6	1	7,9	11,6	10,6	1	7,9	13,3	16,5	0,7	5,6	
3,42	3,06	0,36	10,4	3,06	3,6	0,36	10,4	3,92	1,4	0,5	14,6	
2,37	2,14	0,23	9,7	2,14	2,8	0,23	9,7	2,1	2,8	0,26	10,9	
5,57	5,14	0,44	7,84	5,14	5,4	0,44	7,84	5,2	4,9	0,37	6,6	
8,53	8,13	0,4	4,7	8,13	8,5	0,4	4,7	8,7	9,1	0,1	1,99	
5,16	5,16	0	0	5,16	7,1	0	0	5,9	6,9	0,74	14,3	
9,89	9,12	0,77	7,79	9,12	9,4	0,77	7,79	10,99	8,1	1,1	11,1	
Значение функции $R_э$	Стандартная регрессия			Результаты расчета регрессионных моделей								
				При $\gamma = 0,9$								
					Комбинированная регрессия				Нечеткая регрессия			
	$\hat{R}_э$	$ \hat{R}_э - R_э $	$\delta_R, \%$	$\hat{R}_{э3m}$	$\hat{R}_{э3c}$	$ \hat{R}_{э3m} - R_э $	$\delta_R, \%$	$\hat{R}_{э4m}$	$\hat{R}_{э4c}$	$ \hat{R}_{э4m} - R_э $	$\delta_R, \%$	
9,32	9,32	0	0	9,32	9,3	0	0	9,7	8,9	0,38	4,39	
5,87	6,11	0,24	4,1	6,11	5,3	0,24	4,1	6,06	8,1	0,19	3,2	
1,12	1,22	0,1	8,9	1,22	3,2	0,1	8,9	1,2	1,8	0,08	7,1	
12,6	11,6	1	7,9	11,6	9,8	1	7,9	13,6	8,1	1	7,9	
3,42	3,06	0,36	10,4	3,06	4,7	0,36	10,4	3,9	2,1	0,48	14	
2,37	2,14	0,23	9,7	2,14	3,9	0,23	9,7	2,87	11	0,50	21,1	
5,57	5,14	0,44	7,84	5,14	5,8	0,44	7,84	5,1	4,3	0,47	8,4	
8,53	8,13	0,4	4,7	8,13	8,8	0,4	4,7	9,5	18	1,02	12	
5,16	5,16	0	0	5,16	7,7	0	0	5,4	8,4	0,25	4,76	
9,89	9,12	0,77	7,79	9,12	8,4	0,77	7,79	9,69	9	0,2	2	

Результаты расчета регрессионных моделей для вычисления потерь мощности

Значение функции ΔP	Стандартная регрессия			Результаты расчета регрессионных моделей								
				При $\gamma = 0,95$								
					Комбинированная регрессия				Нечеткая регрессия			
	$\hat{\Delta P}$	$ \hat{\Delta P} - \Delta P $	$\delta_{\Delta P}, \%$	$\hat{\Delta P}_{1m}$	$\hat{\Delta P}_{1c}$	$ \hat{\Delta P}_{1m} - \Delta P $	$\delta_{\Delta P}, \%$	$\hat{\Delta P}_{2m}$	$\hat{\Delta P}_{2c}$	$ \hat{\Delta P}_{2m} - \Delta P $	$\delta_{\Delta P}, \%$	
59,5	59,5	0	0	59,5	57,64	0	0	54,79	53,82	4,71	7,9	
29,2	25,5	3,7	12,4	25,5	25,09	3,7	12,4	31,10	22,50	0,9	3,1	
40,8	40,8	0	0	40,8	56,49	0	0	41,15	43,1	0,35	0,8	
47,9	44,3	3,6	7,57	44,3	47,34	3,6	7,57	51,16	47,78	3,26	6,8	
43,1	39,5	3,6	8,41	39,5	44,77	3,6	8,41	41,02	41,16	1,99	4,6	
6,38	6,58	0,5	7,8	6,58	10,9	0,5	6,58	7,8	6,35	1,42	22,3	
21,2	21,2	0	0	21,2	24,24	0	0	23,86	21,25	2,66	12,5	
82,2	85,8	3,6	4,41	85,8	84,35	3,6	4,41	85,01	81,24	2,81	3,4	
37	37	0	0	37	38,71	0	0	32,03	38,48	4,97	13,4	
144	141	3	2,51	141	159,54	3	2,51	148,49	138,79	4,49	3,1	
Значение функции ΔP	Стандартная регрессия			Результаты расчета регрессионных моделей								
				При $\gamma = 0,9$								
					Комбинированная регрессия				Нечеткая регрессия			
	$\hat{\Delta P}$	$ \hat{\Delta P} - \Delta P $	$\delta_{\Delta P}, \%$	$\hat{\Delta P}_{3m}$	$\hat{\Delta P}_{3c}$	$ \hat{\Delta P}_{3m} - \Delta P $	$\delta_{\Delta P}, \%$	$\hat{\Delta P}_{4m}$	$\hat{\Delta P}_{4c}$	$ \hat{\Delta P}_{4m} - \Delta P $	$\delta_{\Delta P}, \%$	
59,5	59,5	0	0	59,5	56,28	0	0	53,8	54,47	5,61	9,4	
29,2	25,5	3,7	12,4	25,5	24,18	3,7	12,4	31,0	37,57	1,8	6,2	
40,8	40,8	0	0	40,8	46,4	0	0	51,03	51,79	10,23	25,1	
47,9	44,3	3,6	7,57	44,3	46,03	3,6	7,57	43,69	46,98	4,21	8,8	
43,1	39,5	3,6	8,41	39,5	36,8	3,6	8,41	48,3	49,68	5,2	12,1	
6,38	6,58	0,5	7,8	6,58	9,09	0,5	6,58	7,13	5,6	0,75	11,8	
21,2	21,2	0	0	21,2	23,48	0	0	24,6	31,18	3,4	16	
82,2	85,8	3,6	4,41	85,8	83,58	3,6	4,41	93,4	91,08	11,2	13,6	
37	37	0	0	37	37,16	0	0	31,9	29,5	5,1	13,8	
144	141	3	2,51	141	148,9	3	2,51	115,6	128,09	28,4	19,7	

Для ΔP расчет ведется аналогично.

Выражение (5.36):

$$\begin{aligned} \Delta P_{1m} = & 48,2 + 36,4 x_1 - 16 x_2 + 11,2 x_3 + 41,5 x_4 + 3,34 x_5 - 12,1 x_1 x_2 - \\ & + 11 x_1 x_3 + 31,4 x_1 x_4 + 3,62 x_2 x_3 - 13,9 x_2 x_4 + 9,83 x_3 x_4 + 10,5 x_3 x_5; \end{aligned} \quad (5.50)$$

$$\begin{aligned} \Delta P_{1c} = & 39,7 + 43,4 x_1 + 46,97 x_2 + 47,39 x_3 + 41,9 x_4 + \\ & + 47,76 x_5 + 47,33 x_1 x_2 + 47,41 x_1 x_3 + 44,56 x_1 x_4 + 47,75 x_2 x_3 + \\ & + 47,18 x_2 x_4 + 47,49 x_3 x_4 + 47,44 x_3 x_5. \end{aligned} \quad (5.51)$$

Выражение (5.37):

$$\begin{aligned} \Delta P_{2m} = & 8,4 - 7 x_1 - 63 x_2 + 58,6 x_3 - 0,48 x_4 - 44,4 x_5 - \\ & - 59,4 x_1 x_2 + 58,4 x_1 x_3 - 13,2 x_1 x_4 - 44,1 x_2 x_3 - 61,1 x_2 x_4 - \\ & + 57,3 x_3 x_4 + 58 x_3 x_5; \end{aligned} \quad (5.52)$$

$$\begin{aligned} \Delta P_{2c} = & 87,99 + 79,79 x_1 + 30,93 x_2 + 36,16 x_3 + 83,49 x_4 + 51,1 x_5 + \\ & + 35,24 x_1 x_2 + 36,39 x_1 x_3 + 75,96 x_1 x_4 + \\ & + 51,38 x_2 x_3 + 33,31 x_2 x_4 + 37,66 x_3 x_4 + 36,93 x_3 x_5. \end{aligned} \quad (5.53)$$

Выражение (5.40):

$$\begin{aligned} \Delta P_{3m} = & 48,2 + 36,4 x_1 - 16 x_2 + 11,2 x_3 + 41,5 x_4 + 3,34 x_5 - 12,1 x_1 x_2 - \\ & + 11 x_1 x_3 + 31,4 x_1 x_4 + 3,62 x_2 x_3 - 13,9 x_2 x_4 + 9,83 x_3 x_4 + 10,5 x_3 x_5; \end{aligned} \quad (5.54)$$

$$\begin{aligned} \Delta P_{3c} = & 33 + 36 x_1 + 39 x_2 + 39 x_3 + 34 x_4 + 39 x_5 + 39 x_1 x_2 + \\ & + 39 x_1 x_3 + 37 x_1 x_4 + 39 x_2 x_3 + 39 x_2 x_4 + 39 x_3 x_4 + 39 x_3 x_5. \end{aligned} \quad (5.55)$$

Выражение (5.41):

$$\Delta P_{4m} = 15,6 + 0,74 x_1 - 54,6 x_2 + 50,2 x_3 + 7,01 x_4 - 35,9 x_5 - 51 x_1 x_2 -$$

$$+ 50 x_1 x_3 - 5,21 x_1 x_4 - 35,6 x_2 x_3 - 52,6 x_2 x_4 + 48,8 x_3 x_4 + 49,5 x_3 x_5; \quad (5.56)$$

$$\Delta P_{4c} = 80,9 + 72,1 x_1 + 22,5 x_2 + 27,7 x_3 + 76 x_4 + 42,6 x_5 + 26,8 x_1 x_2 +$$

$$+ 27,9 x_1 x_3 + 68 x_1 x_4 + 42,9 x_2 x_3 + 24,9 x_2 x_4 + 29,2 x_3 x_4 + 28,5 x_3 x_5. \quad (5.57)$$

В табл. 5.10 представлены результаты расчета полученных регрессионных моделей (5.50)–(5.57). В табл. 5.10: $\hat{\Delta P}$ – предсказанные по модели значения функции отклика стандартной регрессионной модели; $\hat{\Delta P}_m$ – предсказанные по модели значения центра функции отклика нечеткой и комбинированной регрессионных моделей; $\hat{\Delta P}_c$ – предсказанные по модели значения половины разброса функции отклика нечеткой и комбинированной регрессионных моделей; $\left| \hat{\Delta P}_m - \Delta P \right|$ – абсолютные значения отклонений предсказанных значений функции отклика от исходных данных для стандартной регрессионной модели; $\left| \hat{\Delta P} - \Delta P \right|$ – абсолютные значения отклонений предсказанных значений функции отклика от исходных данных для нечеткой и комбинированной регрессионных моделей; ΔP – действительные значения функции отклика; $\delta_{\Delta P}$ – погрешность вычислений значений функции отклика от исходных данных для нечеткой и комбинированной регрессионных моделей.

Таким образом, исходная информация о зависимых переменных – эквивалентном сопротивлении R_3 и потерях мощности ΔP – задана детерминированно (табл. 5.3), что позволяет осуществлять построение,

как стандартной регрессионной модели, так и нечетких регрессионных моделей. Центральная линия регрессии комбинированного метода совпадает со стандартной линией регрессии, о чем свидетельствует равенство коэффициентов регрессии в уравнениях стандартной регрессии с коэффициентами, обозначающими выборочные средние значения (5.30). Однако наличие уравнений, содержащих доверительные интервалы, позволяет учесть вариант с неопределенной исходной информацией. Таким образом, если невозможно точно определить коэффициенты регрессии, то можно указать интервал, в котором находятся точные значения, что уже существенно облегчает расчеты. Кроме того, уменьшение надежности γ (доверительной вероятности, т. е. вероятности того, что в полученном интервале значений лежит истинное значение величины сопротивления линии и потерь мощности в линиях цеховой сети) приведет к сужению доверительного интервала, а следовательно, и к увеличению точности оценки.

Результаты исследований показывают, что наиболее точные расчеты дают стандартные модели и комбинированные регрессионные модели, нечеткие позволяют наметить диапазон изменения коэффициентов регрессии.

Определенную роль играет и число независимых экспериментов, которое составляет число степеней свободы. Число степеней свободы влияет на величину ε , которая характеризует точность оценки. Таким образом, в случае одинаковой доверительной вероятности увеличение числа опытов приведет к увеличению числа степеней свободы, а это в свою очередь позволит сузить доверительный интервал, а значит, точнее приблизиться к истинному значению, что особенно важно при нечеткой исходной информации.

5.7. Выводы по пятой главе

1. Показано, как изменяется эквивалентное сопротивление цеховых сетей в зависимости от приращения влияющих факторов.

2. Предложено в качестве оценочного критерия обобщенных параметров

электрооборудования использовать параметр $[y(x) - y(z)]^2$ – квадрат разности значений функции цели при изменении характеристик x и z соответственно.

При этом установлено, что чем ближе значение этого параметра к вычисленному значению $\rho^2(x, z)$ (определенная на X симметричная,

неотрицательная функция, порожденная неточностью модели $y(x)$ и задающая порог различения допустимых решений), тем более существенное влияние на функцию цели оказывает варьирование значений факторов. Другими

словами, если выполняется условие $[y(x) - y(z)]^2 < \rho^2(x, z)$, то эквивалентное сопротивление сети меняется незначительно.

3. Выявлено, что наиболее целесообразно разбивать на мелкие интервалы варьирования и расширять границы изменения таких факторов, как средняя длина линий; количество линий; величина, равная среднему удельному сопротивлению линий сети. Показано, что данные факторы оказывают наибольшее влияние на величину эквивалентного сопротивления, поэтому имеет смысл более детально рассмотреть интервалы варьирования этих факторов.

4. Показано, что в случае задания исходной информации о зависимых переменных – эквивалентном сопротивлении сети и потерях мощности – детерминировано (табл. 5.1) возможно осуществлять построение, как стандартной регрессионной модели, так и нечетких регрессионных моделей.

5. Установлено, что центральная линия регрессии комбинированного метода совпадает со стандартной линией регрессии, о чем свидетельствует равенство коэффициентов регрессии в уравнениях стандартной регрессии с коэффициентами, обозначающими выборочные средние значения

(табл. 5.9, 5.10). При этом наличие уравнений, содержащих доверительные интервалы, позволяет учесть вариант с неопределенной исходной информацией. Таким образом, если невозможно точно определить коэффициенты регрессии, следует указать интервал, в котором находятся точные значения, что уже существенно облегчает расчеты.

6. Установлено, что уменьшение надежности γ (доверительной вероятности, т.е. вероятности того, что в полученном интервале значений лежит истинное значение величины сопротивления линии и потерь мощности в линиях цеховой сети) приведет к сужению доверительного интервала, а следовательно, и к увеличению точности оценки.

7. Обосновано (табл. 5.9, 5.10), что наиболее точные расчеты дают стандартные модели и комбинированные регрессионные модели, нечеткие модели позволяют наметить диапазон изменения коэффициентов регрессии.

8. Проанализировано, что определенную роль играет и число независимых экспериментов, которое составляет число степеней свободы. При этом число степеней свободы характеризует точность оценки коэффициентов регрессии. Таким образом, в случае одинаковой доверительной вероятности увеличение числа опытов приведет к увеличению числа степеней свободы, а это в свою очередь позволит сузить доверительный интервал, а значит, точнее приблизиться к истинному значению коэффициентов регрессии, что особенно важно при нечеткой исходной информации.

Заключение

В результате теоретических и экспериментальных исследований, приведенных в диссертации, решена актуальная научно-техническая проблема в области электроснабжения, имеющая важное значение для экономики страны и заключающаяся в развитии теории и методов оценки эффективности функционирования низковольтных электрических сетей промышленных предприятий, что обеспечивает рациональное внедрение принципов энергосбережения.

Основные результаты и выводы диссертационной работы:

1. Проведен анализ современных методов определения потерь ЭЭ, который показал, что детерминированные методы имеют большие погрешности, связанные с отсутствием точной информации об исходных данных и принятием тех или иных допущений. Вероятностно-статистические методы расчета требуют большого количества исходной информации, а также сложных математических вычислений, что затрудняет их использование в случае многовариантного выполнения расчетов. Доказано, что при структурных изменениях схемы требуется периодическое исследование погрешностей методов расчета потерь. При выборе метода определения потерь ЭЭ необходимо соблюдать условие соответствия методической и информационной погрешностей. Определены области применения и выданы рекомендации по использованию методов расчета потерь ЭЭ в зависимости от исходной информации и требуемой точности вычислений.

2. Показано, что при расчетном способе определения потерь ЭЭ в линиях цеховых сетей необходимо иметь информацию о следующих параметрах оборудования:

- точном значении длин и количества линий цеховых сетей;
- перегреве проводников, обусловленном токовой нагрузкой провода и температурой окружающей среды;
- сопротивлению контактных соединений коммутационных аппаратов

и их числе, так как линии цеховых сетей при небольшой протяженности имеют большое количество последовательных узлов с коммутационной аппаратурой и, при этом, сопротивление аппаратов оказывается соизмеримым с сопротивлением линии;

– данных о графиках нагрузки.

3. По результатам экспериментальных исследований низковольтных коммутационных аппаратов, применяемых в цеховых сетях промышленного электроснабжения, установлено, что по конструктивным особенностям аппараты можно разделить на следующие 3 группы:

– аппараты, имеющие кроме силовых контактов в силовой цепи добавочные элементы (датчики тепловых реле, катушки максимальных реле), такие как автоматические выключатели, магнитные пускатели, контакторы;

– аппараты, имеющие относительно большое сопротивление силовой цепи, такие как предохранители;

– аппараты, имеющие только переходное сопротивление контактов, такие как рубильники, пакетные выключатели.

4. По результатам экспериментальных исследований выявлено, что сопротивления различных групп элементов силовой цепи аппаратов подчиняются общим для каждой группы закономерностям изменения, так, например, сопротивление болтовых присоединений подключения аппарата кабелем составляет незначительную долю в общем сопротивлении аппарата; основное сопротивление аппарата составляют сопротивления следующих элементов:

– контактной группы;

– датчика теплового реле;

– катушки максимального реле.

5. По результатам экспериментальных и теоретических исследований разработаны методы и аналитические выражения для определения сопротивлений контактных соединений низковольтных коммутационных аппаратов в зависимости от их номинальных данных и построены номограммы.

6. В результате экспериментальных исследований предложен критерий оценки технического состояния низковольтных коммутационных аппаратов, в качестве которого выступает сопротивление контактных соединений, позволяющий учесть динамику изменения потерь мощности, и установлены коэффициенты кратности (превышения) значения сопротивления контактов по величине их допустимого перегрева относительно номинальных значений.

7. Разработан метод комплексной оценки эффективности функционирования низковольтных коммутационных аппаратов и выявлены законы изменения сопротивлений контактных соединений низковольтных коммутационных аппаратов в зависимости от режимов эксплуатации.

8. Установлено, что для оценки и прогнозирования потерь ЭЭ в цеховых сетях целесообразно разрабатывать регрессионные модели определения эквивалентного сопротивления цеховых сетей в функции основных параметров оборудования, как длина, загрузка и сечение линий сети, количество коммутационных аппаратов на линии и температура окружающей среды. Эти модели учитывают динамику изменения схемных и режимных характеристик электрических сетей, а значит, пригодны для многократного использования.

Обосновано, что целесообразно формировать графические зависимости, позволяющие определять эквивалентное сопротивление цеховых сетей любой конфигурации.

9. Показано, что разработанные регрессионные модели при доступном объеме исходной информации обеспечивают достаточную (10 %) точность, подтвержденную поэлементным расчетом для схем цеховых сетей различной конфигурации.

10. Разработаны методы и математические модели нечеткого регрессионного анализа для случая неопределенности задания исходной информации, что приводит к увеличению точности оценки потерь ЭЭ.

Литература

1. Аврааменко А.В. Планирование и анализ потерь энергии с помощью регрессионных моделей / А.В. Аврааменко, В.А. Богданов, Е.И. Петряев, М.Г. Портной // Электрические станции. – 1987. – № 4. – С. 6–9.
2. Адлер Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю.П. Адлер, Е.В. Маркова, Ю.В. Грановский. – М.: Наука, 1976. – 280 с.
3. Адонц Г.Т. Методы расчета и способы снижения расхода электроэнергии в электрических сетях энергосистем / Г.Т. Адонц, А.А. Арутюнян. – Ереван: Луйс, 1986. – 183 с.
4. Анисимов Л.П. Методика расчета потерь энергии в действующих распределительных сетях / Л.П. Анисимов, М.С. Левин, В.Т. Пекелис // Электричество. – 1975. – № 4. – С. 27–30.
5. Анчарова Т.В. Экономия электроэнергии на промышленных предприятиях / Т.В. Анчарова, С.И. Гамазин, В.В. Шевченко. – М.: Высш. шк., 1990. – 143 с.
6. Арзамасцев Д.А. Снижение технологического расхода энергии в электрических сетях / Д.А. Арзамасцев, А.В. Липес. – М.: Высш. шк., 1989. – 124 с.
7. Баламетов А.Б. Расчет потерь электроэнергии в распределительных сетях имитационным моделированием графиков нагрузки в виде непрерывной функции / А.Б. Баламетов, С.Г. Мамедов, Х.Т. Алиев, Э.Д. Халилов // Электрика. – 2009. – № 2. – С. 20–25.
8. Баркан Я.Д. Использование статистической информации о качестве электроэнергии в электрических сетях / Я.Д. Баркан, Н.С. Маркушевич. – М.: Энергия, 1972. – 120 с.
9. Барнес С. Силовые кабели: пер. с англ. / С. Барнес; под ред. С.С. Городецкого. – М.: Энергия, 1974. – 288 с.

10. Белашов В.Ю. Составление и анализ балансов потребления электрической энергии промышленными предприятиями: учеб. пособие / В.Ю. Белашов, В.Ю. Иванов, Е.И. Грачева. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2003. – 148 с.
11. Бжицкий В.Н. Экономия электроэнергии в устройствах электроснабжения / В.Н. Бжицкий // Электрическая тепловозная тяга. – 1980. – № 2. – С. 2–4.
12. Биллингтон Р. Оценка надежности электроэнергетических систем / Р. Биллингтон, Р. Аллан. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 286 с.
13. Бородюк В.П. Статистическое описание промышленных объектов / В.П. Бородюк, Э.К. Лецкий. – М.: Энергия, 1971. – С. 112.
14. Браммеллер А. Слабозаполненные матрицы: Анализ электроэнергетических систем / А. Браммеллер, Р. Алан, Я. Хэмэм. – М.: Энергия, 1979. – С. 212.
15. Братин С.М. Электрический и тепловой расчет кабеля / С.М. Братин. – М.: Госэнергоиздат, 1960. – 328 с.
16. Буль Б.К. Основы теории электрических аппаратов / Б.К. Буль и др.; под ред. Г.В. Буткевича. – М.: Высш. шк., 1970. – 600 с.
17. Бэни Д.В. Сравнительные модели прогнозирования электрической нагрузки: пер. с англ. / Д.В. Бэни, Е.Д. Фармер. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 250 с.
18. Васильев П.А. Программно-информационный комплекс «Сеть» / П.А. Васильев, В.Ф. Кравченко, В.К. Хлебников // Информационные технологии в энергетике Северного Кавказа: Сб. докл. семинара. – Пятигорск: РП «Южэнерготехнадзор», 2001. – С. 13.
19. Венецкий И.Г. Основные математико-статистические понятия и формулы / И.Г. Венецкий, В.И. Венецкая. – М.: Статистика, 1979. – 447 с.
20. Вентцель Е.С. Теория случайных процессов и ее инженерные приложения / Е.С. Вентцель, Л.А. Овчаров. – М.: Наука, 1991. – 383 с.

21. Вешелев С.Д. Математико-статистические методы экспертных оценок / С.Д. Вешелев, Ф.Г. Гурвич. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Статистика, 1980. – 263 с.
22. Войтов О.Н. Алгоритмы определения потерь электроэнергии в электрической сети / О.Н. Войтов, И.И. Голуб, Л.В. Семенова // Электричество, 2010. – № 9. – С. 38–44.
23. Волобринский С.Д. Электрические нагрузки промышленных предприятий / С.Д. Волобринский, Г.М. Каялов, Д.М. Клейн и др. – Л.: Энергия, 1970. – 264 с.
24. Воротницкий В.Э. Норматив потерь электроэнергии в электрических сетях. Как его определить и выполнить? / В.Э. Воротницкий // Новости электроэнергетики. – 2003. – № 6. – С. 30–35.
25. Воротницкий В.Э. Структура и снижение коммерческих потерь электроэнергии в электрических сетях / В.Э. Воротницкий // Современные методы и средства расчета, нормирования и снижения технических и коммерческих потерь электроэнергии в электрических сетях: Материалы междунар. семинара. – М.: НЦ ЭНАС, 2000.
26. Воротницкий В.Э. Многофакторная корреляционная модель для анализа и прогнозирования потерь энергии в распределительных сетях / В.Э. Воротницкий // Электричество. – 1975. – № 1. – С. 29–31.
27. Вощинин А.П. Оптимизация по регрессионным моделям и планирование эксперимента / А.П. Вощинин, Р.А. Акматбеков; отв. ред. В.П. Живоглядов; АН Республики Кыргызстан, Ин-т
28. Автоматики. – Бишкек: Илим, 1992. – С. 164.
29. Герасименко А.А. Передача и распределение энергии: учеб. пособие / А.А. Герасименко, В.Т. Федин. – Ростов-н/Д: Феникс; Красноярск: Издательские проекты, 2006. – 720 с.
30. Гераскин О.Г. К расчету потерь мощности в электрических сетях методом планирования эксперимента / О.Г. Гераскин // Известия АН СССР: Энергетика и транспорт. – 1975. – № 2. – С. 145–152.

31. Гительман Л.Д. Энергетический бизнес: учебник / Л.Д. Гительман, Б.Е. Ратников. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во «Дело» АНХ, 2008. – 416 с.
32. Глазунов А.А. Электрические сети и системы / А.А. Глазунов, А.А. Глазунов. – М.: Госэнергоиздат, 1960. – 368 с.
33. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика / В.Е. Гмурман. – М.: Высш. шк., 2002. – 479 с.
34. Гнеденко Б.В. Математика и теория надежности / Б.В. Гнеденко, А.Д. Соловьев. – М.: Высш. шк., 1982. – 104 с.
35. Годжелло А.Г. Статистический анализ надежности контактов магнитных пускателей в условиях малой выборки / А.Г. Годжелло, Е.Г. Егоров, Н.А. Ращепкина, С.П. Иванова // Электротехника. – 2002. – № 2. – С. 37–40.
36. Грачева Е.И. Анализ надежности цеховых сетей / Е.И. Грачева, Е.Е. Гиззатуллина // Проблемы энергетики. – 2003. – № 5–6. – С. 166–169.
37. Грачева Е.И. Анализ структуры систем цехового электроснабжения предприятий машиностроительной отрасли / Е.И. Грачева, Н.А. Копытова // Проблемы энергетики. – 2011. – № 5–6. – С. 73–78.
38. Грачева Е.И. В. Анализ функциональных параметров и структуры систем внутрицехового электроснабжения / Е.И. Грачева, О.В. Наумов // Проблемы энергетики. – 2004. – № 1–2. – С. 99–106.
39. Грачева Е.И. Вероятностное прогнозирование изменения сопротивления изоляции кабелей и проводов линий цеховых сетей / Е.И. Грачева, М.Н. Золотарская // Проблемы энергетики. – 2008. – № 5–6. – С. 63–67.
40. Грачева Е.И. Вероятностно-статистические и детерминированные способы расчета потерь электроэнергии в низковольтных сетях промышленных предприятий / Е.И. Грачева // Материалы докладов итоговой научной конференции профессорско-преподавательского состава. – Казань: Казан. фил. МЭИ (ТУ), 1995. – С. 9–10.

41. Грачева Е.И. Влияние эксплуатационных характеристик электрооборудования на функциональные параметры систем внутривзаводского электроснабжения / Е.И. Грачева, А.Р. Сафин // Электрика. – 2010. – № 8. – С. 29–32.

42. Грачева Е.И. Выбор критерия оценки качества систем промышленного электроснабжения / Е.И. Грачева, Е.Е. Гиззатуллина // Электроснабжение, электрооборудование, энергосбережение: Тез. докл. науч.-техн. конф.; под ред. Б.И. Кудрина. – Новомосковск, 2002. – С. 62–63.

43. Грачева Е.И. Исследование внутренней структуры изоляции электрооборудования цеховых сетей / Е.И. Грачева, О.В. Наумов // Электротехнические системы и комплексы: Межвузовский сб. науч. тр. Вып. 13 / Под ред. С.И. Лукьянова. – Магнитогорск, 2006. – С. 192–201.

44. Грачева Е.И. Исследование надежности функционирования цеховых сетей / Е.И. Грачева, Д.Х. Нагуманова // Проблемы энергетики. – 2004. – № 11–12. – С. 50–55.

45. Грачева Е.И. Исследование параметров системы электроснабжения с использованием методов нечеткого регрессионного анализа / Е.И. Грачева, Р.Г. Идиятуллин // Электрика. – 2010. – № 2. – С. 15–20.

46. Грачева Е.И. Исследование теплофизических процессов в замкнутых контактах низковольтных коммутационных аппаратов / Е.И. Грачева, А.С. Лазаревич // Проблемы энергетики. – 2004. – № 5–6. – С. 103–106.

47. Грачева Е.И. Исследования эффективности функционирования низковольтных коммутационных аппаратов / Е.И. Грачева, А.Р. Сафин // Электрика. – 2011. – № 6. – С. 8–11.

48. Грачева Е.И. Метод нечеткого регрессионного анализа для определения потерь электроэнергии в цеховых сетях / Е.И. Грачева, Н.А. Трусова // Проблемы энергетики. – 2007. – № 9–10. – С. 63–72.

49. Грачева Е.И. Моделирование влияния конфигураций схем цеховых сетей на характер эффективности их функционирования / Е.И. Грачева, О.В. Наумов // Материалы заочных Всерос. науч.-техн. конф. (Computer-Based Conferences), апрель 2005. – Н. Новгород, 2005. – С. 30–32.

50. Грачева Е.И. Некоторые особенности анализа надежности и потерь в элементах систем электроснабжения: монография / Е.И. Грачева. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т., 2011. – 259 с.

51. Грачева Е.И. Оперативное прогнозирование режима электропотребления / Е.И. Грачева, Р.С. Саитбаталова, В.А. Хатанов // Промышленная энергетика. – 2000. – № 6. – С. 27–29.

52. Грачева Е.И. Определение расхода электроэнергии на основе математической модели / Е.И. Грачева, Р.С. Саитбаталова // Промышленная энергетика. – 1999. – № 4. – С. 24–25.

53. Грачева Е.И. Определение потерь электроэнергии в низковольтных цеховых сетях промышленных предприятий: Автореф. дис. ... канд. техн. наук / Е.И. Грачева. – М.: МЭИ, 1996 – 17 с.

54. Грачева Е.И. Определение потерь электроэнергии в низковольтных цеховых сетях промышленных предприятий и пути повышения надежности их работы / Е.И. Грачева, В.О. Иванов, Н.В. Денисова. – Казань: Казан. гос. ун-т, 2008. – 271 с.

55. Грачева Е.И. Особенности определения потерь электроэнергии в цеховых сетях напряжением до 1000 В / Е.И. Грачева // Проблемы энергетики: Материалы докл. республ. науч. конф. В 3 ч. Ч. 2. – Казань: Казан. фил. МЭИ (ТУ), 1998. – С. 13–14.

56. Грачева Е.И. Оптимизационные задачи электроэнергетики: учеб. пособие / Е.И. Грачева, А.Р. Сафин. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2010. – 120 с.

57. Грачева Е.И. Оценка величины потерь электроэнергии в низковольтных коммутационных аппаратах / Е.И. Грачева // Проблемы энергетики. – 2009. – № 7–8. – С. 74–81.

58. Грачева Е.И. Оценка величины потерь электроэнергии в электрических сетях до 1000 В / Е.И. Грачева, О.В. Наумов // Проблемы энергетики. – 2003. – № 1–2. – С. 108–117.

59. Грачева Е.И. Потери электроэнергии в низковольтных сетях: Монография / Е.И. Грачева. – Казань: Казан. гос. ун-т, 2004. – 128 с.

60. Грачева Е.И. Применение ЭВМ для исследования систем электроснабжения промышленных предприятий: учеб. пособие / Е.И. Грачева. – 2-е изд. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2004. – 55 с.

61. Грачева Е.И. Применение R-оптимальных планов для исследования функциональных параметров систем электроснабжения промышленных предприятий / Е.И. Грачева, Р.Г. Идиятуллин // Повышение эффективности электрического хозяйства потребителей в условиях ресурсных ограничений: Материалы докл. науч.-техн. конф. / Под общ. ред. Б.И. Кудрина и Ю.В. Матюниной. – М.: МЭИ, 2009. – С. 146–154.

62. Грачева Е.И. Прогнозирование изменения сопротивления контактных соединений низковольтных коммутационных аппаратов различными методами / Е.И. Грачева // Проблемы энергетики. – 2008. – № 7–8. – С. 44–52.

63. Грачева Е.И. Прогнозирование надежности контактов низковольтных коммутационных аппаратов / Е.И. Грачева, А.С. Лазаревич // Проблемы энергетики. – 2005. – № 1–2. – С. 95–99.

64. Грачева Е.И. Расчетное определение потерь электроэнергии в цеховых сетях / Е.И. Грачева // Проблемы энергетики. – 2009. – № 11–12. – С. 51–59.

65. Грачева Е.И. Расчеты потерь энергии в распределительных сетях низкого напряжения / Е.И. Грачева // Проблемы энергетики: Материалы докл. республ. науч. конф. – Казань, 1996. – С. 41–42.

66. Грачева Е.И. Расчет сопротивления стягивания контактных соединений / Е.И. Грачева, О.В. Наумов // Проблемы энергетики. – 2004. – № 1–2. – С. 147–153.

67. Грачева Е.И. Реализация метода прогнозирования параметров надежности низковольтных коммутационных аппаратов / Е.И. Грачева, А.Р. Сафин // Промышленная энергетика. – 2011. – № 11. – С. 16–25.

68. Грачева Е.И. Сравнительный анализ расчетных и экспериментальных значений сопротивлений коммутационных аппаратов / Е.И. Грачева, О.В. Наумов // Проблемы энергетики. – 2003. – № 11–12. – С. 176–180.

69. Грачева Е.И. Структурно-балансовая модель промышленного предприятия / Е.И. Грачева, Р.С. Сайтбаталова, Р.У. Галеева // Проблемы энергетики. – 1999. – № 11–12. – С. 82–88.

70. Грачева Е.И. Теплофизические процессы, влияющие на нагрев контактов низковольтных коммутационных аппаратов / Е.И. Грачева, А.С. Лазаревич // Электрооборудование, электроснабжение, электросбережение: Науч.-техн. форум с междунар. участием «Высокие технологии. – 2004» 24–28 мая. – Ижевск, 2004. – С. 40–44.

71. Грачева Е.И. R-оптимальные планы для исследования систем внутрицехового электроснабжения / Е.И. Грачева, Н.А. Трусова // Проблемы энергетики. – 2007. – № 7–8. – С. 72–81.

72. Грачева Е.И. Анализ потерь электроэнергии систем цехового электроснабжения / Е.И. Грачева, Н.А. Копытова // Проблемы энергетики. – 2011. – № 9–10. – С. 78–85.

73. Грачева Е.И. Надежность электротехнических систем и их объектов: Монография / Е.И. Грачева, Н.В. Денисова, В.О. Иванов. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2011. – 163 с.

74. Гук Ю.Б. Теория и расчет надежности систем электроснабжения / Ю.Б. Гук и др.; под ред. Р.Я. Федосенко. – М.: Энергия, 1970. – 176 с.

75. Гусейнов Ф.Г. Планирование эксперимента в задачах электроэнергетики / Ф.Г. Гусейнов, О.С. Мамедьяров. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 151 с.

76. Дзербицкий С. Испытания электрических аппаратов / С. Дзербицкий. – М.: Энергия, 1977. – 204 с.

77. Дружинин Г.В. Надежность устройств автоматики / Г.В. Дружинин. – М.: Наука, 1964. – 565 с.
78. Дулин В.А. Методы исследования надежности низковольтных аппаратов / В.А. Дулин. – М.: Энергия, 1970. – 152 с.
79. Егоров Е.Г. Испытания и исследования низковольтных коммутационных электрических аппаратов / Е.Г. Егоров. – Чебоксары: Чуваш. ун-т., 2000. – 448 с.
80. Елисеева И.И. Общая теория статистики: Учебник / И.И. Елисеева, М.М. Юзбашев; под ред. чл.-корр. РАН И.И. Елисеевой. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Финансы и статистика, 2001. – 480 с. с ил.
81. Ермолин Н.П. Надежность электрических машин / Н.П. Ермолин, И.П. Жерихин. – Л.: Энергия, 1976. – 248 с. с ил.
82. Жежеленко И.В. Методы вероятностного моделирования в расчетах характеристик электрических нагрузок потребителей / И.В. Жежеленко. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 124 с.
83. Жежеленко И.В. Показатели качества электроэнергии на промышленных предприятиях / И.В. Жежеленко. – М.: Энергия, 1977. – 125 с.
84. Железко Ю.С. Расчет, анализ и нормирование потерь электроэнергии в электрических сетях: Руководство для практических расчетов / Ю.С. Железко, А.В. Артемьев, О.В. Савченко. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2006. – 280 с.
85. Железко Ю.С. Методы расчета нагрузочных потерь электроэнергии в радиальных сетях 0,38–20 кВ по обобщенным параметрам схем / Ю.С. Железко // Электрические станции. – 2006. – № 1. – С. 31–37.
86. Железко Ю.С. О рациональных способах определения числа часов наибольших потерь и коэффициента графика / Ю.С. Железко, Е.А. Васильчиков // Электрические станции. – 1988. – № 1. – С. 12–15.
87. Железко Ю.С. Методы расчета технических потерь электроэнергии в сетях 380-220 В / Ю.С. Железко // Электрические станции. – 2002. – № 1. – С. 14–20.

88. Железко Ю.С. Выбор мероприятий по снижению потерь электроэнергии в электрических сетях / Ю.С. Железко. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – С. 172.

89. Железко Ю.С. Классификация методов расчета потерь электроэнергии по ширине интервала неопределенности получаемого результата / Ю.С. Железко // Повышение экономичности работы электрических сетей и качества электроэнергии: Сб. науч. тр. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – С. 7–15.

90. Железко Ю.С. Интервалы неопределенности расчетных потерь электроэнергии в электрических сетях / Ю.С. Железко // Электричество. – 2009. – № 2. – С. 14–24.

91. Железко Ю.С. Методика расчета нормативов технологических потерь электроэнергии в электрических сетях / Ю.С. Железко // Промышленная энергетика. – 2007. – № 1. – С. 28–34.

92. Железко Ю.С. Погрешности определения потерь энергии в электрических сетях / Ю.С. Железко // Электричество. – 1975. – № 2. – С. 19–24.

93. Железко Ю.С. Потери электроэнергии в оборудовании сетей и подстанций энергосистемы не учитывают почти десятую их часть / Ю.С. Железко // Новости электротехники. – 2003. – № 6. – С. 26–30.

94. Железко Ю.С. Систематические и случайные погрешности методов расчета нагрузочных потерь электроэнергии / Ю.С. Железко // Электрические станции. – 2001. – № 12. – С. 19–27.

95. Железко Ю.С. Расчет, анализ и нормирование потерь электроэнергии в электрических сетях. Руководство для практ. расчетов / Ю.С. Железко, А.В. Артемьев, О.В. Савченко. – М.: НЦ ЭНАС, 2003. – 280 с.

96. Железко Ю.С. Предельная точность и области применения регрессионных зависимостей эквивалентных сопротивлений линий 6–20кВ / Ю.С. Железко, Р.П. Бирюкова // Электричество. – 1988. – № 8. – С. 17–21.

97. Железко Ю.С. Способы расчета числа часов максимальных потерь электроэнергии / Ю.С. Железко // Изв. вузов: Энергетика. – 1990. – № 3. – С. 15–17.

98. Зажигаев Л.С. Методы планирования и обработки результатов физического эксперимента / Л.С. Зажигаев, А.А. Кишьян, Ю.И. Романиков. – М.: Энергоатомиздат, 1978. – 232 с.
99. Зайдель А.Н. Погрешности измерений физических величин / А.Н. Зайдель. – Л.: Наука, 1985. – 112 с.
100. Замараев Б.С. Снижение потерь электроэнергии в электроснабжающих сетях / Б.С. Замараев // Промышленная энергетика. – 1976. – № 6. – С. 28–30.
101. Зельцбург Л.М. Основы электроснабжения промышленных предприятий / Л.М. Зельцбург, В.В. Камена. – М.: Высш. шк., 1973. – 272 с.
102. Зельцбург Л.М. О методике определения годовых нагрузочных потерь электроэнергии / Л.М. Зельцбург, Э.Л. Карпова // Электричество. – 1985. – № 11. – С. 49–62.
103. Зельцбург Л.М. Экономика электроснабжения промышленных предприятий / Л.М. Зельцбург. – М.: Высш. шк., 1973. – 272 с.
104. Иванов В.О. Нормирование расхода электрической энергии на промышленных предприятиях: учеб. пособие / В.О. Иванов, В.Ю. Белашов, Н.В. Денисова, Е.И. Грачева. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2005. – 161 с.
105. Иванова В.М. Математическая статистика / В.М. Иванова, В.Н. Калинина, Л.А. Нешумова. – М.: Высш. шк., 1981. – 371 с.
106. Иванов В.С. Режимы электропотребления и качество электроэнергии систем электроснабжения промышленных предприятий / В.С. Иванов, В.И. Соколов. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 336 с.
107. Ивоботенко Б.А. Планирование эксперимента в электромеханике / Б.А. Ивоботенко и др. – М.: Энергия, 1975. – 184 с.
108. Идельчик В.И. Расчеты и оптимизация режимов электрических сетей и систем / В.И. Идельчик. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 288 с.
109. Идельчик В.И. Электрические системы и сети: учебник для вузов / В.И. Идельчик. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 592 с.

110. Идиятуллин Р.Г. Исследование параметров системы электроснабжения с использованием методов регрессионного анализа с целью получения адекватных моделей / Р.Г. Идиятуллин, Е.И. Грачева // Повышение эффективности электрического хозяйства потребителей в условиях ресурсных ограничений: Материалы докл. науч.-техн. конф. / Под общ. ред. Б.И. Кудрина и Ю.В. Матюниной. – М.: МЭИ, 2009. – С. 122–131.

111. Илларионов Р.А. Анализ мероприятий по снижению потерь электроэнергии в электрических сетях / Р.А. Илларионов, Д.Л. Фаибисович // Электрические станции. – 1977. – № 2. – С. 31–33.

112. Инструкция по расчету и анализу технологического расхода электрической энергии на передачу по электрическим сетям энергосистем и энергообъединений: И 32-70-030-87. – М.: СПО «Союзтехэнерго», 1987. – 34 с.

113. Казанцев В.Н. Расчет потерь энергии в распределительной сети при неполной информации о ее режиме / В.Н. Казанцев, Ю.М. Комлев // Электричество. – 1978. – № 1. – С. 18–25.

114. Калявин В.П. Надежность и диагностика электроустановок / В.П. Калявин, Л.М. Рыбаков. – Йошкар-Ола: Мар. гос. ун-т, 2000. – 348 с.

115. Каялов Г.М. Определение потерь энергии в электрической сети по средним значениям нагрузок в ее узлах / Г.М. Каялов // Электричество. – 1976. – № 6. – С. 19–24.

116. Каялов Г.М. Основы построения промышленных электрических сетей / Г.М. Каялов, Ф.Э. Каждая, И.Н. Ковалев, Э.Г. Куренный. – М.: Энергия, 1978. – 352 с.

117. Кезевич В.В. Зависимость числа часов потерь от использования максимума нагрузки / В.В. Кезевич // Электрические станции. – 1948. – № 9. – С. 28–29.

118. Керимов А.М. Расчет потерь электроэнергии в распределительных сетях / А.М. Керимов, Е.Б. Гурфинкель, А.С. Степанов // Электричество. – 1985. – № 9. – С. 5–9.

119. Ким Е.И. Математические модели тепловых процессов в электрических контактах / Е.И. Ким, В.Т. Омельченко, С.Н. Харин. – Алма-Ата: Наука, 1985. – 238 с.
120. Кишкурно Э.А. Основные принципы формирования баланса электрической энергии в сетях региональной сетевой компании / Э.А. Кишкурно, А.А. Витов // Электрика. – 2009. – № 2. – С. 18–20.
121. Клебанов Л.Д. Вопросы методики определения и снижения потерь электроэнергии в сетях / Л.Д. Клебанов. – Л.: ЛГУ, 1973. – 73 с.
122. Клейн Г.Ш. Выбор кабелей с учетом постоянной времени нагрева. Инструктивные указания по проектированию электротехнических промышленных установок / Г.Ш. Клейн. – М.: Энергия, 1965. – 24 с.
123. Князевский Б.А. Электроснабжение промышленных предприятий / Б.А. Князевский. – М.: Высш. шк., 1986. – 399 с.
124. Ковалев А.П. Применение логико-вероятностных методов для оценки надежности структурно-сложных систем / А.П. Ковалев, А.В. Спиваковский // Электричество. – 2000. – № 9. – С. 66–70.
125. Кобленц М.Г. Работа контактов контакторов в повторно-кратковременном режиме / М.Г. Кобленц // Сб. Электрические контакты. – М.: Госэнергоиздат, 1960. – С. 123–137.
126. Кобленц М.Г. Исследование электрической износоустойчивости силовых контактов контакторов при работе в повторно-кратковременном режиме / М.Г. Кобленц // Сб. Электрические контакты. – М.: Госэнергоиздат, 1962. – С. 59.
127. Козлов В.А. Электроснабжение городов / В.А. Козлов. – Л.: Энергия, 1977. – 244 с.
128. Кокин С.Е. К расчету балансов и потерь электроэнергии в распределительных электрических сетях / С.Е. Кокин, А.В. Паздерин, О.Б. Мошинский, Е.В. Шерстобитов // Промышленная энергетика. – 2009. – № 9. – С. 32–36.

129. Колемаев В.А. Теория вероятностей и математическая статистика / В.А. Колемаев, В.Н. Калинина. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: ЮНИТИ-ДАТА, 2003. – 352 с.

130. Конюхова Е.А. Регулирование электропотребления в системах электроснабжения напряжением 6–10/0,4 кВ с учетом статистических характеристик нагрузки и вероятностных показателей параметров режимов / Е.А. Конюхова // Электричество. – 2007. – № 9. – С. 41–47.

131. Конюхова Е.А. Надежность электроснабжения промышленных предприятий / Е.А. Конюхова, Э.А. Киреева. – М.: НТФ «Энергопрогресс», 2001. – 92 с.

132. Конюхова Е.А. Электроснабжение объектов: учеб. пособие для студ. учреждений сред. проф. образования / Е.А. Конюхова. – М.: Изд-во «Мастерство», 2001. – 320 с. с ил.

133. Копейкин В.В. Эффективность энергоснабжения / В.В. Копейкин, Е.А. Смирнов, Г.Л. Багиев. – Л.: Энергоатомиздат, 1985. – 112 с.

134. Копытова Н.А. Анализ систем цехового электроснабжения и потерь электроэнергии на предприятиях машиностроительной отрасли / Н.А. Копытова, Е.И. Грачева // Электроника, электротехника и энергетика: Тез. докл. науч.-техн. конф. – М.: МЭИ, 2011. – С. 335–337.

135. Копытов Ю.В. Экономия электроэнергии в промышленности. Справочник / Ю.В. Копытов, Б.А. Чуланов. – М.: Энергоатомиздат, 1982. – 108 с.

136. Константинов Б.А. Компенсация реактивной мощности / Б.А. Константинов. – Л.: Энергия, 1976. – 103 с.

137. Конюхова Е.А. Определение потерь мощности по потерям напряжения в системах электроснабжения промышленных предприятий / Е.А. Конюхова, Е.Г. Петрова // Вестник МЭИ. – 1997. – № 5. – С. 48–53.

138. Красновский А.З. Использование эквивалентного сопротивления при планировании расхода электроэнергии на ее передачу и распределение / А.З. Красновский // Электрические станции. – 1988. – № 1. – С. 15–23.

139. Красовский Г.И. Планирование эксперимента / Г.И. Красовский, Г.Ф. Филаретов. – Минск: БГУ, 1982. – 302 с.
140. Кудрин Б.И. О потерях электрической энергии и мощности в электрических сетях / Б.И. Кудрин // Электрика. – 2003. – № 3. – С. 3–9.
141. Кудрин Б.И. Электроснабжение промышленных предприятий / Б.И. Кудрин. – М.: Интермет Инжиниринг, 2005. – 672 с.
142. Кудрин Б.И. Электроснабжение промышленных предприятий / Б.И. Кудрин. – М.: Энергоатомиздат, 1995. – 416 с.
143. Кудрин Б.И. Электроснабжение промышленных предприятий / Б.И. Кудрин, В.В. Прокопчик. – Минск.: Высш. шк., 1988. – 357 с.
144. Кузнецов Р.С. Аппараты распределения электрической энергии на напряжение до 1000В / Р.С. Кузнецов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергия, 1970. – 544 с.
145. Кульчицкий А.И. Снижение расхода электроэнергии на ее транспорт / А.И. Кульчицкий, С.П. Елагина // Электрические станции. – 1982. – № 7. – С. 4–7.
146. Курбацкий В.Г. Анализ потерь энергии в электрических сетях на базе современных алгоритмов искусственного интеллекта / В.Г. Курбацкий, Н.В. Томин // Электричество. – 2007. – № 4. – С. 12–21.
147. Куренный Э.Г. Прогнозирование электрических нагрузок / Э.Г. Куренный, Е.Н. Дмитриев, Ю.И. Черкасов, А.Г. Ерхов // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. – 1988. – № 2. – С. 89–100.
148. Куценко Г.Ф. Монтаж, эксплуатация и ремонт электроустановок: практическое пособие / Г.Ф. Куценко. – Мн.: Дизайн ПРО, 2006. – 472 с. с ил.
149. Левин М.С. Влияние разветвленности сети на соотношение потерь напряжения и потерь мощности в ней / М.С. Левин, Т.Б. Лещинская // Электрические станции. – 1997. – № 4. – С. 44–46.
150. Лившиц Н.А. Вероятностный анализ систем автоматического управления / Н.А. Лившиц, В.Н. Пугачев. – М.: Советское радио, 1963. – 359 с.

151. Ллойд Д. Надежность. Организация исследования, методы, математический аппарат / Д. Ллойд. – М.: Советское радио, 1964. – 686 с.
152. Луцкий В.А. Расчет надежности и эффективности радиоэлектронной аппаратуры / В.А. Луцкий. – Киев: Изд-во Наукова Думка, 1966. – 208 с.
153. Лыкин А.В. Электрические системы и сети: учеб. пособие / А.В. Лыкин. – М.: Университетская книга; Логос, 2006. – 254 с.
154. Макаревич Л.М. Об уменьшении потерь и эффективности использования информации / Л.М. Макаревич // Механизация и электрификация социалистического сельского хозяйства. – 1975. – № 1. – С.15–17.
155. Максименко Н.Н. Расчет потерь активной мощности в системах электроснабжения промышленных предприятий / Н.Н. Максименко, А.А. Клян, Е.Н. Барановская, О.И. Кирилина // Изв. вузов. Энергетика. – 1992. – № 4. – С. 15–23.
156. Манусов В.З. Методы оценки потерь электроэнергии в условиях неопределенности / В.З. Манусов, А.В. Могиленко // Электричество. – 2003. – № 3. – С. 2–8.
157. Маркушевич Н.С. Регулирование напряжения и экономия электроэнергии / Н.С. Маркушевич. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 104 с.
158. Мукосеев Ю.Л. Электроснабжение промышленных предприятий / Ю.Л. Мукосеев. – М.: Энергия, 1973. – 258 с.
159. Налимов В.В. Статистические методы планирования экстремальных экспериментов / В.В. Налимов, Н.А. Чернова. – М.: Наука, 1965. – 340 с.
160. Намитоков К.К. Испытания аппаратов низкого напряжения / К.К. Намитоков. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 248 с.
161. Намитоков К.К. Плавкие предохранители / К.К. Намитоков. – М.: Энергия, 1979. – 176 с.
162. Настольная книга энергетика / Авторы-составители: А.И. Панфилов, В.И. Энговатов. – М.: ЗАО «Энергосервис», 2007. – 650 с.

163. Немцев А.Г. Качество электроэнергии и режимы ее потребления в системах электроснабжения: монография / А.Г. Немцев, Г.А. Немцев. – Чебоксары: Чуваш. гос. ун-т им. И.Н. Ульянова, 2010. – 439 с.
164. Новицкий П.В. Оценка погрешностей результатов измерения / П.В. Новицкий, И.А. Зограф. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат, 1991. – 304 с.
165. Нормативы технологического расхода электрической энергии (мощности) на ее передачу потерь (принимаемые для целей расчета и регулирования тарифов на электрическую энергию) // Информационный бюллетень ФЭК. – 2000. – № 11.
166. Образцов В.А. Контрольные испытания низковольтных аппаратов / В.А. Образцов. – Л.: Энергоатомиздат, 1989. – 244 с.
167. Объем и нормы испытаний электрооборудования / Под общ. ред. Б.А. Алексеева и др. – 6-е изд. – М.: НЦЭНАС, 2000. – 256 с.
168. Осика Л.К. Коммерческий и технический учет электрической энергии на оптовом и розничном рынках: Теория и практические рекомендации / Л.К. Осика. – СПб.: Политехника, 2005. – 360 с.
169. Омельченко В.Т. Теория процессов на контактах / В.Т. Омельченко. – Харьков: Вища школа, 1979. – 128 с.
170. Орлов В.С. Снижение электропотребления путем регулирования напряжения / В.С. Орлов // Промышленная энергетика. – 1991. – № 4. – С. 42–44.
171. Основы кабельной техники / под ред. В.А. Привезенцева. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергия, 1975. – 472 с.
172. Основы кабельной техники: учебник для вузов / В.М. Леонов, И.В. Пешков, И.Б. Рязанов, С.Д. Холодный; под. ред. И.Б. Пешкова. – М.: Издательский центр «Академия», 2006. – 432 с.
173. Основы теории электрических аппаратов / Под ред. Г.В. Буткевича. – М.: Высш. шк., 1970. – 600 с.
174. Острейковский В.А. Теория надежности: учебник для вузов / В.А. Острейковский. – 2-е изд., испр. – М.: Высш. шк., 2008. – 463 с. с ил.

175. Петин О.В. Испытания электрических аппаратов / О.В. Петин, Е.Ф. Щербаков. – М.: Высш. шк., 1985. – 215 с.
176. Планирование потерь энергии в электрических сетях / З. Красновский, В.Г. Пекелис, Л.П. Анисимов и др. // Электрические станции. – 1979. – № 1. – С. 23.
177. Планирование эксперимента / Под. ред. Г.К. Круга. – М.: Наука, 1966. – 424 с.
178. Половко А.М. Основы теории надежности / А.М. Половко, С.В. Гуров. – 2-е изд., перераб. и доп. – СПб.:БХВ-Петербург, 2008. – 704 с. с ил.
179. Понаровкин Д.Б. Расчет нагрузочных потерь электроэнергии в сетях электроснабжающих предприятий методом расчетных суток / Д.Б. Понаровкин, Д.И. Степанов // Промышленная энергетика. – 2009. – № 9. – С. 18–27.
180. Поспелов Е.Г. Влияние температуры проводников на потери электроэнергии в активных сопротивлениях проводов воздушных линий электропередачи / Е.Г. Поспелов, В.В. Ершевич // Электричество. – 1973. – № 10. – С. 81–83.
181. Поспелов Г.Е. Потери мощности и энергии в электрических сетях / Г.Е. Поспелов, Н.М. Сыч; под ред. Г.Е. Поспелова. – М.: Энергоиздат, 1981. – 216 с.
182. Поспелов Г.Е. Учет и оценка потерь мощности и энергии в электрических сетях энергосистем / Г.Е. Поспелов, Н.М. Сыч. – Минск: БПИ, 1976. – 78 с.
183. Поспелов Г.Е. Электрические системы и сети: учебник / Г.Е. Поспелов, В.Т. Федин, П.В. Лычев. – Минск.: УП «Технопринт», 2004. – 720 с.
184. Поспелов Г.Е. Оценка погрешностей приближенного эквивалентирования распределительных сетей 6–10 кВ / Г.Е. Поспелов, И.З. Шапиро // Электричество. – 1982. – № 5. – С. 55–57.
185. Потери электроэнергии в электрических сетях энергосистем / В.Э. Воротницкий, Ю.С. Железко, В.Н. Казанцев и др.; под ред. В.Н. Казанцева. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 366 с.

186. Потребич А.А. Е. Особенности нормирования потерь электроэнергии при снижении потребления электроэнергии / А.А. Потребич, Д.В. Коваленко, В.И. Ткачев, Г.Н. Катренко, А.Е. Катковский // Энергетик. – 2010. – № 5. – С. 38–39.
187. Правила устройства электроустановок. – 6-е изд., перераб. и доп. с изменениями. – М.: Главгосэнергонадзор России, 1998. – 608 с.
188. Проблемы планирования эксперимента / Под. ред. Г.К. Круга. – М.: Наука, 1969. – 396 с.
189. Проектирование кабельных сетей и проводок / П.И. Анастасиев, Е.З. Бранзбург, А.В. Коляда и др.; под общ. ред. Г.Е. Хромченко. – М.: Энергия, 1980. – 282 с.
190. Прокопчик В.Б. Прогноз электропотребления промышленных предприятий на основе индуктивного метода самоорганизации / В.Б. Прокопчик, Б.И. Кудрин, А.Е. Якимов // Изв. вузов. Энергетика. – 1986. – № 5. – С. 20–24.
191. Пустыльник Е.И. Статистические методы анализа и обработки наблюдений / Е.И. Пустыльник. – М.: Наука, 1968. – 288 с.
192. РД 34.45-51.300-97. Объемы и нормы испытаний электрооборудования. – М.: НЦЭНАС, 2001. – 256 с.
193. Ристхейн Э.М. Электроснабжение промышленных установок / Э.М. Ристхейн. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 424 с.
194. Рожкова Л.Д. Электрооборудование электрических станций и подстанций: учебник для проф. образования / Л.Д. Рожкова, Л.К. Карнеева, Т.В. Чиркова. – 2-е изд., стер. – М.: Издательский центр «Академия», 2005. – 448 с.
195. Румшинский Л.З. Математическая обработка результатов эксперимента / Л.З. Румшинский. – М.: Наука, 1971. – 192 с.
196. Румшинский Л.З. Элементы теории вероятностей / Л.З. Румшинский. – М.: Наука, 1970. – 256 с.

197. Саитбаталова Р.С. Методы оптимизации для исследования систем электроснабжения: учеб. пособие / Р.С. Саитбаталова, Е.И. Грачева, М.В. Блохин. – Казань: Казан. гос. ун-т, 2001. – 76 с.
198. Саитбаталова Р.С. Некоторые вопросы анализа статической устойчивости систем электроснабжения / Р.С. Саитбаталова, Е.И. Грачева // Электричество. – 2001. – № 4. – С. 2–4.
199. Сафин А.Р. Применение пакета оптимизации «Optimization Toolbox» системы Matlab для выбора рациональной схемы электроснабжения / А.Р. Сафин, Е.И. Грачева // Электрика. – 2010. – № 12. – С. 24–26.
200. Свешников В.И. Анализ потерь мощности и энергии в электрических сетях / В.И. Свешников, Н.Р. Тептиков, В.А. Титов // Электрические станции. – 1975. – № 9. – С. 28–30.
201. Сибикин Ю.Д. Электроснабжение промышленных и гражданских зданий: учебник для студ. сред. проф. образования / Ю.Д. Сибикин. – М.: Издательский центр «Академия», 2006. – 368 с.
202. Смирнов А.С. Анализ надежности структурно-сложных электрических схем с учетом двух типов отказов / А.С. Смирнов, Д.О. Гайдамович // Электричество. – 2001. – № 5. – С. 50–56.
203. Смирнов Н.В. Курс теории вероятности и математической статистики / Н.В. Смирнов. – М.: Наука, 1970. – 289 с.
204. Соломонов Ю.С. Большие системы: гарантийный надзор и эффективность / Ю.С. Соломонов, Ф.К. Шахтарин. – М.: Машиностроение, 2003. – 368 с. с ил.
205. Сотсков Б.С. Основы расчета и проектирования электромеханических элементов автоматических и телемеханических устройств / Б.С. Сотсков. – М.: Энергия, 1965. – 567 с.
206. Справочник по проектированию электрических сетей / Под ред. Д.Л. Файбисовича. – М.: Изд-во НИЦ ЭНАС, 2005. – 320 с. ил.

207. Справочник по электроснабжению и электрооборудованию. В 2 т. Т. 1. Электроснабжение / Под общ. ред. Ю.Г. Барыбина и др. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 464 с.
208. Сыч Н.М. Снижение потерь мощности и энергии в электрических системах / Н.М. Сыч. – Минск: БПИ, 1977. – 76 с.
209. Таев И.С. Электрические аппараты / И.С. Таев. – М.: Энергия, 1977. – 277 с.
210. Таев И.С. Электрические аппараты. Общая теория / И.С. Таев. – М.: Энергия, 1977. – 272 с.
211. Таев И.С. Электрические аппараты управления / И.С. Таев. – М.: Высш. шк., 1984. – 247 с.
212. Тарнижевский М.В. Расчет потерь электроэнергии в городских электрических сетях / М.В. Тарнижевский, Т.И. Кузина // Энергетик. – 1979. – № 10. – С. 12–14.
213. Тевелевич И.И. Методы определения потерь энергии в электрических сетях низкого и среднего напряжения (городов): Автореф. дис. канд. техн. наук / И.И. Тевелевич. – Минск, 1972. – 27 с.
214. Тевлин З.В. Прогнозирование надежности контактов низковольтных коммутационных аппаратов / З.В. Тевлин // Электричество. – 1980. – № 3. – С. 24–27.
215. Тихонов А.Н. Статистическая обработка результатов эксперимента / А.Н. Тихонов, М.В. Уфимцев. – М.: Изд-во МЭИ, 1988. – 174 с.
216. Трубицын В.И. Надежность электрической части электростанций / В.И. Трубицын. – М: МЭИ, 1993. – 112 с.
217. Трунковский Л.Е. Электрические сети промышленных предприятий / Л.Е. Трунковский. – М.: Энергоиздат, 1981. – 88 с.
218. Федоров А.А. Теоретические основы электроснабжения промышленных предприятий / А.А. Федоров. – М.: Энергия, 1976. – 276 с.

219. Федоров А.А. Основы электроснабжения промышленных предприятий / А.А. Федоров, В.В. Каменева. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 472 с.

220. Федоров А.А. Электроснабжение промышленных предприятий / А.А. Федоров, Э.М. Рихстейн. – М.: Энергия, 1981. – 360 с.

221. Федоров О.В. Совершенствование методов определения экономической эффективности электрооборудования / Федоров О.В. // Проблемы совершенствования планирования машиностроительным производством. Республиканская научно-техническая конференция. Ворошиловград: ВМИ, 1983. – С. 50.

222. Федоров О.В. Особенности технико-экономического анализа при проектировании электрооборудования / Федоров О.В. // Совершенствование экономического и организационно-планового механизма создания и внедрения новой техники. Научно-техническая конференция. – Воронеж: ВПИ, 1984. – С. 20–22.

223. Федотов А.И. Влияние теплофизических процессов на нагрев контактов низковольтных коммутационных аппаратов / А.И. Федотов, Е.И. Грачева, О.В. Наумов // Промышленная энергетика. – 2011. – № 4. – С. 2–5.

224. Федотов А.И. Выбор критерия оценки технического состояния низковольтных коммутационных аппаратов / А.И. Федотов, Е.И. Грачева, О.В. Наумов // Проблемы энергетики. – 2010. – № 1–2. – С. 46–53.

225. Федотов А.И. Исследование нагрева элементов цеховых сетей низкого напряжения / А.И. Федотов, Е.И. Грачева, О.В. Наумов // Электроэнергетика, энергосберегающие технологии: Тез. докл. Всерос. науч.-техн. конф. В 2 т. Т.1.: Изд-во ЛГТУ, 2004. – С. 86–90.

226. Федотов А.И. Исследование эффективности функционирования электрических сетей низкого напряжения / А.И. Федотов, Е.И. Грачева, О.В. Наумов // Фундаментальные исследования в технических университетах: Материалы VIII Всерос. конф. по проблемам науки и высшей школы. – СПб.: СПбТПУ, 2004. – С. 157–158.

227. Федотов А.И. Особенности определения эффективности функционирования цеховых сетей / А.И. Федотов, Е.И. Грачева, О.В. Наумов // Проблемы энергетики. – 2004. – № 9–10. – С. 58–66.

228. Федотов А.И. Оценка технического состояния контактных соединений низковольтных коммутационных аппаратов по данным тепловизионного контроля / А.И. Федотов, Е.И. Грачева, О.В. Наумов // Проблемы энергетики. – 2005. – № 9–10. – С. 47–55.

229. Федотов А.И. Тепловизионный контроль для оценки работоспособности низковольтных коммутационных аппаратов / А.И. Федотов, Е.И. Грачева, О.В. Наумов // Состояние и перспективы развития энерготехнологии, XII Бенардосовские чтения 2005. Международная научно-техническая конференция. – Иваново. – 2005. – С. 103.

230. Федотов А.И. Влияние нагрева элементов цеховых сетей на величину потерь электроэнергии / А.И. Федотов, О.В. Наумов // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: Тез. докл. X Междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов. В 3 т. Т. 3. – М.: Изд-во МЭИ, 2004. – С. 264–265.

231. Федотов А.И. Определение эквивалентного сопротивления низковольтных электрических сетей для расчета потерь электроэнергии / А.И. Федотов, О.В. Наумов // Будущее технической науки: Тез. докл. III Всерос. молодежной науч.-техн. конф. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2004. – С. 114–115.

232. Федотов А.И. Учет нагрева элементов цеховых сетей при определении потерь электроэнергии / А.И. Федотов, О.В. Наумов // Изв. вузов. Проблемы энергетики. – 2004. – № 5–6. – С. 86–92.

233. Ферстер Э. Методы корреляционного и регрессионного анализа / Э. Ферстер, Б. Ренц. – М.: Финансы и статистика, 1983. – 302 с.

234. Финни Д. Введение в теорию планирования экспериментов / Д. Финни. – М.: Наука, 1970. – 288 с.

235. Фокин Ю.А. Вероятностно-статистические методы в расчетах систем электроснабжения / Ю.А. Фокин. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 250 с.

236. Фокин Ю.А. Оценка надежности систем электроснабжения / Ю.А. Фокин, В.А. Туфанов. – М.: Энергоиздат, 1981. – 224 с.
237. Холмский В.Г. Расчет и оптимизация режимов электрических сетей / В.Г. Холмский. – М.: Высш. шк., 1975. – 280 с.
238. Холодный С.Д. Методы испытаний и диагностики кабелей и проводов / С.Д. Холодный. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 200 с. с ил.
239. Хольм Р. Электрические контакты: пер. с англ. / Под ред. Д.Э. Брускина. – М.: Энергия, 1978. – 456 с.
240. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в Matlab, SimPowerSystems и Simulink / И.В. Черных. – М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. – 288 с.
241. Чунихин А.А. Электрические аппараты: Общий курс: учебник для вузов / А.А. Чунихин. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 720 с.
242. Шагидуллина А.В. Анализ параметров надежности автоматических выключателей российских и зарубежных производителей / А.В. Шагидуллина, Е.И. Грачева // Актуальные вопросы современной техники и технологии, 2 октября, 2010. – С. 214–218.
243. Шагидуллина А.В. Сравнительное исследование эксплуатационных характеристик низковольтных аппаратов / А.В. Шагидуллина, Е.И. Грачева // Проблемы энергетики. – 2011. – № 1–2. – С. 46–55.
244. Шапиро И.З. Вероятностно-статистические модели для определения и прогнозирования потерь энергии в распределительных сетях 6–10 кВ / И.З. Шапиро // Изв. вузов. Энергетика. – 1978. – № 4. – С. 15–20.
245. Шевченко В.В. К расчету потерь электроэнергии в цеховых сетях / В.В. Шевченко, Е.И. Грачева // Промышленная энергетика. – 1996. – № 7. – С. 27–28.
246. Шевченко В.В. Анализ методик расчета потерь электроэнергии во внутризаводских сетях электроснабжения / В.В. Шевченко, Е.И. Грачева. – М.: ВИНТИ РАН, 1995. – № 3. – С. 50.

247. Шевченко В.В. Определение потерь электроэнергии в цеховых сетях напряжением до 1000 В / В.В. Шевченко, Е.И. Грачева // Промышленная энергетика. – 2001. – № 10. – С. 33–35.

248. Шевченко В.В. Определение сопротивления контактных соединений низковольтных коммутационных аппаратов / В.В. Шевченко, Е.И. Грачева // Промышленная энергетика. – 2002. – № 1. – С. 42–43.

249. Шевченко В.В. Определение эквивалентного сопротивление линий цеховых сетей напряжением до 1000 В с учетом их технического состояния / В.В. Шевченко, Е.И. Грачева // Электроснабжение, энергосбережение и электроремонт: Тез. докл. науч.-техн. конф. / Под общ. ред. Б.И. Кудрина, Б.В. Жилина; РХТУ им. Д.И. Менделеева, Новомосковский институт. – Новомосковск, 2000. – С. 7–9.

250. Шевченко В.В. Расчет потерь электроэнергии в цеховых сетях / В.В. Шевченко, Е.И. Грачева // Электрооборудование, электроснабжение, электропотребление: Тез. докл. науч.-техн. метод. конф. (Москва 15–17 ноября 1995 г.); под общей ред. Б.И. Кудрина. – М.: Электрика, 1995. – С. 35–36.

251. Шенк Х. Теория инженерного эксперимента / Х. Шенк. – М.: Мир, 1972. – 382 с.

252. Шидловский А.К. Расчеты электрических нагрузок систем электроснабжения промышленных предприятий / А.К. Шидловский, Г.Я. Вагин, Э.Г. Куренный. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 224 с.

253. Щербаков Е.Ф. Об измерении активных потерь в электрических аппаратах / Е.Ф. Щербаков, Л.И. Балтер, И.Е. Штрикман // Электротехника. – 1974. – № 4. – С. 45–47.

254. Щербина Ю.В. Снижение технологического расхода энергии в электрических сетях / Ю.В. Щербина, Н.Д. Бойко, А.Н. Бутенко. – Киев: Техшка, 1981. – 103 с.

255. Щукин Б.Д. Применение ЭВМ для проектирования систем электроснабжения / Б.Д. Щукин, Ю.Ф. Лыков. – М.: Энергоиздат, 1982. – 176 с.

256. Экономия электроэнергии в электрических сетях / И.И. Магда, С.Я. Меженный, В.Н. Сулейманов и др.; под ред. Н.А. Качановой и Ю.В. Щербины. – Киев: Техшка, 1986. – 167 с.
257. Электрические и электронные аппараты: учеб. для вузов / Под ред. Ю.К. Розанова. – М.: Энергоатомиздат, 1998. – 752 с.
258. Электрические нагрузки промышленных предприятий / С.Д. Волобринский, Г.М. Каялов, Д.М. Клейн, В.С. Иещель. – Л.: Энергия, 1971. – 264 с.
259. Электрические системы и сети / Н.Б. Буслова, В.Н. Винославский, Т.И. Денисенко. – Киев: Вища школа, 1986. – 584 с.
260. Электрические системы. Режимы работы электрических сетей и систем / Под ред. В.А. Веникова. – М.: Высш. шк., 1975. – 344 с.
261. Энергосбережение: Методическое пособие для работников энергонадзора и энергослужб предприятий / А.И. Панфилов, Г.П. Корытов. – Воронеж, 1998. – 254 с.
262. Электроэнергетика России 2030: Целевое видение / Под общ. ред. Б.Ф. Вайнзихера. – М.: Альпина Бизнес Букс, 2008. – 360 с.
263. Энергосберегающая технология электроснабжения народного хозяйства: В 5 кн.: Практ. пособие / под ред. В.А. Веникова. Кн. 4. Потребление электрической энергии – надежность и режимы / В.В. Михайлов, М.А. Поляков. – М.: Высш. шк., 1989. – 143 с. с ил.
264. Bochanky L. Modellansatz fur einen optimalen Blindleistungshaushalt / L. Bochanky // Energietechnik. – 1989. – № 4. – С.146–149.
265. Brice C.W. Comparison of approximate and exact voltage drop calculations for distribution files / C.W. Brice // IEEE Transaction on Power Apparatus and systems. – 1982. – № 11. – С. 4428–4431.
266. Kingsler K., Kornas T. Spannungsabweichungen und ihre Auswirkungen auf die Okonomie von Industriebetrieben / K. Kingsler, T. Kornas // Energietechnik. – 1986. – № 5. – С. 180–182.

267. Rausendorf S. Anwendung der Linearoptimierung bei der
zuverlässigkeitsorientierten Optimierung des elektrischen Regimes / S. Rausendorf //
Elektie. – 1986. – № 4. – С. 141–145.

Таблица П.А

t , ч	S , кВ·А	ΔP , кВт	ΔW , кВт·ч
Линия 11			
0–9	3,0	0,00180	0,01443
9–18	6,0	0,00721	0,05776
18–24	4,0	0,00321	0,02565
Линия 6			
0–6	6,0	0,00519	0,03118
6–12	5,0	0,00361	0,02165
12–18	4,0	0,00231	0,01385
18–24	3,0	0,00129	0,00779
Линия 7			
0–6	6,0	0,00519	0,03118
6–12	5,0	0,00361	0,02165
12–18	4,0	0,00231	0,01385
18–24	3,0	0,00129	0,00779
Линия 9			
0–6	6,0	0,02569	0,15415
6–12	5,0	0,01784	0,10703
12–18	4,0	0,01141	0,06848
18–24	3,0	0,00642	0,03852
Линия 12			
0–3	26,0	0,16933	0,50798
3–6	28,0	0,19664	0,58992
6–12	27,0	0,18272	1,09632
12–18	30,0	0,22753	1,36521
18–24	24,0	0,14411	0,86461
Линия 13			
0–3	27,0	0,22398	0,67194
3–6	27,0	0,22398	0,67194
6–12	42,0	0,54887	3,29321
12–18	30,0	0,27892	1,67349
18–24	21,0	0,13502	0,81011

Данные по кабелям и коммутационным автоматам низкого напряжения

№ п/п	Наименование линии	Марка и сечение кабеля	Длина, м	Количество коммутационных аппаратов	
				Автоматический выключатель	Магнитный пускатель, контактор
1	2	3	4	5	6
1	КТП – 1ШЩ (сек 1)	3хВВГнг 4х150	23	Masterpact NT10N1(1000А), Compact NS630 (630А)	–
2	КТП – 1ШЩ (сек 2)	3хВВГнг 4х150	19	Masterpact NT10N1(1000А), Compact NS630 (630А)	–
3	КТП – 2ШЩ (сек 1)	ВВГнг 4х120	160	Compact NS250 (250А), Compact NS250 (200А)	–
4	КТП – 2ШЩ (сек 2)	ВВГнг 4х120	166	Compact NS250 (250А), Compact NS250 (200А)	–
5	КТП – 3ШЩ (м-501)	2хВВГнг 4х95	155	Compact NS630 (630А)	–
6	КТП – 3ШЩ (м-502)	2хВВГнг 4х95	155	Compact NS630 (630А)	–
7	КТП – м-301\1(ШУ)	2хВВГнг 4х70	84	Compact NS630 (630А)	–
8	м-301\1(ШУ) – м301\1(М)	ВВГнг 4х150	10	ВА51-39-341110-20(400А)	МК6-30Т(400А)
9	м-301\1(ШУ) – м301\1(М)	ВВГнг 4х120	10		МК6-20Т(400А)
10	КТП – м-301\2(ШУ)	2хВВГнг 4х70	90	Compact NS630 (630А)	–
11	м-301\2(ШУ) – м301\2(М)	ВВГнг 4х150	10	ВА51-39-341110-20(400А)	МК6-30Т(400А)
12	м-301\2(ШУ) – м301\2(М)	ВВГнг 4х120	10		МК6-20Т(400А)
13	КТП – м-301\3(ШУ)	2хВВГнг 4х70	98	Compact NS630 (630А)	–
14	м-301\3(ШУ) – м301\3(М)	ВВГнг 4х150	10	ВА51-39-341110-20(400А)	МК6-30Т(400А)
15	м-301\3(ШУ) – м301\3(М)	ВВГнг 4х120	10		МК6-20Т(400А)
16	КТП – м-401(ШУ)	3хВВГнг 4х150	165	Compact NS630 (630А)	–

1	2	3	4	5	6
17	м-401(ШУ) – м-401(М)	6хВВГнг 1х185	15	Compact NS630 (630A)	LC-F630P7, LC1-F500P7
18	1ШЩ – В2(М)	КГ 4х1,5	77	GV2ME 08 2,5-4А	LC-D039P7
19	1ШЩ – В114/1(М)	ВВГ 4х25	30	GV3ME 08 56-80А	LC-D80P7
20	1ШЩ – Н212/1(М)	ВВГнг 4х50	80	Compact NS160N 160А	LC-F150P7
21	1ШЩ – Н213/1(М)	ВВГнг 4х50	95	Compact NS160N 160А	LC-F150P7
22	1ШЩ – В115/1(М)	ВВГ 4х70	30	Compact NS250N 250А	LC-F150P7
23	1ШЩ – Н103/1(М)	ВВГ 4х95	20	Compact NS250N 250А	LC-F225P7
24	1ШЩ – Н107/1(М)	ВВГнг 4х4	90	BA47-29 C63 63А	ПМЛ 4100
25	1ШЩ – В1(М)	КГ 4х10	93	GV3ME 40 25-40А	LC1-D32P7
26	1ШЩ – П2(М)	ВВГ 4х1,5	54	GV2ME 06 1-1,6А	LC1-D09P7
27	1ШЩ – АВ4(М)	ВВГнг 4х1,5	92	GV2ME 05 0,63-1А	LC1-D09P7
28	1ШЩ – В505(М)	ВВГ 4х6	50	GV3ME 40 25-40А	LC1-D32P7
29	1ШЩ – Н103/2(М)	ВВГ 4х95	25	Compact NS250N 250А	LC1-F225P7
30	1ШЩ – Н107/2(М)	ВВГнг 4х4	90	BA47-29 C63 63А	ПМЛ 4100
31	1ШЩ – В1р(М)	КГ 4х10	93	GV3ME 40 25-40А	LC1-D32P7
32	1ШЩ – В3(М)	КГ 4х1,5	81	GV2ME 10 4-6,3А	LC1-D09P7
33	1ШЩ – В4(М)	КГ 4х1,5	25	GV3ME 06 1-1,6А	LC1-D09P7
34	1ШЩ – В114/2(М)	ВВГ 4х25	35	GV3ME 80 56-80А	LC1-D80P7
35	1ШЩ – Н212/2(М)	ВВГнг 4х50	85	Compact NS160N 160А	LC-F150P7
36	1ШЩ – Н213/2(М)	ВВГнг 4х50	95	Compact NS160N 160А	LC-F150P7
37	1ШЩ – В115/2(М)	ВВГ 4х70	50	Compact NS250N 250А	LC-F150P7
38	1ШЩ – В2р(М)	КГ 4х1,5	78	GV2ME 08 2,5-4А	LC1-D09P7
39	2ШЩ – П1(М)	КГ 4х10	30	GV3ME 63 40-63А	LC1-D40P7
40	2ШЩ – П3(М)	ВВГ 4х1,5	18	GV2ME 06 1-1,6А	LC1-D09P7
41	2ШЩ – АВ2(М)	ВВГнг 4х1,5	36	GV2ME 14 6-10А	LC1-D09P7

1	2	3	4	5		6
42	2ШЩ – Н215/1(М)	ВВГнг 4x4	66	GV2ME 32	24-32А	LC1-D32P7
43	2ШЩ – Н214/1(М)	ВВГнг 4x1,5	78	GV2ME 10	4-6,3А	LC1-D09P7
44	2ШЩ – Н216/1(М)	ВВГнг 4x1,5	60	GV2ME 08	2,5-4А	LC1-D09P7
45	2ШЩ – Н218(М)	ВВГнг 4x1,5	44	GV2ME 10	4-6,3А	LC1-D09P7
46	2ШЩ – Н406/1(М)	ВВГнг 4x4	25	GV2ME 22	20-25А	LC1-D32P7
47	2ШЩ – Н402/1(М)	ВВГнг 4x1,5	18	GV2ME 14	6-10А	LC1-D09P7
48	2ШЩ – П1р(М)	КГ 4x10	20	GV3ME 63	40-63А	LC1-D32P7
49	2ШЩ – П3р(М)	ВВГ 4x1,5	18	GV2ME 06	1-1,6А	LC1-D09P7
50	2ШЩ – АВ3(М)	ВВГнг 4x1,5	30	GV2ME 14	6-10А	LC1-D09P7
51	2ШЩ – Н215/2(М)	ВВГнг 4x4	66	GV2ME 32	24-32А	LC1-D32P7
52	2ШЩ – Н214/2(М)	ВВГнг 4x1,5	78	GV2ME 10	4-6,3А	LC1-D09P7
53	2ШЩ – Н216/2(М)	ВВГнг 4x1,5	60	GV2ME 08	2,5-4А	LC1-D09P7
54	2ШЩ – Н406/2(М)	ВВГнг 4x4	25	GV2ME 10	4-6,3А	LC1-D32P7
55	2ШЩ – Н402/2(М)	ВВГнг 4x1,5	18	GV2ME 22	20-25А	LC1-D09P7
56	2ШЩ – ПН304(БУ)	ВВГнг 5x50	40	GV2ME 14	6-10А	LC1-D95P7
57	ПН304(БУ) – ПН304(ТЭН)	2КГ 4x16	12	Compact NS250N	250А	–
58	2ШЩ – АВ1(М)	ВВГнг 4x1,5	45	GV2ME 14	6-10А	LC1-D09P7
59	3ШЩ – 501(М)	2xВВбШв 4x95	600	Compact NS400	400А	LC1-F500P7
60	3ШЩ – 502(М)	2xВВбШв 4x95	660	Compact NS400	400А	LC1-F500P7

Количество коммутационных аппаратов на линиях

№ п/п	Наименование линии	Количество коммутационных аппаратов норм. реж. / авар. реж.
1	2	3
1	КТП – 1ШЩ (СЕК1)	3/4
2	КТП – 1ШЩ (СЕК2)	3/4
3	КТП – 2ШЩ (СЕК1)	3/4
4	КТП – 2ШЩ (СЕК2)	3/4
5	КТП – м-501	4/5
6	КТП – м-502	4/5
7	КТП – м-301\1(ШУ)	4/5
8	КТП – м-301\2(ШУ)	4/5
9	КТП – м-301\3(ШУ)	4/5
10	КТП – м-401(ШУ)	4/5
11	КТП – В2(М)	5/7
12	КТП – В114\1(М)	5/7
13	КТП – Н212\1(М)	5/7
14	КТП – Н213\1(М)	5/7
15	КТП – В115\1(М)	5/7
16	КТП – Н103\1(М)	5/7
17	КТП – Н107\1(М)	5/7
18	КТП – В1(М)	5/7
19	КТП – П2(М)	5/7
20	КТП – АВ4(М)	5/7
21	КТП – В505(М)	5/7
22	КТП – Н103\2(М)	5/7
23	КТП – Н107\2(М)	5/7
24	КТП – В1р(М)	5/7
25	КТП – В3(М)	5/7
26	КТП – В4(М)	5/7
27	КТП – В114\2(М)	5/7
28	КТП – Н212\2(М)	5/7
29	КТП – Н213\2(М)	5/7
30	КТП – В115\2(М)	5/7
31	КТП – В2р(М)	5/7
32	КТП – П1(М)	5/7
33	КТП – П3(М)	5/7
34	КТП – АВ2(М)	5/7
35	КТП – Н215\1(М)	5/7
36	КТП – Н214\1(М)	5/7

1	2	3
37	КТП – Н216\1(М)	5/7
38	КТП – В118(М)	5/7
39	КТП – Н406\1(М)	5/7
40	КТП – Н402\1(М)	5/7
41	КТП – П1р(М)	5/7
42	КТП – П3р(М)	5/7
43	КТП – АВ3(М)	5/7
44	КТП – Н215\2(М)	5/7
45	КТП – Н214\2(М)	5/7
46	КТП – Н216\2(М)	5/7
47	КТП – Н406\2(М)	5/7
48	КТП – Н402\2(М)	5/7
49	КТП – ПН304(ТЭН)	6/8
50	КТП – АВ1(М)	5/7

Данные для определения работоспособности магнитных пускателей
 ПАЕ-312 ($I_H = 40$ А) и ПАЕ-611 ($I_H = 80$ А)

№	Тип магнитного пускателя	Номинальный ток I_H , А	Начальное сопротивление r_0 , мОм	Критическое значение сопротивления $r_{кр}$, мОм	Скорость изменения сопротивления v , мОм/цикл
1	ПАЕ-312	40	20,6	61,8	$1,1 \cdot 10^{-5}$
2			20,6	61,8	$2,14 \cdot 10^{-5}$
3			20,8	62,4	$1,14 \cdot 10^{-5}$
4			20,9	62,7	$1,14 \cdot 10^{-5}$
5			20,4	61,2	$1,14 \cdot 10^{-5}$
6			20,4	61,2	$1,37 \cdot 10^{-5}$
7			20,6	61,8	$7,14 \cdot 10^{-5}$
8			21	63	$4,14 \cdot 10^{-5}$
9			20,6	61,8	$1,14 \cdot 10^{-5}$
10			20,3	60,9	$1,14 \cdot 10^{-5}$
Среднее значение			20,6	61,86	$2,04 \cdot 10^{-5}$
Среднее квадратическое отклонение			0,225	—	$2,46 \cdot 10^{-5}$
1	ПАЕ-611	80	9,5	28,5	$6,56 \cdot 10^{-5}$
2			9,4	28,2	$3,44 \cdot 10^{-5}$
3			9,4	28,2	$3,44 \cdot 10^{-5}$
4			9,5	28,5	$6,56 \cdot 10^{-5}$
5			9,5	28,5	$6,56 \cdot 10^{-5}$
6			9,6	28,8	$1,66 \cdot 10^{-5}$
7			9,5	28,5	$6,56 \cdot 10^{-5}$
8			9,5	28,5	$6,56 \cdot 10^{-5}$
9			9,5	28,5	$6,56 \cdot 10^{-5}$
10			9,5	28,5	$6,56 \cdot 10^{-5}$
Среднее значение			9,49	28,5	$6,94 \cdot 10^{-5}$
Среднее квадратическое отклонение			0,06	—	$3,65 \cdot 10^{-5}$

Данные для оценки работоспособности контакторов

№	Тип контактора	Номинальный ток I_H , А	Начальное сопротивление r_0 , мОм	Критическое значение сопротивления $r_{кр}$, мОм	Скорость изменения сопротивления v , мОм/цикл
1	2	3	4	5	6
1	КП1	20	17,5	52,35	$4,46 \cdot 10^{-5}$
2			17,5	52,5	$4,96 \cdot 10^{-5}$
3			17,5	52,5	$4,96 \cdot 10^{-5}$
4			17,2	51,6	$1,96 \cdot 10^{-5}$
5			17,1	51,3	$9,57 \cdot 10^{-5}$
6			16	48	0,0001
7			17,6	52,8	$5,96 \cdot 10^{-5}$
8			17,7	53,1	$6,96 \cdot 10^{-5}$
9			17,6	52,8	$5,96 \cdot 10^{-5}$
10			17,7	53,1	$6,96 \cdot 10^{-5}$
Среднее значение			17,3	52	$6,18 \cdot 10^{-5}$
Среднее квадратическое отклонение			0,51	–	$2,38 \cdot 10^{-5}$
1	КТПВ600	63	4,87	14,6	$6,63 \cdot 10^{-7}$
2			4,9	14,7	$3,66 \cdot 10^{-6}$
3			4,9	14,7	$3,66 \cdot 10^{-6}$
4			4,87	14,6	$6,63 \cdot 10^{-7}$
5			4,87	14,6	$6,63 \cdot 10^{-7}$
6			4,87	14,6	$6,63 \cdot 10^{-7}$
7			4,87	14,6	$6,63 \cdot 10^{-7}$
8			4,9	14,7	$3,66 \cdot 10^{-6}$
9			4,9	14,7	$3,66 \cdot 10^{-6}$
10			4,83	14,5	$3,34 \cdot 10^{-6}$
Среднее значение			4,57	14,63	$2,13 \cdot 10^{-6}$
Среднее квадратическое отклонение			0,31	–	$2,11 \cdot 10^{-6}$

1	2	3	4	5	6
1	КП1	75	4,09	12,27	$4 \cdot 10^{-7}$
2			4,09	12,27	$4 \cdot 10^{-7}$
3			4,09	12,27	$4 \cdot 10^{-7}$
4			4,09	12,27	$4 \cdot 10^{-7}$
5			4,1	12,3	$1 \cdot 10^{-6}$
6			4,1	12,3	$1 \cdot 10^{-6}$
7			4,08	12,24	$1 \cdot 10^{-6}$
8			4,08	12,24	$1 \cdot 10^{-6}$
9			4,1	12,3	$4 \cdot 10^{-8}$
10			4,09	12,27	$1 \cdot 10^{-6}$
Среднее значение			4,09	12,27	$3,6 \cdot 10^{-7}$
Среднее квадратическое отклонение			0,01	-	$4,9 \cdot 10^{-7}$

Зависимость вероятности безотказной работы контактов контакторов от количества коммутационных циклов

Тип контактора	S	S_1	$\theta_1, 10^6$	$\theta_2, 10^6$	$z \cdot 10^5$, циклов	$P(z)$
КП1 $I_H = 20 \text{ А}$	0,38	0,03	0,02	0,56	1	0,99
					2	0,99
					3	0,86
					4	0,18
					5	0
					6	0
					7	0
					8	0
КТПВ600 $I_H = 63 \text{ А}$	0,98	0,07	0,44	4,8	1	1
					2	0,99
					3	0,97
					4	0,95
					5	0,94
					6	0,94
					7	0,93
					8	0,93
КП1 $I_H = 75 \text{ А}$	1,37	0,02	0,06	22,8	1	0,98
					2	0,98
					3	0,98
					4	0,97
					5	0,97
					6	0,96
					7	0,94
					8	0,91

Данные для расчета надежности автоматических выключателей

№	Тип выключателя	Номинальный ток I_n , А	Начальное сопротивление r_0 , мОм	Критическое значение сопротивления $r_{кр}$, мОм	Скорость изменения сопротивления v , мОм/цикл
1	2	3	4	5	6
1	АЕ-2443	50	6,98	20,94	$8 \cdot 10^{-4}$
2			6,98	20,94	$8 \cdot 10^{-4}$
3			6,98	20,94	$8 \cdot 10^{-4}$
4			7	21	$3 \cdot 10^{-4}$
5			7	21	$3 \cdot 10^{-4}$
6			6,98	20,94	$8 \cdot 10^{-4}$
7			6,98	20,94	$8 \cdot 10^{-4}$
8			6,98	20,94	$8 \cdot 10^{-4}$
9			6,95	20,85	$2 \cdot 10^{-3}$
10			6,98	20,94	$8 \cdot 10^{-4}$
Среднее значение			6,97	20,94	$14 \cdot 10^{-4}$
Среднее квадратическое отклонение			0,013	—	$9,4 \cdot 10^{-4}$
1	АК63	63	4,87	14,6	$1 \cdot 10^{-3}$
2			4,9	14,7	$4 \cdot 10^{-3}$
3			4,9	14,7	$4 \cdot 10^{-3}$
4			4,87	14,6	$1 \cdot 10^{-3}$
5			4,87	14,6	$1 \cdot 10^{-3}$
6			4,87	14,6	$1 \cdot 10^{-3}$
7			4,87	14,6	$1 \cdot 10^{-3}$
8			4,9	14,7	$4 \cdot 10^{-3}$
9			4,9	14,7	$4 \cdot 10^{-3}$
10			4,88	14,6	$3 \cdot 10^{-3}$
Среднее значение			4,88	14,6	$3,3 \cdot 10^{-3}$
Среднее квадратическое отклонение			0,02	—	$1,8 \cdot 10^{-3}$

1	2	3	4	5	6
1	А3110	100	3,07	9,21	$5 \cdot 10^{-4}$
2			3,06	9,18	$5 \cdot 10^{-4}$
3			3,06	9,18	$5 \cdot 10^{-4}$
4			3,07	9,21	$5 \cdot 10^{-4}$
5			3,07	9,21	$2 \cdot 10^{-4}$
6			3,07	9,21	$2 \cdot 10^{-3}$
7			3,07	9,21	$2 \cdot 10^{-3}$
8			3,09	9,27	$2 \cdot 10^{-3}$
9			3,09	9,27	$5 \cdot 10^{-4}$
10			3,07	9,21	$3 \cdot 10^{-3}$
Среднее значение			3,07	9,21	$14 \cdot 10^{-4}$
Среднее квадратическое отклонение			0,01	–	$9,4 \cdot 10^{-4}$

Зависимость вероятности безотказной работы контактов автоматических
выключателей от количества коммутационных циклов

Тип выключателя	S	S_1	$\theta_1, 10^3$	$\theta_2, 10^4$	$z \cdot 10^3$, циклов	$P(z)$
1	2	3	4	5	6	7
АЕ-2443 $I_H = 50$ А	0,7	0,001	0,03	1	1	0,99
					2	0,99
					3	0,99
					4	0,88
					5	0,63
					6	0,42
					7	0,33
					8	0,32
					9	0,32
					10	0,32
АК-63 $I_H = 63$ А	0,3	0,004	0,02	0,3	1	0,99
					2	0,9
					3	0,88
					4	0,86
					5	0,82
					6	0,76
					7	0,67
					8	0,51
					9	0,27
					10	0,26

1	2	3	4	5	6	7
A3110 $I_H = 100 \text{ A}$	0,7	0,003	0,02	0,4	1	0,99
					2	0,8
					3	0,77
					4	0,75
					5	0,73
					6	0,67
					7	0,59
					8	0,48
					9	0,36
					10	0,34

Матрица планирования ДФЭ 2^{5-1} для радиальных сетей

U/i	X_0	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_1X_2	X_1X_3	X_1X_4	X_1X_5	X_2X_3	X_2X_4	X_2X_5	X_3X_4	X_3X_5	X_4X_5	R_{\ominus}	ΔP
1	+	-	-	-	-	+	+	+	+	-	+	+	-	+	-	-	2,45	2,38
2	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	19,3	18,7
3	+	-	+	-	-	-	-	+	+	+	-	-	-	+	+	+	1,12	1,08
4	+	+	+	-	-	+	+	-	-	+	-	-	+	+	-	-	10,7	10,4
5	+	-	-	+	-	-	+	-	+	+	-	+	+	-	-	+	0,59	2,3
6	+	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	-	+	-	3,15	12,2
7	+	-	+	+	-	+	-	-	+	-	+	-	+	-	+	-	0,31	1,21
8	+	+	+	+	-	-	+	+	-	-	+	-	-	-	-	+	1,43	5,57
9	+	-	-	-	+	-	+	+	-	+	+	-	+	-	+	-	2,77	29,9
10	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	+	-	-	-	-	+	24,6	266
11	+	-	+	-	+	+	-	+	-	-	-	+	+	-	-	+	1,38	14,9
12	+	+	+	-	+	-	+	-	+	-	-	+	-	-	+	-	12,3	133
13	+	-	-	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	+	+	+	0,66	28,7
14	+	+	-	+	+	-	-	+	+	-	-	-	+	+	-	-	3,58	155
15	+	-	+	+	+	-	-	-	-	+	+	+	-	+	-	-	0,33	14,3
16	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	1,79	77,13

Результаты вычислений значений функций цели в дополнительных точках для радиальных сетей

№	X ₀	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	R _э	\hat{R}	ΔP	$\hat{\Delta P}$	$ \Delta P - \hat{\Delta P} $	$ R_{э} - \hat{R} $	δ_R	$\delta_{\Delta P}$
1	+	0	0	-	0	0	9,32	9,32	59,48	59,48	0	0	0	0
2	+	0	+	+	+	+	5,87	6,46	29,16	27,54	1,62	0,59	9,1	5,9
3	+	-	0	-	0,5	1,2	1,1	1,12	40,77	40,77	0	0,2	1,8	0
4	+	0,5	-	-	-	+	12,6	11,9	47,92	44,29	3,63	0,7	5,9	8,2
5	+	-	-	-	0	+	3,42	3,06	43,1	39,47	3,63	0,36	10,42	9,2
6	+	-1,2	-	+	+	-	2,37	2,21	6,382	6,01	0,28	0,16	7,2	4,7
7	+	0	0	+	-0,5	0	5,57	5,34	21,17	21,17	0	0,23	4,3	0
8	+	1,2	+	-	0	0	8,53	8,53	82,19	85,82	3,63	0	0	4,2
9	+	0	0	+	0	0	5,16	5,16	37,01	37,01	0	0	0	0
10	+	0	-	-	+	0	9,89	9,53	144,3	144,3	0	0,36	3,8	0

$$\delta_R = \frac{|R_{э} - \hat{R}|}{R_{э}} \cdot 100, \% ; \delta_P = \frac{|\Delta P - \hat{\Delta P}|}{\Delta P} \cdot 100, \% .$$

Матрица планирования ДФЭ 2^{5-1} для магистральной сетей

U/i	X ₀	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₁ X ₂	X ₁ X ₃	X ₁ X ₄	X ₁ X ₅	X ₂ X ₃	X ₂ X ₄	X ₂ X ₅	X ₃ X ₄	X ₃ X ₅	X ₄ X ₅	R _Э	ΔP
1	+	-	-	-	-	+	+	+	+	-	+	+	-	+	-	-	7,88	399,5
2	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	9,96	504,9
3	+	-	+	-	-	-	-	+	+	+	-	-	-	+	+	+	5,65	286,4
4	+	+	+	-	-	+	+	-	-	+	-	-	+	+	-	-	9,34	473,5
5	+	-	-	+	-	-	+	-	+	+	-	+	+	-	-	+	2,38	668,5
6	+	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	-	+	-	4,06	1140,4
7	+	-	+	+	-	+	-	-	+	-	+	-	+	-	+	-	2,99	839,9
8	+	+	+	+	-	-	+	+	-	-	+	-	-	-	-	+	3,82	1073
9	+	-	-	-	+	-	+	+	-	+	+	-	+	-	+	-	3,88	786,8
10	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	+	-	-	-	-	+	8,55	1733,9
11	+	-	+	-	+	+	-	+	-	-	-	+	+	-	-	+	5,83	1182,3
12	+	+	+	-	+	-	+	-	+	-	-	+	-	-	+	-	8,15	1652,8
13	+	-	-	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	+	+	+	1,62	1820,2
14	+	+	-	+	+	-	-	+	+	-	-	-	+	+	-	-	3,33	3741,6
15	+	-	+	+	+	-	-	-	-	+	+	+	-	+	-	-	1,36	1528,1
16	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	3,34	3752,9

Результаты вычислений функций цели в дополнительных точках для магистральных сетей

№	X_0	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	$R_{\text{эш}}$	$\hat{R}_{\text{эш}}$	$\Delta P_{\text{ш}}$	$\hat{\Delta P}_{\text{эш}}$	$ R_{\text{эш}} - \hat{R}_{\text{эш}} $	$ \Delta P_{\text{ш}} - \hat{\Delta P}_{\text{эш}} $	δ_R	$\delta_{\Delta P}$
1	+	0	0	0	0	0	5,24	5,13	1299,1	1349,1	0,11	49,9	2,1	3,7
2	+	0	-	-	-	-	8,5	8,76	430,9	395,5	0,26	35,4	3,1	8,2
3	+	+	0	+	+	+	3,38	3,18	3794,9	3700,1	0,20	94,9	5,9	2,5
4	+	-	-	0	-	-	4,64	4,33	460,1	492,9	0,31	32,8	6,7	6,6
5	+	+	+	+	0	+	3,24	3,4	2273,6	2453,1	0,16	179,4	4,9	7,3
6	+	-	-	-	-	0	7,46	7,08	378,2	410,4	0,38	32,2	5,1	8,5
7	+	0	0	+	+	+	2,56	2,56	2874,2	2808,2	0	66	0	2,3
8	+	+	0	0	+	+	6,03	5,86	2392,1	2517,8	0,17	125,7	2,9	5,3
9	+	0	0	0	+	+	4,69	4,83	1860,4	2122,3	0,14	261,8	3	12,3
10	+	0	+	-	+	0	6,56	6,67	1127,5	1199,8	0,11	72,3	1,7	6,4

Матрица планирования ДФЭ 2^{5-1} для радиальных сетей для оценки погрешностей расчета эквивалентных сопротивлений

U/i	X ₀	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₁ X ₂	X ₁ X ₃	X ₁ X ₄	X ₁ X ₅	X ₂ X ₃	X ₂ X ₄	X ₂ X ₅	X ₃ X ₄	X ₃ X ₅	X ₄ X ₅	R _Э	R'	δ
1	+	-	-	-	-	+	+	+	+	-	+	+	-	+	-	-	2,45	2,47	0,8
2	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	19,3	19,6	3,2
3	+	-	+	-	-	-	-	+	+	+	-	-	-	+	+	+	1,12	1,13	5,1
4	+	+	+	-	-	+	+	-	-	+	-	-	+	+	-	-	10,7	10,8	0,93
5	+	-	-	+	-	-	+	-	+	+	-	+	+	-	-	+	0,59	0,62	5,4
6	+	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	-	+	-	3,15	3,18	0,85
7	+	-	+	+	-	+	-	-	+	-	+	-	+	-	+	-	0,31	0,31	0
8	+	+	+	+	-	-	+	+	-	-	+	-	-	-	-	+	1,43	1,49	4,6
9	+	-	-	-	+	-	+	+	-	+	+	-	+	-	+	-	2,77	2,67	4,7
10	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	+	-	-	-	-	+	24,6	23,7	3,7
11	+	-	+	-	+	+	-	+	-	-	-	+	+	-	-	+	1,38	1,41	2,1
12	+	+	+	-	+	-	+	-	+	-	-	+	-	-	+	-	12,3	12,1	1,6
13	+	-	-	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	+	+	+	0,66	0,64	4,8
14	+	+	-	+	+	-	-	+	+	-	-	-	+	+	-	-	3,58	3,47	3,2
15	+	-	+	+	+	-	-	-	-	+	+	+	-	+	-	-	0,33	0,32	4,8
16	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	1,79	1,76	1,7

Матрица планирования ДФЭ 2^{5-1} для магистральных сетей для оценки погрешности расчета эквивалентных сопротивлений

U/i	X ₀	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₁ X ₂	X ₁ X ₃	X ₁ X ₄	X ₁ X ₅	X ₂ X ₃	X ₂ X ₄	X ₂ X ₅	X ₃ X ₄	X ₃ X ₅	X ₄ X ₅	R _Э	R _{ш'}	δ
1	+	-	-	-	-	+	+	+	+	-	+	+	-	+	-	-	7,88	7,93	0,6
2	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	9,96	10,27	3,1
3	+	-	+	-	-	-	-	+	+	+	-	-	-	+	+	+	5,76	5,81	0,8
4	+	+	+	-	-	+	+	-	-	+	-	-	+	+	-	-	9,51	9,92	4,1
5	+	-	-	+	-	-	+	-	+	+	-	+	+	-	-	+	2,38	2,44	2,4
6	+	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	-	+	-	4,06	3,89	4,3
7	+	-	+	+	-	+	-	-	+	-	+	-	+	-	+	-	3,05	3,22	3,2
8	+	+	+	+	-	-	+	+	-	-	+	-	-	-	-	+	3,89	5,07	3,69
9	+	-	-	-	+	-	+	+	-	+	+	-	+	-	+	-	3,88	3,91	3,5
10	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	+	-	-	-	-	+	8,55	8,91	4,0
11	+	-	+	-	+	+	-	+	-	-	-	+	+	-	-	+	5,94	6,25	4,9
12	+	+	+	-	+	-	+	-	+	-	-	+	-	-	+	-	8,29	8,61	4,9
13	+	-	-	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	+	+	+	1,62	1,67	2,9
14	+	+	-	+	+	-	-	+	+	-	-	-	+	+	-	-	3,33	3,44	3,2
15	+	-	+	+	+	-	-	-	-	+	+	+	-	+	-	-	1,39	1,45	4,1
16	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	3,4	3,6	4,5

Зависимость вероятности безотказной работы контактов коммутационных аппаратов цеховой сети от количества коммутационных циклов

Тип выключателя	S	S_1	$\theta_1, 10^6$	$\theta_2, 10^6$	$z \cdot 10^3$, циклов	$P(z)$
АЕ-2026: $I_H = 16 \text{ А}$	1,1	0,004	0,3	6,2	1	1
					2	0,99
					3	0,97
					4	0,94
					5	0,91
					6	0,83
					7	0,82
					8	0,80
					9	0,71
					10	0,55
ПВЗ-60: $I_H = 40 \text{ А}$	1,1	0,05	0,003	0,04	1	1
					2	0,99
					3	0,98
					4	0,97
					5	0,96
					6	0,90
					7	0,85
					8	0,82
					9	0,75
					10	0,62

Тип выключателя	S	S_1	$\theta_1, 10^6$	$\theta_2, 10^6$	$z \cdot 10^3$, циклов	$P(z)$
АП50Б-3МТ: $I_H = 63 \text{ А}$	1	0,002	0,06	1,9	1	1
					2	0,99
					3	0,99
					4	0,98
					5	0,97
					6	0,94
					7	0,92
					8	0,84
					9	0,8
					10	0,7
Тип магнитного пускателя	S	S_1	$\theta_1, 10^6$	$\theta_2, 10^6$	$z \cdot 10^5$, циклов	$P(z)$
МПЛ1100: $I_H = 10 \text{ А}$	0,7	0,07	0,03	24,8	1	1
					2	0,96
					3	0,94
					4	0,90
					5	0,85
					6	0,82
					7	0,78
					8	0,77
					9	0,72
					10	0,62

Тип магнитного пускателя	S	S_1	$\theta_1, 10^6$	$\theta_2, 10^6$	$z \cdot 10^3$, циклов	$P(z)$
МПЛ2100: $I_H = 25 \text{ A}$	0,8	0,003	0,03	5,5	1	1
					2	0,99
					3	0,96
					4	0,92
					5	0,87
					6	0,84
					7	0,80
					8	0,78
					9	0,73
					10	0,65

Результаты поэлементного расчета потерь мощности в линиях цеховой сети

№ линии по схеме	Мощность приемника, кВт	Длина линии, м	Рабочий ток линии, А	Сопrotивление линии, мОм				Потери активной мощности в линии, Вт			
				Среднеквадратичный коэффициент загрузки элементов сети				Среднеквадратичный коэффициент загрузки элементов сети			
				0,3	0,9	1,0	1,4	0,3	0,9	1,0	1,4
1	4,0	18	8,6	333,7	340,8	342,4	350,8	6,7	61,2	75,9	148,9
2	5,0	8	3,6	156,8	157,3	157,4	158,0	0,5	4,8	6,0	11,8
3	1,0	10	1,5	212,4	212,8	212,9	213,3	0,1	1,2	1,4	2,8
4	1,0	5	1,3	23,8	23,9	23,9	23,9	0,01	0,1	0,2	0,3
5	0,4	15	0,9	401,1	401,3	401,4	401,6	0,1	0,8	1,0	2,0
6	0,4	19	0,9	486,1	486,3	486,4	486,7	0,1	1,0	1,3	2,5
7	0,4	9	0,9	209,9	210,0	210,1	210,2	0,1	0,4	0,5	1,1
8	4,0	19	8,6	347,3	353,9	355,6	364,5	6,9	63,6	78,9	158,7
9	1,1	8	2,4	206,3	206,5	206,6	206,9	0,3	2,9	3,6	6,9
10	1,1	8	2,4	206,3	206,5	206,6	206,9	0,3	2,9	3,6	6,9
11	1,3	5	3,5	126,8	127,1	127,2	127,6	0,4	3,8	4,7	9,2
12	4,0	18	8,6	334,5	340,8	342,4	350,8	6,7	61,2	75,9	148,9
13	1,0	12	1,7	235,5	235,6	235,7	235,9	0,2	1,7	2,0	4,0
14	0,5	10	0,9	209,9	209,9	210,0	210,1	0,1	0,4	0,5	1,1
15	0,4	16	0,9	422,3	422,5	422,6	422,9	0,1	0,9	1,1	2,1
16	0,4	20	0,9	507,3	507,9	507,7	507,9	0,1	1,1	1,3	2,6
17	0,4	7	0,9	231,2	231,3	231,3	231,4	0,1	0,5	0,6	1,2
18	1,0	10	1,5	212,4	212,8	212,9	213,3	0,1	1,2	1,4	2,8
19	1,5	4	1,9	31,7	31,8	31,8	31,9	0,03	0,3	0,4	0,7
20	2,0	20	2,8	181,1	181,4	181,5	181,7	0,4	3,5	4,3	8,6
21	1,2	10	2,8	234,4	235,5	235,8	237,3	0,5	4,5	5,5	10,9
22	1,45	18	16,9	179,0	186,5	188,4	198,5	13,8	129,4	161,5	333,3
23	1,45	18	16,9	179,0	186,5	188,4	198,5	13,8	129,4	161,5	333,3
24	1,5	15	2,7	213,0	213,6	213,7	214,5	0,4	3,9	,8	9,5
25	1,2	12	2,8	276,9	278,2	278,6	280,4	0,6	5,3	6,5	12,8
26	1,2	20	3,4	164,2	164,5	164,5	165,1	0,5	4,7	5,8	11,5

Определение потерь мощности по регрессионным моделям

№ линии по схеме	Сечение линии, мм ²	Длина линии, м	Сопротивление линии, мОм	Потери активной мощности в линии, Вт	Погрешность вычисления
			Среднеквадратичный коэффициент загрузки элементов сети	Среднеквадратичный коэффициент загруз- ки элементов сети	Среднеквадра- тический коэффициент загрузки
			0,3	0,3	0,3
1	2,5	18	324,5	6,48	3
2	4	8	143,1	0,48	2
3	2,5	10	218,2	0,11	-10
4	16	5	25,3	0,01	0
5	1,5	15	392,6	0,09	10
6	1,5	19	498,6	0,11	-10
7	2,5	9	199,3	0,09	10
8	4	19	331,5	6,62	4,1
9	1,5	8	188,2	0,29	3,3
10	1,5	8	188,2	0,29	3,3
11	2,5	5	114,6	0,38	5
12	2,5	18	289,9	6,3	6
13	2,5	12	250,1	0,2	0
14	2,5	10	208,5	0,01	9
15	1,5	16	394,1	0,09	9
16	1,5	20	500,1	0,11	10
17	1,5	7	241,1	0,09	9
18	1,5	10	219,8	0,09	10
19	6	4	33,3	0,03	0
20	4	20	171,9	0,36	10
21	2,5	10	248,5	0,53	-6
22	6	18	170,9	13,2	4,3
23	4	18	181,1	14	-1,4
24	4	15	229,9	0,44	-10
25	2,5	12	324,5	0,56	6,7
26	4	20	154,2	0,51	-2

Потери в линиях цеховой сети насосной станции при сроке службы 20 лет

№ линии по схеме	Сопротивление линии, мОм	Потери активной мощности в линии, Вт	Потери электроэнергии в линии, к Вт·ч
1	626,7	139,1	1218
2	400,1	15,56	136,3
3	508,3	3,431	30,05
4	26,72	0,135	1,187
5	683,7	1,661	14,55
6	864,9	2,102	18,41
7	404,9	0,984	8,618
8	718	159,3	1395
9	302,5	5,227	45,79
10	302,5	5,227	45,79
11	251,1	9,229	80,85
12	443,7	98,45	862,4
13	522,1	4,527	39,66
14	422,3	1,026	8,989
15	712,7	1,732	15,17
16	893,9	2,172	19,03
17	451,3	1,097	9,607
18	305,5	2,062	18,06
19	42,15	0,456	3,998
20	282,8	6,653	58,28
21	487,3	11,46	100,4
22	359,7	308,2	2700
23	326,1	279,4	2447
24	476,4	10,42	91,27
25	522,1	12,28	107,6
26	232,8	8,075	70,74
Сумма	11570	1090	9548

Номограммы определения эквивалентного сопротивления цеховых радиальных сетей

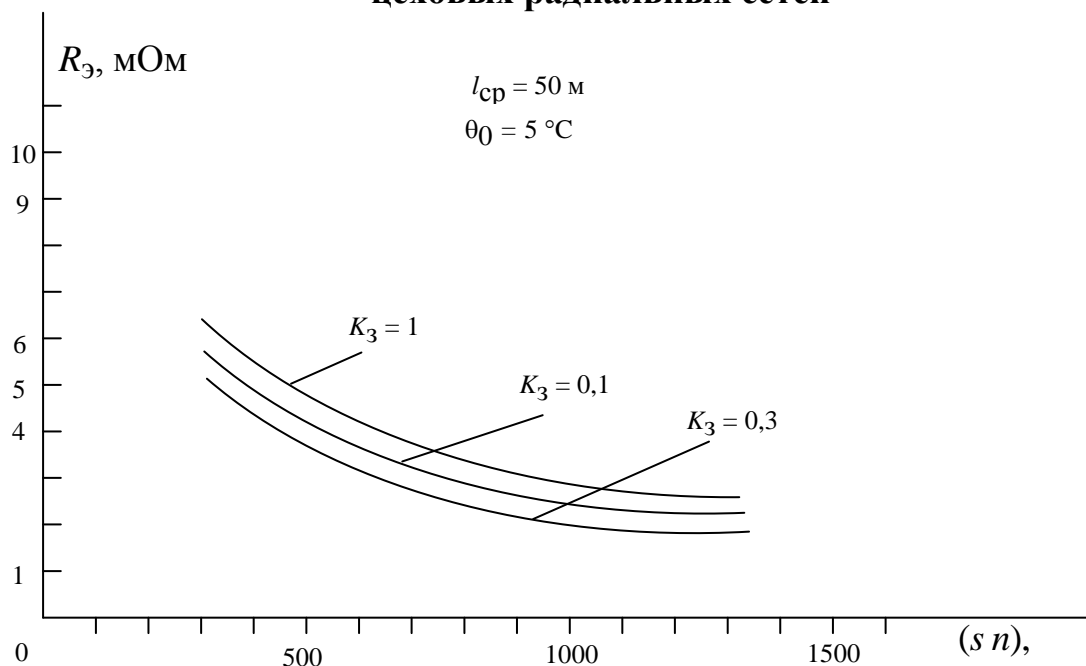


Рис. П.В.1. Номограммы эквивалентного сопротивления для средней длины линий 50 м и температуры окружающей среды 5 °C

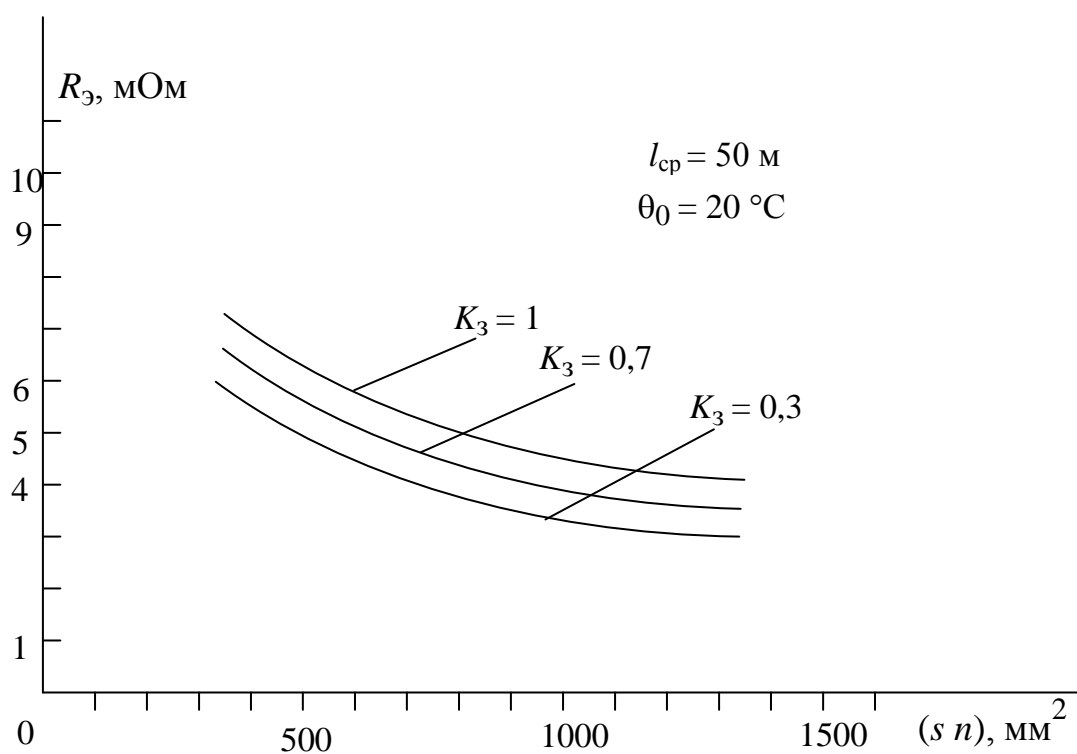


Рис. П.В.2. Номограммы эквивалентного сопротивления для средней длины линий 50 м и температуры окружающей среды 20 °C

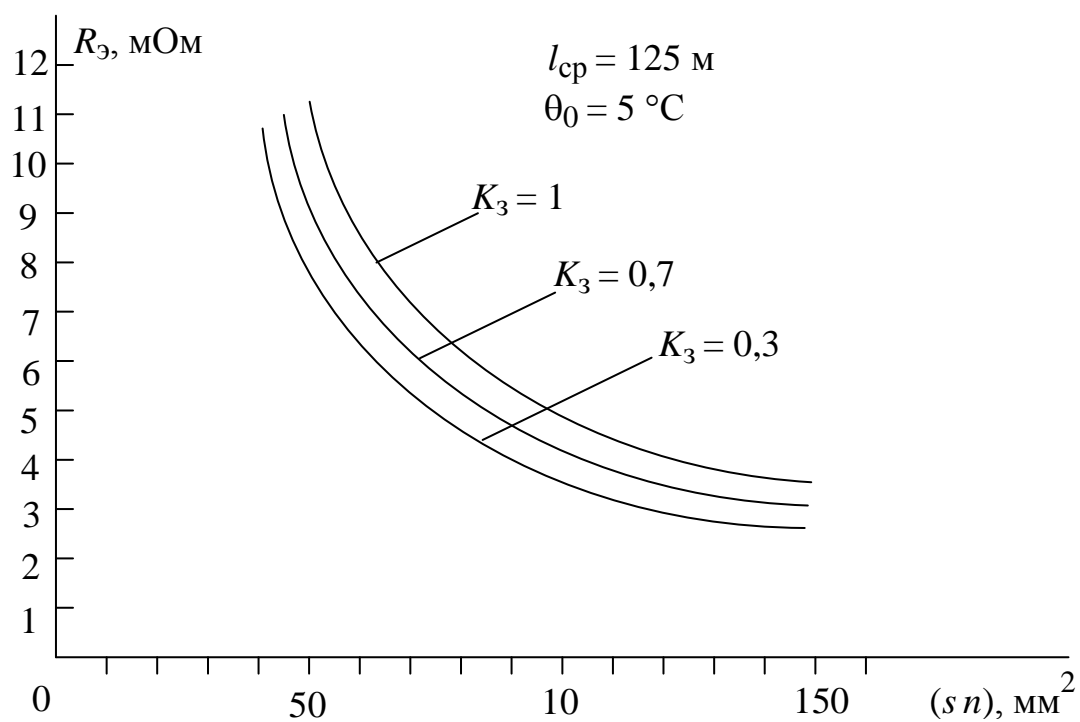


Рис. П.В.3. Номограммы эквивалентного сопротивления для средней длины линий 125 м и температуры окружающей среды 5 °С

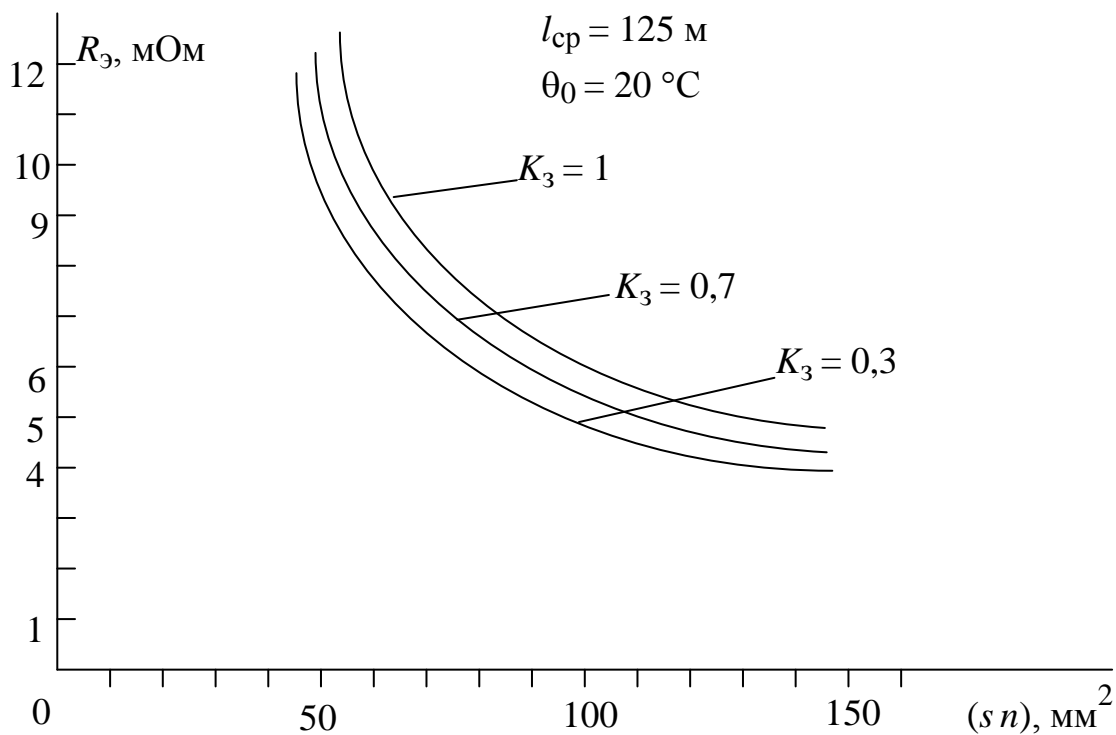


Рис. П.В.4. Номограммы эквивалентного сопротивления для средней длины линий 125 м и температуры окружающей среды 20 °С

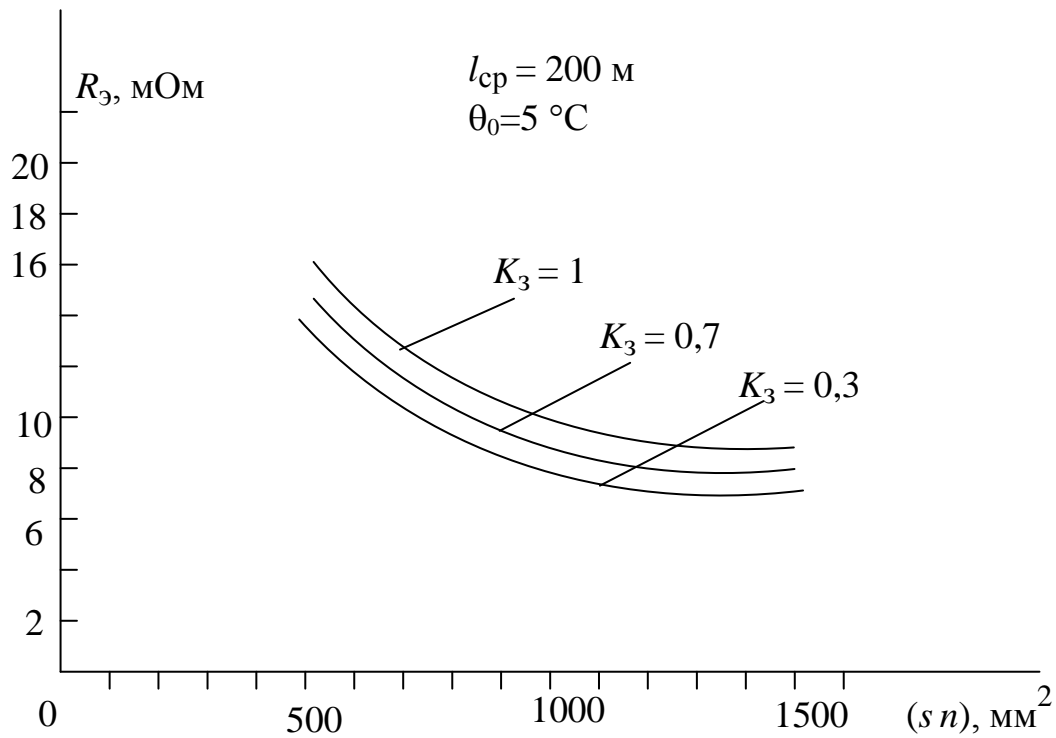


Рис. П.В.5. Номограммы эквивалентного сопротивления для средней длины линий 200 м и температуры окружающей среды 5 °С

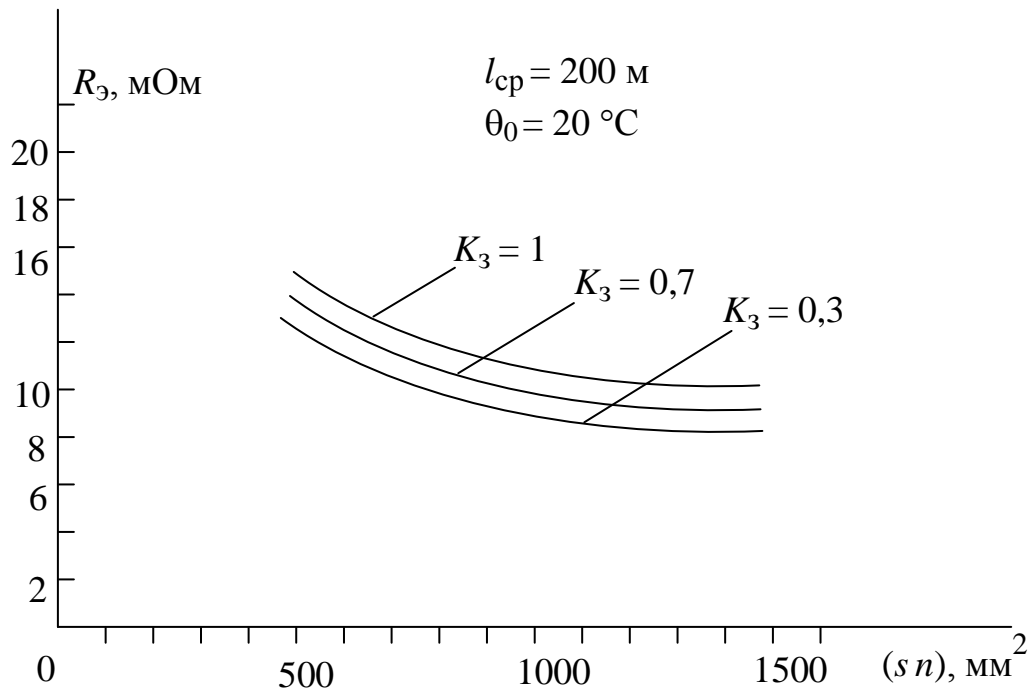


Рис. П.В.6. Номограммы эквивалентного сопротивления для средней длины линий 200 м и температуры окружающей среды 20 °С

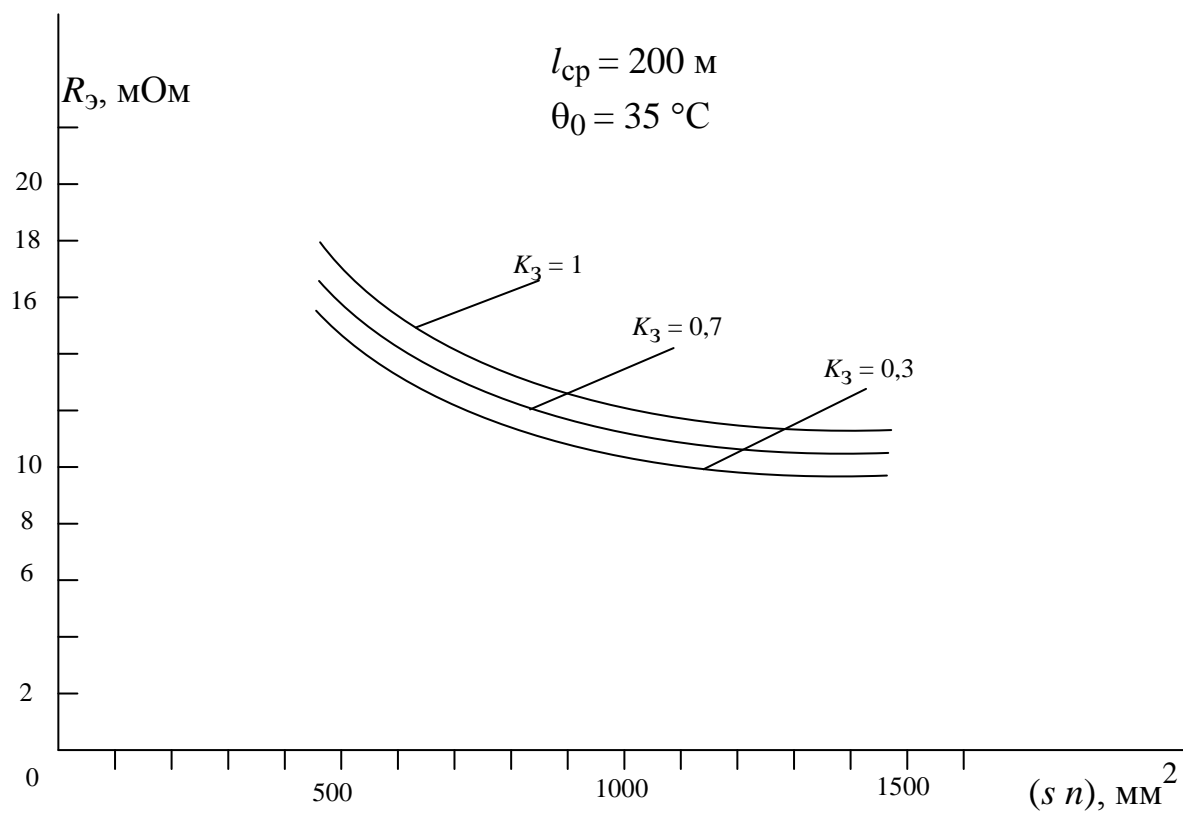


Рис. П.В.7. Номограммы эквивалентного сопротивления для средней длины линий 200 м и температуры окружающей среды 35 °С

Номограммы определения эквивалентного сопротивления цеховых магистральных сетей

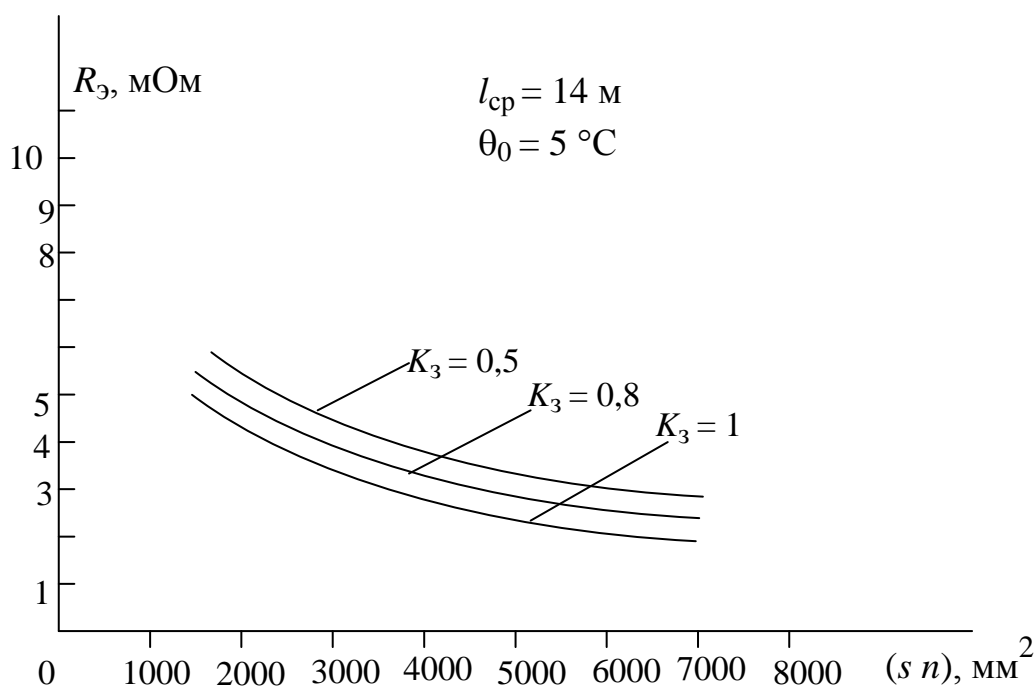


Рис. П.В.8. Номограммы эквивалентного сопротивления для шинпровода длиной 14 м и температуры окружающей среды 5 °C

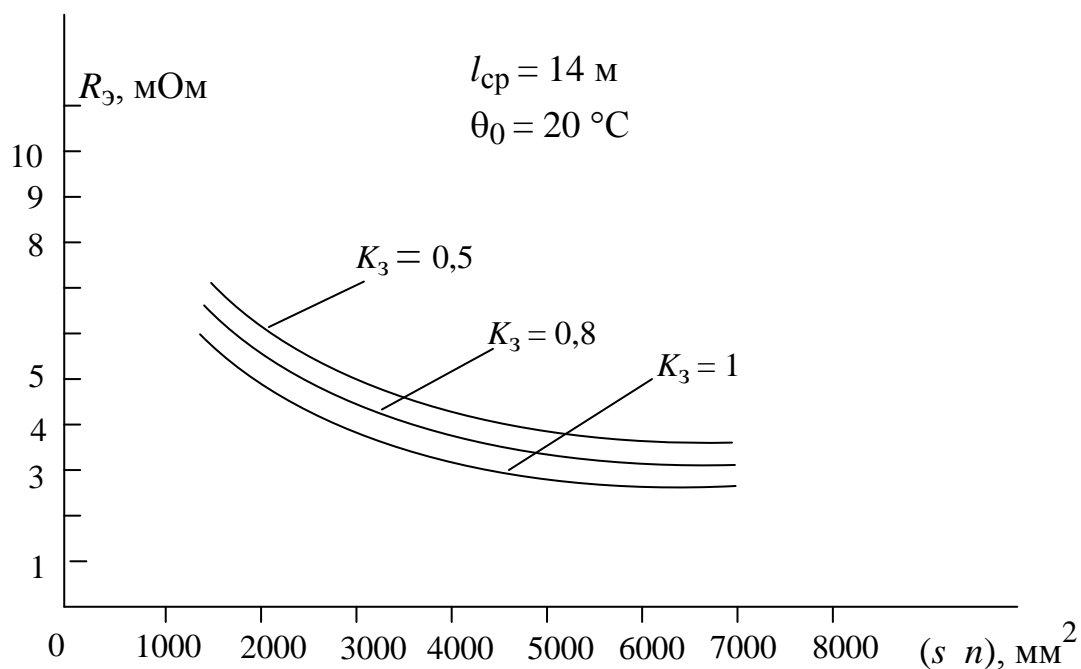


Рис. П.В.9. Номограммы эквивалентного сопротивления для шинпровода длиной 14 м и температуры окружающей среды 20 °C

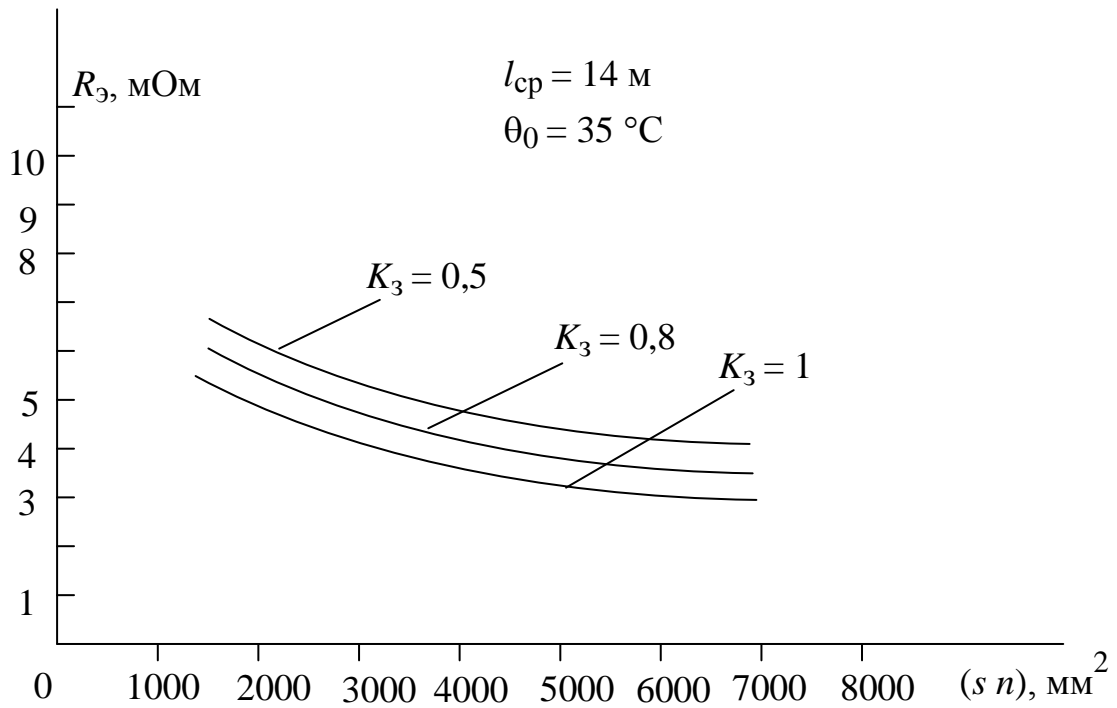


Рис. П.В.10. Номограммы эквивалентного сопротивления для шинпровода длиной 14 м и температуры окружающей среды 35 °С

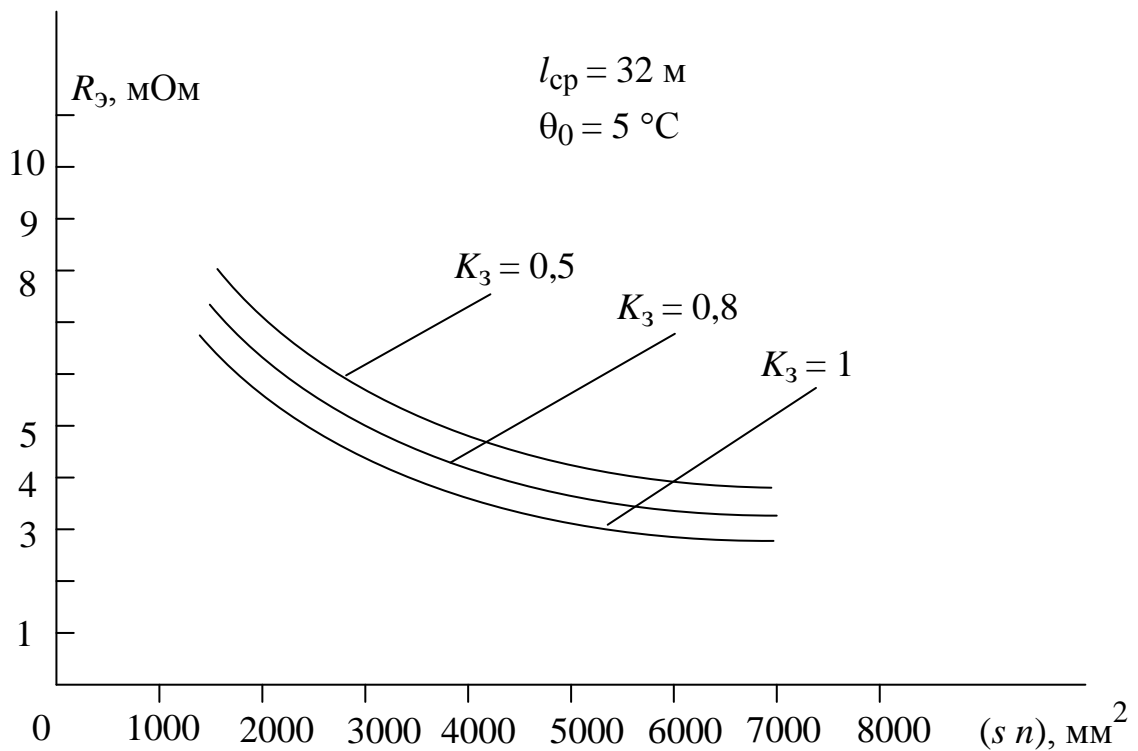


Рис. П.В.11. Номограммы эквивалентного сопротивления для шинпровода длиной 32 м и температуры окружающей среды 5 °С

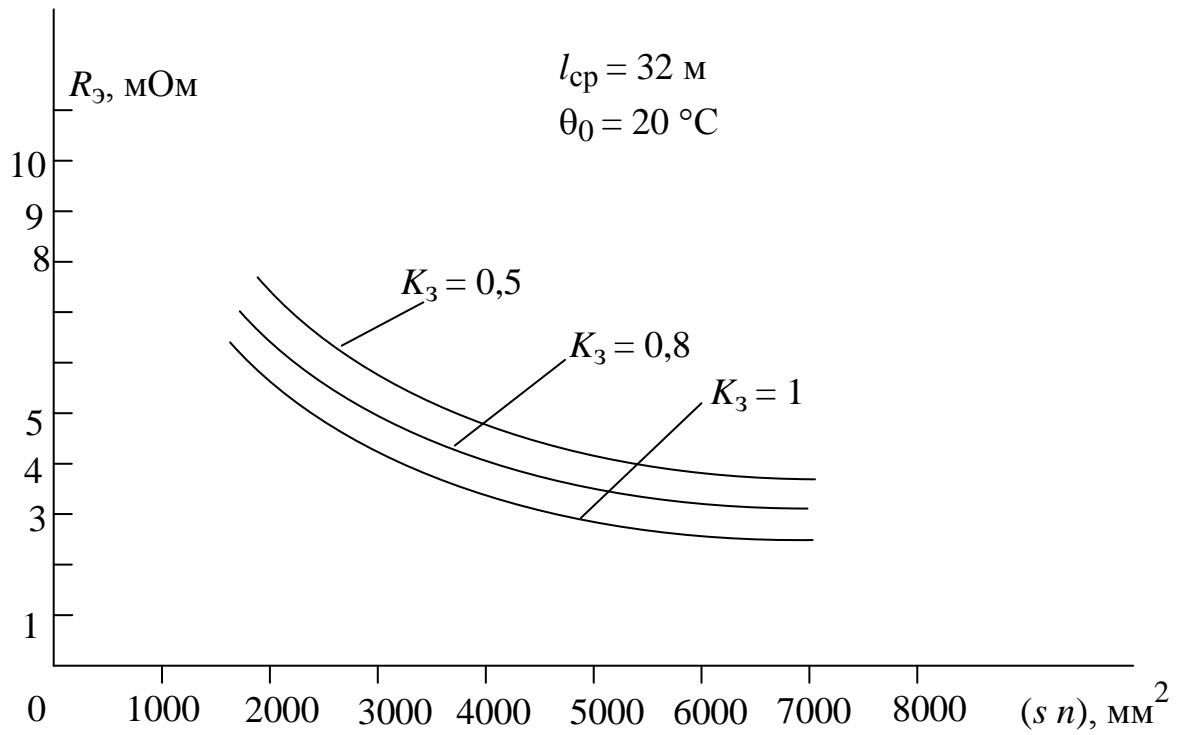


Рис. П.В.12. Номограммы эквивалентного сопротивления для шинпровода длиной 32 м и температуры окружающей среды 20 °С

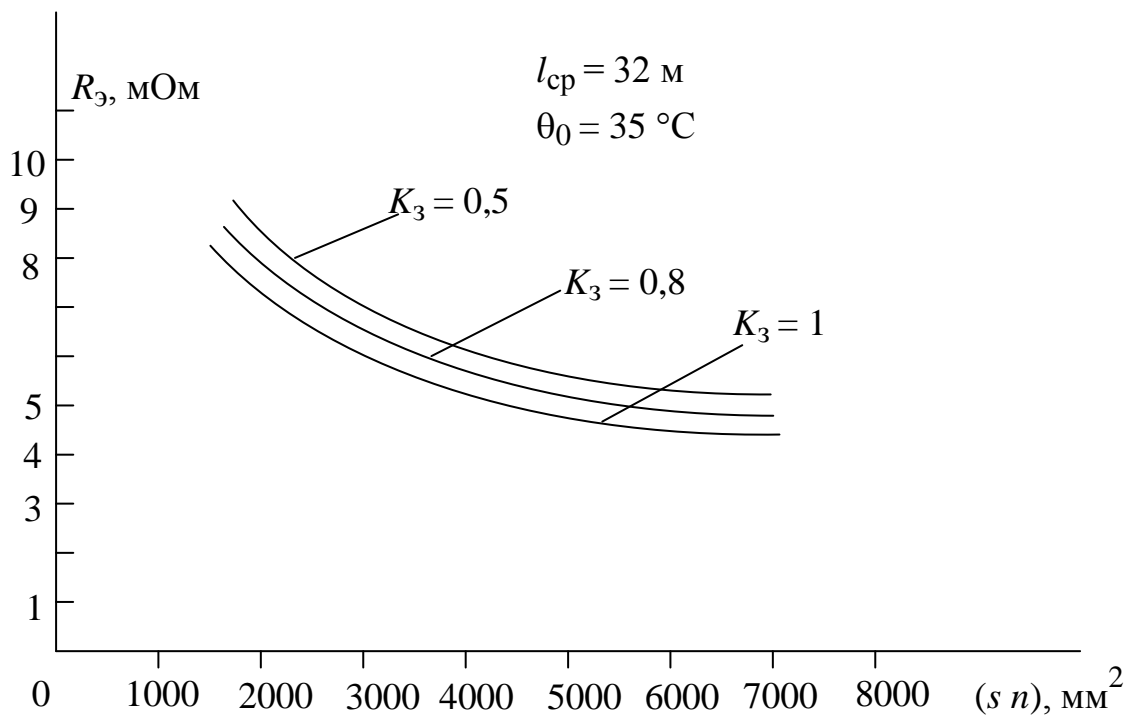


Рис. П.В.13. Номограммы эквивалентного сопротивления для шинпровода длиной 32 м и температуры окружающей среды 35 °С

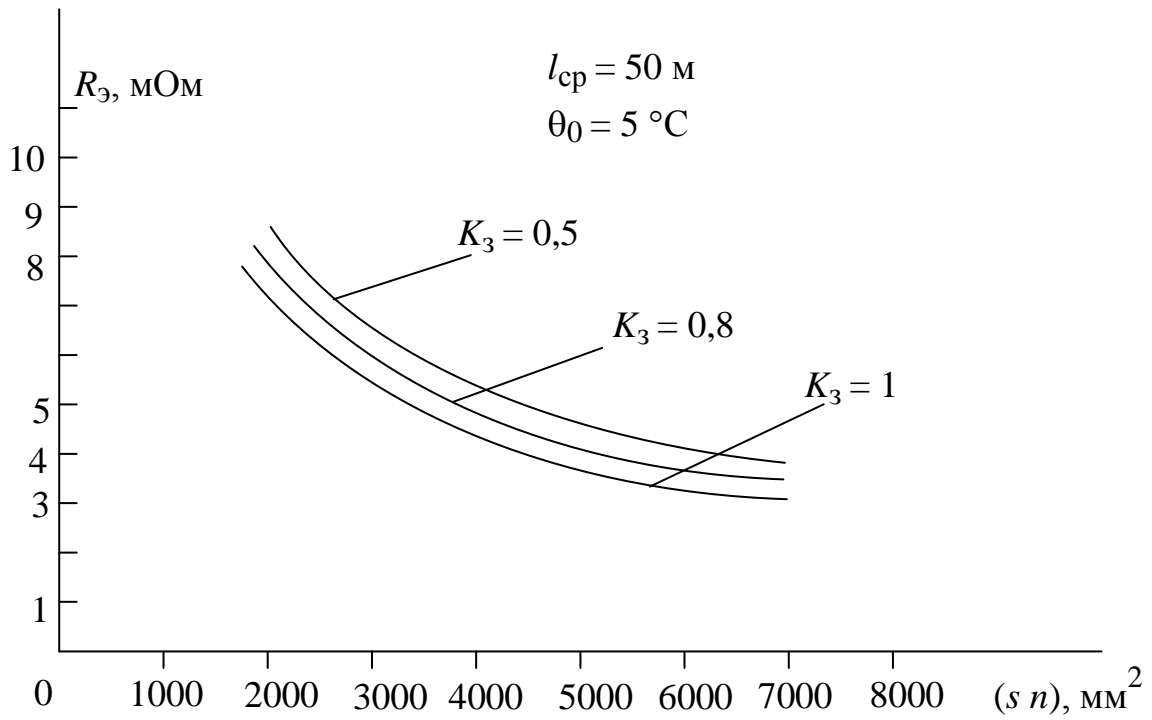


Рис. П.В.14. Номограммы эквивалентного сопротивления для шинпровода длиной 50 м и температуры окружающей среды 5 °С

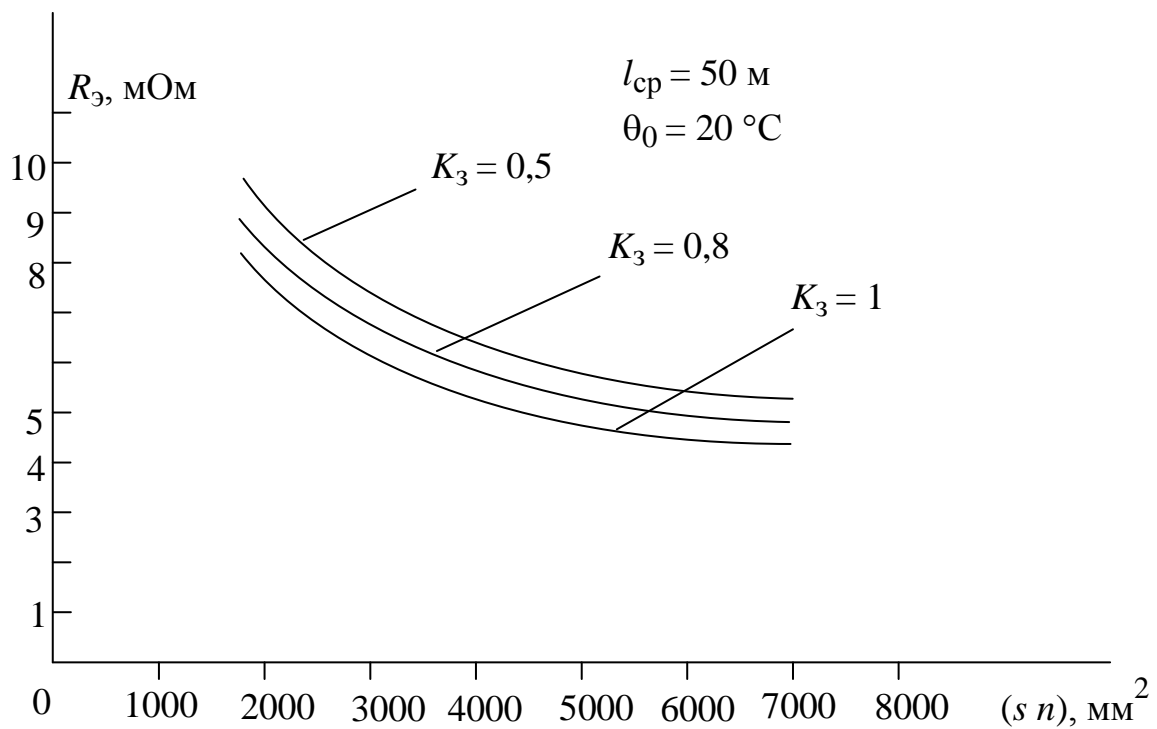


Рис. П.В.15. Номограммы эквивалентного сопротивления для шинпровода длиной 50 м и температуры окружающей среды 20 °С

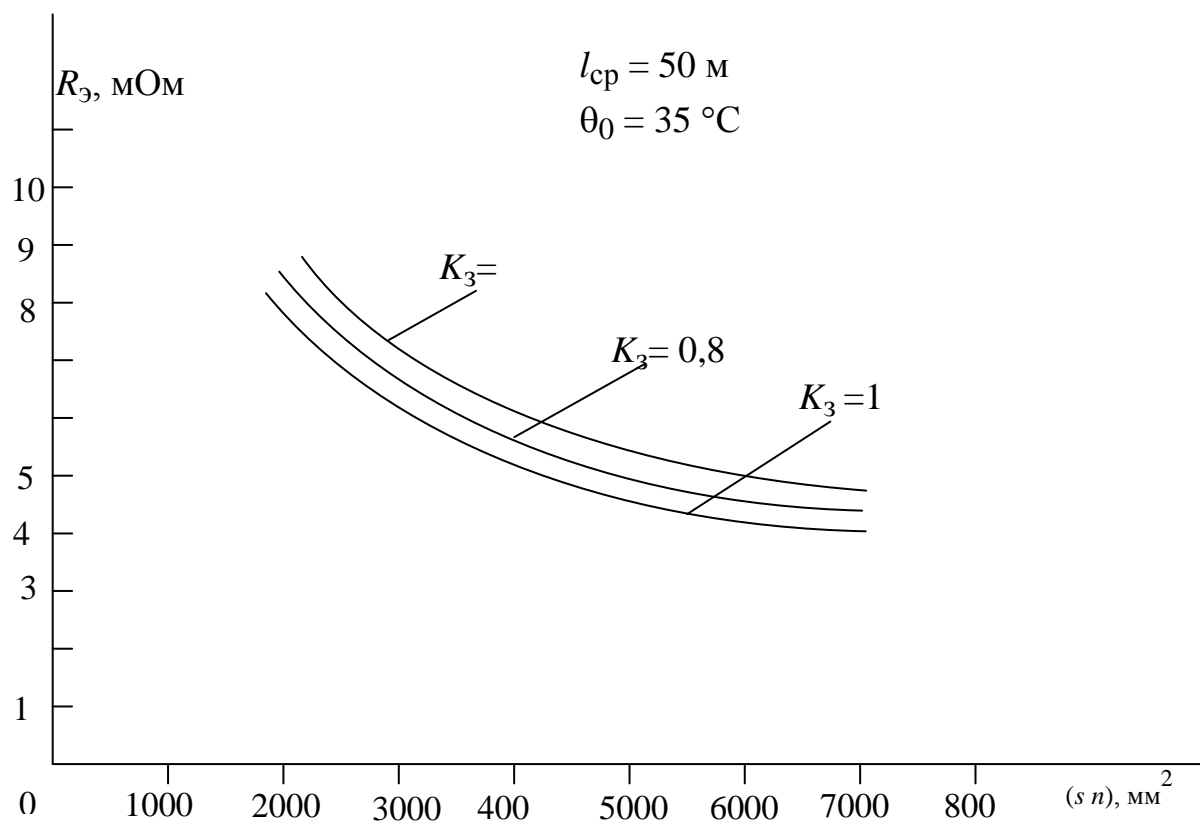


Рис. П.В.16. Номограммы эквивалентного сопротивления для шинопровода длиной 50 м и температуры окружающей среды 35 °С

Матрица $\Phi(x)$

	x0	x1	x2	x3	x4	x5	x1x2	x1x3	x1x4	x1x5	x2x3	x2x4	x2x5	x3x4	x3x5	x4x5
$\Phi(x)=$	1	-1,1	-1,8	-2,4	-1,1	-1,3	2	2,64	1,21	1,43	4,32	1,98	2,3	2,64	3,1	1,4
	1	-0,89	-1,6	-2,17	-0,86	-1,1	1,4	1,92	0,76	1	3,38	1,34	1,8	1,86	2,4	1
	1	-0,67	-1,3	-1,93	-0,62	-1	0,9	1,3	0,42	0,64	2,55	0,82	1,3	1,2	1,8	0,6
	1	-0,46	-1,1	-1,7	-0,38	-0,8	0,5	0,78	0,17	0,36	1,84	0,41	0,8	0,65	1,3	0,3
	1	-0,25	-0,8	-1,47	-0,14	-0,6	0,2	0,36	0,03	0,15	1,23	0,12	0,5	0,21	0,9	0,1
	1	-0,03	-0,6	-1,23	0,1	-0,4	0	0,04	-0	0,01	0,74	-0,1	0,3	-0,1	0,5	-0
	1	0,18	-0,4	-1	0,34	-0,3	-0,1	-0,2	0,06	-0	0,36	-0,1	0,1	-0,3	0,3	-0,1
	1	0,39	-0,1	-0,77	0,58	-0,1	-0	-0,3	0,23	-0	0,09	-0,1	0	-0,4	0,1	-0,1
	1	0,61	0,12	-0,53	0,82	0,1	0,1	-0,3	0,5	0,05	-0,1	0,1	0	-0,4	-0	0,1
	1	0,82	0,36	-0,3	1,06	0,3	0,3	-0,2	0,87	0,21	-0,1	0,38	0,1	-0,3	-0,1	0,3
	1	1,03	0,6	-0,07	1,3	0,4	0,6	-0,1	1,34	0,45	-0	0,78	0,3	-0,1	-0	0,6
	1	1,25	0,84	0,17	1,54	0,6	1	0,21	1,92	0,76	0,14	1,29	0,5	0,26	0,1	0,9
	1	1,46	1,08	0,4	1,78	0,8	1,6	0,58	2,6	1,14	0,43	1,92	0,8	0,71	0,3	1,4
	1	1,67	1,32	0,63	2,02	1	2,2	1,06	3,38	1,6	0,84	2,67	1,3	1,28	0,6	1,9
	1	1,89	1,56	0,87	2,26	1,1	2,9	1,64	4,26	2,13	1,35	3,53	1,8	1,96	1	2,5
	1	2,1	1,8	1,1	2,5	1,3	3,8	2,31	5,25	2,73	1,98	4,5	2,3	2,75	1,4	3,3

Матрица $\Phi^T(x)$

	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
$\Phi^T(x) =$	-1,1	-0,89	-0,7	-0,46	-0,25	-0	0,2	0,39	0,61	0,8	1,0	1,25	1,5	1,67	1,9	2,1
	-1,8	-1,56	-1,3	-1,08	-0,84	-0,6	-0,4	-0,1	0,12	0,36	0,6	0,84	1,1	1,32	1,6	1,8
	-2,4	-2,17	-1,9	-1,7	-1,47	-1,2	-1	-0,8	-0,53	-0,3	-0,1	0,17	0,4	0,63	0,9	1,1
	-1,1	-0,86	-0,6	-0,38	-0,14	0,1	0,3	0,58	0,82	1,06	1,3	1,54	1,8	2,02	2,3	2,5
	-1,3	-1,13	-1	-0,78	-0,61	-0,4	-0,3	-0,1	0,09	0,26	0,4	0,61	0,8	0,95	1,1	1,3
	1,98	1,38	0,89	0,5	0,21	0	-0,1	-0	0,07	0,3	0,6	1,05	1,6	2,21	2,9	3,8
	2,64	1,92	1,3	0,78	0,36	0	-0,2	-0,3	-0,3	-0,2	-0,1	0,21	0,6	1,06	1,6	2,3
	1,21	0,76	0,42	0,17	0,03	-0	0,1	0,23	0,5	0,87	1,3	1,92	2,6	3,38	4,3	5,3
	1,43	1	0,64	0,36	0,15	0	-0	-0	0,05	0,21	0,4	0,76	1,1	1,6	2,1	2,7
	4,32	3,38	2,55	1,84	1,23	0,7	0,4	0,09	-0,06	-0,1	-0	0,14	0,4	0,84	1,4	2
	1,98	1,34	0,82	0,41	0,12	-0,1	-0,1	-0,1	0,1	0,38	0,7	1,29	1,9	2,67	3,5	4,5
	2,34	1,76	1,26	0,84	0,51	0,3	0,1	0,01	0,01	0,09	0,2	0,51	0,8	1,26	1,8	2,3
	2,64	1,86	1,2	0,65	0,21	-0,1	-0,3	-0,4	-0,44	-0,3	-0,1	0,26	0,7	1,28	2	2,8
	3,12	2,44	1,84	1,33	0,89	0,5	0,3	0,07	-0,05	-0,1	-0	0,1	0,3	0,6	1	1,4
	1,43	0,97	0,59	0,3	0,08	-0	-0,1	-0,1	0,07	0,28	0,5	0,93	1,4	1,93	2,5	3,3

Вычисление информационной матрицы $F(\varepsilon) = \Phi^T(x) \cdot \Phi(x) = F(\varepsilon) =$

	16	8	-0	-10,4	11,2	0	17	11,7	23	12,6	19	19,6	14	11,8	14	14
	8	19,5	17,4	11,7	23	13	17	4,27	31	12,6	-1,8	22	7,1	6,41	-1,3	16
	-0	17,4	19,6	19	19,6	14	9,8	-1,8	22	7,07	-13	13,7	0	0,6	-9,2	9,9
	-10,4	11,7	19	25,3	11,8	14	-1,8	-9,4	6,41	-1,3	-25	0,6	-9,2	-7,1	-18	0,4
	11,2	23	19,6	11,8	27,4	14	22	6,41	38,1	15,9	0,6	27,4	9,9	8,83	0,4	20
	0	12,6	14,1	13,8	14,1	10	7,1	-1,3	15,9	5,11	-9,2	9,9	0	0,43	-6,6	7,2
	17,4	17,4	9,79	-1,8	22	7,1	39	26,4	51	28	30,7	45	28	29,5	22	33
=	11,7	4,27	-1,8	-9,37	6,41	-1,3	26	22,9	29,4	19,1	31	29,5	22	24,5	22	21
	23	31	22	6,41	38,1	16	51	29,4	72,7	36,8	29,5	60,4	33	34	21	44
	12,6	12,6	7,07	-1,3	15,9	5,1	28	19,1	36,8	20,2	22,2	32,5	20	21,3	16	23
	19	-1,8	-13	-24,8	0,6	-9,2	31	31	29,5	22,2	48,8	32,8	30	31,5	35	24
	19,6	22	13,7	0,6	27,4	9,9	45	29,5	60,4	32,5	32,8	52,5	31	33,2	24	38
	14,1	7,07	0	-9,19	9,9	0	28	22,2	32,5	19,9	30,1	31	22	23,7	22	22
	11,8	6,41	0,6	-7,06	8,83	0,4	29	24,5	34	21,3	31,5	33,2	24	26,6	23	24
	13,8	-1,3	-9,2	-17,9	0,43	-6,6	22	22,4	21,3	16	35,3	23,7	22	22,8	25	17
	14,1	15,9	9,9	0,43	19,8	7,2	33	21,3	43,6	23,5	23,7	37,9	22	24	17	27

Тогда ковариационная матрица $C(\varepsilon) = [F(\varepsilon)]^{-1} =$

-1E+13	-5E+12	-5E+12	6E+13	-8E+13	-1E+13	4E+13	-8E+13	-4E+13	-1E+13	5E+13	9E+13	-6E+13	1,7E+13	6,2E+13	3E+13
-3E+14	8E+14	-1E+14	-9E+13	1E+14	-4E+14	-2E+14	5E+14	8E+13	-8E+14	-2E+14	-4E+14	4E+14	-2E+14	2,6E+14	2E+14
-6E+13	5E+13	-5E+13	2E+14	2E+13	-2E+14	3E+13	4E+13	-5E+13	-2E+14	-1E+13	-5E+13	1E+14	-4E+13	6,8E+13	1E+14
-2E+14	4E+14	9E+13	-2E+14	4E+13	-2E+14	-1E+14	3E+14	6E+13	-3E+14	-3E+13	-3E+14	2E+13	-5E+13	3,5E+14	2E+14
4E+14	-8E+14	9E+13	6E+13	-2E+13	4E+14	1E+14	-4E+14	-3E+13	8E+14	1E+14	3E+14	-2E+14	9,4E+13	-4E+14	-3E+14
2E+14	-5E+14	-2E+13	7E+13	-1E+14	4E+14	1E+14	-5E+14	-1E+14	6E+14	2E+14	5E+14	-3E+14	3,7E+13	-3E+14	-2E+14
-9E+13	2E+14	4E+13	-1E+14	-6E+13	-2E+14	-1E+14	9E+13	7E+13	-9E+13	-7E+12	-6E+13	5E+13	7E+13	1,5E+14	-8E+13
-1E+14	1E+14	-1E+14	8E+13	1E+14	-1E+14	2E+13	8E+13	-2E+12	-2E+14	-1E+14	-7E+13	1E+14	-1E+14	2,2E+14	2E+14
-2E+13	2E+13	-1E+13	-8E+13	2E+13	-1E+13	4E+12	2E+12	1E+13	3E+13	-3E+13	-2E+13	-2E+13	7,3E+13	2E+13	-6E+13
5E+14	-6E+14	2E+14	1E+14	-3E+14	5E+14	4E+14	-4E+14	-1E+14	8E+14	1E+14	3E+14	-4E+14	1,1E+14	-8E+14	-3E+14
3E+14	-3E+14	1E+14	1E+14	-1E+14	3E+14	9E+13	-2E+14	-1E+14	3E+14	1E+14	2E+14	-1E+14	3E+13	-4E+14	-9E+13
4E+13	-4E+12	3E+13	-1E+13	-7E+13	5E+13	1E+12	-8E+11	4E+12	7E+12	4E+13	-1E+13	-3E+13	5,4E+13	1,6E+13	-8E+13
-2E+14	1E+14	-1E+14	9E+13	2E+14	-2E+14	-6E+13	1E+14	2E+12	-2E+14	-2E+12	-9E+13	2E+14	-2E+14	1,4E+14	2E+14
1E+13	4E+13	4E+12	-2E+13	-5E+13	5E+12	6E+13	-5E+13	3E+13	-9E+13	-8E+12	2E+13	-1E+13	2,5E+12	-2E+13	3E+13
-1E+14	7E+13	-8E+13	-6E+13	1E+14	-8E+13	-2E+14	2E+14	6E+13	-2E+14	-1E+14	-1E+14	1E+14	-7E+13	2,7E+14	2E+14
-2E+14	3E+14	-4E+13	-9E+13	1E+14	-2E+14	-2E+14	1E+14	4E+13	-2E+14	-2E+13	-2E+14	1E+14	-1E+13	3,9E+14	1E+14

Вычисление матрицы $\Gamma(x) \Gamma(x) = \Phi(x)C(\varepsilon)\Phi^T(x) =$

-0,4	-0,15	0,09	0,26	0,34	0,3	0,3	0,13	-0,1	-0,4	-0,8	-1,3	-1,8	-2,4	-3,1	-3,9
3,73	2,93	2,24	1,66	1,18	0,8	0,5	0,39	0,33	0,38	0,54	0,8	1,2	1,63	2,2	2,9
-0,8	-0,57	-0,3	-0,15	-0,0	0	0,1	0,01	-0,0	-0,2	-0,4	-0,7	-1	-1,4	-1,8	-2,3
0,29	0,33	0,35	0,35	0,34	0,3	0,2	0,17	0,08	-0	-0,2	-0,3	-0,5	-0,7	-0,9	-1,1
-0,3	-0,14	0,05	0,18	0,26	0,3	0,3	0,18	0,05	-0,1	-0,4	-0,7	-1	-1,4	-1,8	-2,3
-0,2	-0,03	0,1	0,19	0,24	0,3	0,2	0,16	0,06	-0,1	-0,3	-0,5	-0,8	-1,1	-1,4	-1,8
-0,6	-0,39	-0,1	0,04	0,17	0,2	0,2	0,19	0,08	-0,1	-0,3	-0,6	-0,9	-1,4	-1,8	-2,3
-0,6	-0,37	-0,1	0,05	0,16	0,2	0,2	0,15	0,02	-0,2	-0,4	-0,7	-1,1	-1,5	-2	-2,5
-0,7	-0,48	-0,2	-0,07	0,05	0,1	0,1	0,08	-0,0	-0,2	-0,4	-0,7	-1	-1,4	-1,8	-2,3
-0,8	-0,58	-0,3	-0,16	-0,0	0	0,1	0,02	-0,0	-0,2	-0,4	-0,7	-1	-1,4	-1,9	-2,4
-0,9	-0,65	-0,4	-0,23	-0,1	-0	0	-0	-0,1	-0,2	-0,4	-0,7	-1	-1,3	-1,7	-2,2
-0,9	-0,68	-0,4	-0,25	-0,1	-0	-0	-0	-0,1	-0,3	-0,4	-0,7	-1	-1,4	-1,8	-2,2
-1,1	-0,85	-0,6	-0,45	-0,3	-0,	-0,	-0,1	-0,0	-0,1	-0,2	-0,3	-0,4	-0,6	-0,8	-1,1
0,11	-0,02	-0,1	-0,22	-0,2	-0,	-0,	-0,3	-0,3	-0,3	-0,2	-0,1	0	0,18	0,3	0,5
0,19	0,03	-0,1	-0,21	-0,2	-0,	-0,	-0,4	-0,4	-0,4	-0,4	-0,3	-0,2	-0,1	0	0,2
-0,5	-0,69	-0,8	-0,89	-0,9	-0,	-0,	-0,8	-0,6	-0,5	-0,2	0,02	0,3	0,66	1	1,5

Вычисление $\tilde{\rho}^2(x, z) \tilde{\rho}^2(x, z) = \Delta x_i^T \Gamma(x) \Delta x_i =$

$$= \begin{vmatrix} 0 & 0,21 & 0,24 & 0,23 & 0,24 & 0,17 & 1,3 & 1 & 2,64 & 0,69 & 1,75 & 1,9 & 0,66 & 1,2 & 0,91 & 1 \end{vmatrix} \times$$

$$\times \begin{vmatrix} -0,4 & -0,15 & 0,09 & 0,26 & 0,34 & 0,3 & 0,3 & 0,13 & -0,1 & -0,4 & -0,8 & -1,3 & -1,8 & -2,4 & -3,1 & -3,9 & 0 \\ 3,73 & 2,93 & 2,24 & 1,66 & 1,18 & 0,8 & 0,5 & 0,39 & 0,33 & 0,38 & 0,54 & 0,8 & 1,2 & 1,63 & 2,2 & 2,9 & 0,21 \\ -0,8 & -0,57 & -0,3 & -0,15 & -0,0 & 0 & 0,1 & 0,01 & -0,0 & -0,2 & -0,4 & -0,7 & -1 & -1,4 & -1,8 & -2,3 & 0,24 \\ 0,29 & 0,33 & 0,35 & 0,35 & 0,34 & 0,3 & 0,2 & 0,17 & 0,08 & -0 & -0,2 & -0,3 & -0,5 & -0,7 & -0,9 & -1,1 & 0,23 \\ -0,3 & -0,14 & 0,05 & 0,18 & 0,26 & 0,3 & 0,3 & 0,18 & 0,05 & -0,1 & -0,4 & -0,7 & -1 & -1,4 & -1,8 & -2,3 & 0,24 \\ -0,2 & -0,03 & 0,1 & 0,19 & 0,24 & 0,3 & 0,2 & 0,16 & 0,06 & -0,1 & -0,3 & -0,5 & -0,8 & -1,1 & -1,4 & -1,8 & 0,17 \\ -0,6 & -0,39 & -0,1 & 0,04 & 0,17 & 0,2 & 0,2 & 0,19 & 0,08 & -0,1 & -0,3 & -0,6 & -0,9 & -1,4 & -1,8 & -2,3 & 1,32 \\ -0,6 & -0,37 & -0,1 & 0,05 & 0,16 & 0,2 & 0,2 & 0,15 & 0,02 & -0,2 & -0,4 & -0,7 & -1,1 & -1,5 & -2 & -2,5 & 0,95 \\ -0,7 & -0,48 & -0,2 & -0,07 & 0,05 & 0,1 & 0,1 & 0,08 & -0,0 & -0,2 & -0,4 & -0,7 & -1 & -1,4 & -1,8 & -2,3 & 2,64 \\ -0,8 & -0,58 & -0,3 & -0,16 & -0,0 & 0 & 0,1 & 0,02 & -0,0 & -0,2 & -0,4 & -0,7 & -1 & -1,4 & -1,9 & -2,4 & 0,69 \\ -0,9 & -0,65 & -0,4 & -0,23 & -0,1 & -0 & 0 & -0 & -0,1 & -0,2 & -0,4 & -0,7 & -1 & -1,3 & -1,7 & -2,2 & 1,75 \\ -0,9 & -0,68 & -0,4 & -0,25 & -0,1 & -0 & -0 & -0 & -0,1 & -0,3 & -0,4 & -0,7 & -1 & -1,4 & -1,8 & -2,2 & 1,9 \\ -1,1 & -0,85 & -0,6 & -0,45 & -0,3 & -0, & -0, & -0,1 & -0,0 & -0,1 & -0,2 & -0,3 & -0,4 & -0,6 & -0,8 & -1,1 & 0,66 \\ 0,11 & -0,02 & -0,1 & -0,22 & -0,2 & -0, & -0, & -0,3 & -0,3 & -0,3 & -0,2 & -0,1 & 0 & 0,18 & 0,3 & 0,5 & 1,2 \\ 0,19 & 0,03 & -0,1 & -0,21 & -0,2 & -0, & -0, & -0,4 & -0,4 & -0,4 & -0,4 & -0,3 & -0,2 & -0,1 & 0 & 0,2 & 0,91 \\ -0,5 & -0,69 & -0,8 & -0,89 & -0,9 & -0, & -0, & -0,8 & -0,6 & -0,5 & -0,2 & 0,02 & 0,3 & 0,66 & 1 & 1,5 & 0,99 \end{vmatrix} \times = 70,8$$

Значение R_3 при изменении фактора X_1

	X0	X1	X2	X3	X4	X5	X1X2	X1X3	X1X4	x1x5	X2X3	X2X4	X2X5	X3X4	x3x5	x4x5	R_3	$\hat{y}(x) - \hat{y}(z)$
1	1	-1,1	-1,8	-2,4	-1,1	-1,3	1,98	2,64	1,21	1,43	4,32	1,98	2,34	2,64	3,12	1,43	6,96	
2	1	-0,89	-1,8	-2,4	-1,1	-1,3	1,6	2,13	0,975	1,15	4,32	1,98	2,34	2,64	3,12	1,43	9,89	8,6
3	1	-0,67	-1,8	-2,4	-1,1	-1,3	1,21	1,62	0,741	0,88	4,32	1,98	2,34	2,64	3,12	1,43	12,8	34,4
4	1	-0,46	-1,8	-2,4	-1,1	-1,3	0,83	1,1	0,506	0,6	4,32	1,98	2,34	2,64	3,12	1,43	15,8	77,4
5	1	-0,25	-1,8	-2,4	-1,1	-1,3	0,44	0,59	0,271	0,32	4,32	1,98	2,34	2,64	3,12	1,43	18,7	138
6	1	-0,03	-1,8	-2,4	-1,1	-1,3	0,06	0,08	0,037	0,04	4,32	1,98	2,34	2,64	3,12	1,43	21,6	215
7	1	0,18	-1,8	-2,4	-1,1	-1,3	-0,32	-0,4	-0,2	-0,2	4,32	1,98	2,34	2,64	3,12	1,43	24,6	309
8	1	0,39	-1,8	-2,4	-1,1	-1,3	-0,71	-0,9	-0,43	-0,5	4,32	1,98	2,34	2,64	3,12	1,43	27,5	421
9	1	0,61	-1,8	-2,4	-1,1	-1,3	-1,09	-1,5	-0,67	-0,8	4,32	1,98	2,34	2,64	3,12	1,43	30,4	550
10	1	0,82	-1,8	-2,4	-1,1	-1,3	-1,48	-2	-0,9	-1,1	4,32	1,98	2,34	2,64	3,12	1,43	33,3	696
11	1	1,03	-1,8	-2,4	-1,1	-1,3	-1,86	-2,5	-1,14	-1,3	4,32	1,98	2,34	2,64	3,12	1,43	36,3	860
12	1	1,25	-1,8	-2,4	-1,1	-1,3	-2,24	-3	-1,37	-1,6	4,32	1,98	2,34	2,64	3,12	1,43	39,2	1040
13	1	1,46	-1,8	-2,4	-1,1	-1,3	-2,63	-3,5	-1,61	-1,9	4,32	1,98	2,34	2,64	3,12	1,43	42,1	1238
14	1	1,67	-1,8	-2,4	-1,1	-1,3	-3,01	-4	-1,84	-2,2	4,32	1,98	2,34	2,64	3,12	1,43	45,1	1453
15	1	1,89	-1,8	-2,4	-1,1	-1,3	-3,4	-4,5	-2,08	-2,5	4,32	1,98	2,34	2,64	3,12	1,43	48	1685
16	1	2,1	-1,8	-2,4	-1,1	-1,3	-3,78	-5	-2,31	-2,7	4,32	1,98	2,34	2,64	3,12	1,43	50,9	1934

Значение R_3 при изменении фактора X_2

	X0	X1	X2	X3	X4	X5	X1X2	X1X3	X1X4	x1x5	X2X3	X2X4	X2X5	X3X4	x3x5	x4x5	R_3	$\hat{y}(x) - \hat{y}(z)$
1	1	-1,1	-1,8	-2,4	-1,1	-1,3	1,98	2,64	1,21	1,43	4,32	1,98	2,34	2,64	3,12	1,43	6,96	
2	1	-1,1	-1,56	-2,4	-1,1	-1,3	1,72	2,64	1,21	1,43	3,74	1,72	2,028	2,64	3,12	1,43	6,26	0,5
3	1	-1,1	-1,32	-2,4	-1,1	-1,3	1,45	2,64	1,21	1,43	3,17	1,45	1,716	2,64	3,12	1,43	5,55	1,98
4	1	-1,1	-1,08	-2,4	-1,1	-1,3	1,19	2,64	1,21	1,43	2,59	1,19	1,404	2,64	3,12	1,43	4,85	4,46
5	1	-1,1	-0,84	-2,4	-1,1	-1,3	0,92	2,64	1,21	1,43	2,02	0,92	1,092	2,64	3,12	1,43	4,14	7,93
6	1	-1,1	-0,6	-2,4	-1,1	-1,3	0,66	2,64	1,21	1,43	1,44	0,66	0,78	2,64	3,12	1,43	3,44	12,4
7	1	-1,1	-0,36	-2,4	-1,1	-1,3	0,4	2,64	1,21	1,43	0,86	0,4	0,468	2,64	3,12	1,43	2,74	17,8
8	1	-1,1	-0,12	-2,4	-1,1	-1,3	0,13	2,64	1,21	1,43	0,29	0,13	0,156	2,64	3,12	1,43	2,03	24,3
9	1	-1,1	0,12	-2,4	-1,1	-1,3	-0,13	2,64	1,21	1,43	-0,3	-0,13	-0,16	2,64	3,12	1,43	1,33	31,7
10	1	-1,1	0,36	-2,4	-1,1	-1,3	-0,4	2,64	1,21	1,43	-0,9	-0,4	-0,47	2,64	3,12	1,43	0,63	40,1
11	1	-1,1	0,6	-2,4	-1,1	-1,3	-0,66	2,64	1,21	1,43	-1,4	-0,66	-0,78	2,64	3,12	1,43	-0,1	49,5
12	1	-1,1	0,84	-2,4	-1,1	-1,3	-0,92	2,64	1,21	1,43	-2	-0,92	-1,09	2,64	3,12	1,43	-0,8	59,9
13	1	-1,1	1,08	-2,4	-1,1	-1,3	-1,19	2,64	1,21	1,43	-2,6	-1,19	-1,4	2,64	3,12	1,43	-1,5	71,3
14	1	-1,1	1,32	-2,4	-1,1	-1,3	-1,45	2,64	1,21	1,43	-3,2	-1,45	-1,72	2,64	3,12	1,43	-2,2	83,7
15	1	-1,1	1,56	-2,4	-1,1	-1,3	-1,72	2,64	1,21	1,43	-3,7	-1,72	-2,03	2,64	3,12	1,43	-2,9	97,1
16	1	-1,1	1,8	-2,4	-1,1	-1,3	-1,98	2,64	1,21	1,43	-4,3	-1,98	-2,34	2,64	3,12	1,43	-3,6	111

Значение R_3 при изменении фактора X_3

	X0	X1	X2	X3	X4	X5	X1X2	X1X3	X1X4	x1x5	X2X3	X2X4	X2X5	X3X4	x3x5	x4x5	R_3	$\hat{y}(x) - \hat{y}(z)$
1	1	-1,1	-1,8	-2,4	-1,1	-1,3	1,98	2,64	1,21	1,43	4,32	1,98	2,34	2,64	3,12	1,43	6,96	
2	1	-1,1	-1,8	-2,2	-1,1	-1,3	1,98	2,38	1,21	1,43	3,9	1,98	2,34	2,383	2,817	1,43	6,46	0,25
3	1	-1,1	-1,8	-1,9	-1,1	-1,3	1,98	2,13	1,21	1,43	3,48	1,98	2,34	2,127	2,513	1,43	5,96	1
4	1	-1,1	-1,8	-1,7	-1,1	-1,3	1,98	1,87	1,21	1,43	3,06	1,98	2,34	1,87	2,21	1,43	5,46	2,24
5	1	-1,1	-1,8	-1,5	-1,1	-1,3	1,98	1,61	1,21	1,43	2,64	1,98	2,34	1,613	1,907	1,43	4,96	3,98
6	1	-1,1	-1,8	-1,2	-1,1	-1,3	1,98	1,36	1,21	1,43	2,22	1,98	2,34	1,357	1,603	1,43	4,47	6,22
7	1	-1,1	-1,8	-1	-1,1	-1,3	1,98	1,1	1,21	1,43	1,8	1,98	2,34	1,1	1,3	1,43	3,97	8,96
8	1	-1,1	-1,8	-0,8	-1,1	-1,3	1,98	0,84	1,21	1,43	1,38	1,98	2,34	0,843	0,997	1,43	3,47	12,2
9	1	-1,1	-1,8	-0,5	-1,1	-1,3	1,98	0,59	1,21	1,43	0,96	1,98	2,34	0,587	0,693	1,43	2,97	15,9
10	1	-1,1	-1,8	-0,3	-1,1	-1,3	1,98	0,33	1,21	1,43	0,54	1,98	2,34	0,33	0,39	1,43	2,47	20,2
11	1	-1,1	-1,8	-0,1	-1,1	-1,3	1,98	0,07	1,21	1,43	0,12	1,98	2,34	0,073	0,087	1,43	1,97	24,9
12	1	-1,1	-1,8	0,17	-1,1	-1,3	1,98	-0,2	1,21	1,43	-0,3	1,98	2,34	-0,18	-0,22	1,43	1,47	30,1
13	1	-1,1	-1,8	0,4	-1,1	-1,3	1,98	-0,4	1,21	1,43	-0,7	1,98	2,34	-0,44	-0,52	1,43	0,97	35,8
14	1	-1,1	-1,8	0,63	-1,1	-1,3	1,98	-0,7	1,21	1,43	-1,1	1,98	2,34	-0,7	-0,82	1,43	0,48	42
15	1	-1,1	-1,8	0,87	-1,1	-1,3	1,98	-1	1,21	1,43	-1,6	1,98	2,34	-0,95	-1,13	1,43	-0	48,8
16	1	-1,1	-1,8	1,1	-1,1	-1,3	1,98	-1,2	1,21	1,43	-2	1,98	2,34	-1,21	-1,43	1,43	-0,5	56

Значение R_3 при изменении фактора X_4

	X0	X1	X2	X3	X4	X5	X1X2	X1X3	X1X4	x1x5	X2X3	X2X4	X2X5	X3X4	x3x5	x4x5	R_3	$\hat{y}(x) - \hat{y}(z)$
1	1	-1,1	-1,8	-2,4	-1,1	-1,3	1,98	2,64	1,21	1,43	4,32	1,98	2,34	2,64	3,12	1,43	6,96	
2	1	-1,1	-1,8	-2,4	-0,8	-1,3	1,98	2,64	0,946	1,43	4,32	1,55	2,34	2,064	3,12	1,118	7,02	0
3	1	-1,1	-1,8	-2,4	-0,6	-1,3	1,98	2,64	0,682	1,43	4,32	1,12	2,34	1,488	3,12	0,806	7,07	0,01
4	1	-1,1	-1,8	-2,4	-0,3	-1,3	1,98	2,64	0,418	1,43	4,32	0,68	2,34	0,912	3,12	0,494	7,13	0,03
5	1	-1,1	-1,8	-2,4	-0,1	-1,3	1,98	2,64	0,154	1,43	4,32	0,25	2,34	0,336	3,12	0,182	7,19	0,05
6	1	-1,1	-1,8	-2,4	0,1	-1,3	1,98	2,64	-0,11	1,43	4,32	-0,18	2,34	-0,24	3,12	-0,13	7,25	0,08
7	1	-1,1	-1,8	-2,4	0,34	-1,3	1,98	2,64	-0,37	1,43	4,32	-0,61	2,34	-0,82	3,12	-0,44	7,3	0,12
8	1	-1,1	-1,8	-2,4	0,58	-1,3	1,98	2,64	-0,64	1,43	4,32	-1,04	2,34	-1,39	3,12	-0,75	7,36	0,16
9	1	-1,1	-1,8	-2,4	0,82	-1,3	1,98	2,64	-0,9	1,43	4,32	-1,48	2,34	-1,97	3,12	-1,07	7,42	0,21
10	1	-1,1	-1,8	-2,4	1,06	-1,3	1,98	2,64	-1,17	1,43	4,32	-1,91	2,34	-2,54	3,12	-1,38	7,48	0,27
11	1	-1,1	-1,8	-2,4	1,3	-1,3	1,98	2,64	-1,43	1,43	4,32	-2,34	2,34	-3,12	3,12	-1,69	7,54	0,33
12	1	-1,1	-1,8	-2,4	1,54	-1,3	1,98	2,64	-1,69	1,43	4,32	-2,77	2,34	-3,7	3,12	-2	7,59	0,4
13	1	-1,1	-1,8	-2,4	1,78	-1,3	1,98	2,64	-1,96	1,43	4,32	-3,2	2,34	-4,27	3,12	-2,31	7,65	0,48
14	1	-1,1	-1,8	-2,4	2,02	-1,3	1,98	2,64	-2,22	1,43	4,32	-3,64	2,34	-4,85	3,12	-2,63	7,71	0,56
15	1	-1,1	-1,8	-2,4	2,26	-1,3	1,98	2,64	-2,49	1,43	4,32	-4,07	2,34	-5,42	3,12	-2,94	7,77	0,65
16	1	-1,1	-1,8	-2,4	2,5	-1,3	1,98	2,64	-2,75	1,43	4,32	-4,5	2,34	-6	3,12	-3,25	7,82	0,74

Значение R_5 при изменении фактора X_5

	X0	X1	X2	X3	X4	X5	X1X2	X1X3	X1X4	x1x5	X2X3	X2X4	X2X5	X3X4	x3x5	x4x5	R_5	$\hat{y}(x) - \hat{y}(z)$
1	1	-1,1	-1,8	-2,4	-1,3	-1,3	1,98	2,64	1,43	1,43	4,32	2,34	2,34	3,12	3,12	1,69	6,91	
2	1	-1,1	-1,8	-2,4	-1,3	-1,1	1,98	2,64	1,43	1,24	4,32	2,34	2,028	3,12	2,704	1,465	6,74	0,03
3	1	-1,1	-1,8	-2,4	-1,3	-0,9	1,98	2,64	1,43	1,05	4,32	2,34	1,716	3,12	2,288	1,239	6,56	0,12
4	1	-1,1	-1,8	-2,4	-1,3	-0,7	1,98	2,64	1,43	0,86	4,32	2,34	1,404	3,12	1,872	1,014	6,39	0,28
5	1	-1,1	-1,8	-2,4	-1,3	-0,6	1,98	2,64	1,43	0,67	4,32	2,34	1,092	3,12	1,456	0,789	6,21	0,49
6	1	-1,1	-1,8	-2,4	-1,3	-0,4	1,98	2,64	1,43	0,48	4,32	2,34	0,78	3,12	1,04	0,563	6,04	0,77
7	1	-1,1	-1,8	-2,4	-1,3	-0,2	1,98	2,64	1,43	0,29	4,32	2,34	0,468	3,12	0,624	0,338	5,86	1,1
8	1	-1,1	-1,8	-2,4	-1,3	-0,1	1,98	2,64	1,43	0,1	4,32	2,34	0,156	3,12	0,208	0,113	5,69	1,5
9	1	-1,1	-1,8	-2,4	-1,3	0,09	1,98	2,64	1,43	-0,1	4,32	2,34	-0,16	3,12	-0,21	-0,11	5,51	1,96
10	1	-1,1	-1,8	-2,4	-1,3	0,26	1,98	2,64	1,43	-0,3	4,32	2,34	-0,47	3,12	-0,62	-0,34	5,34	2,48
11	1	-1,1	-1,8	-2,4	-1,3	0,43	1,98	2,64	1,43	-0,5	4,32	2,34	-0,78	3,12	-1,04	-0,56	5,16	3,07
12	1	-1,1	-1,8	-2,4	-1,3	0,61	1,98	2,64	1,43	-0,7	4,32	2,34	-1,09	3,12	-1,46	-0,79	4,99	3,71
13	1	-1,1	-1,8	-2,4	-1,3	0,78	1,98	2,64	1,43	-0,9	4,32	2,34	-1,4	3,12	-1,87	-1,01	4,81	4,42
14	1	-1,1	-1,8	-2,4	-1,3	0,95	1,98	2,64	1,43	-1	4,32	2,34	-1,72	3,12	-2,29	-1,24	4,64	5,18
15	1	-1,1	-1,8	-2,4	-1,3	1,13	1,98	2,64	1,43	-1,2	4,32	2,34	-2,03	3,12	-2,7	-1,46	4,46	6,01
16	1	-1,1	-1,8	-2,4	-1,3	1,3	1,98	2,64	1,43	-1,4	4,32	2,34	-2,34	3,12	-3,12	-1,69	4,28	6,9


```

% номера
n from 1 to 16
% матрица фактора x0
X0 = p';
r = [-1.1 -0.89 -0.67 -0.46 -0.25 -0.03 0.18 0.39
0.61 0.82 1.03 1.25 1.46 1.67 1.89 2.1 ];
% матрица фактора x1
X1 = r';
t = [-1,8 -1,8 -1,8 -1,8 -1,8 -1,8 -1,8 -1,8 -1,8
-1,8 -1,8 -1,8 -1,8 -1,8 -1,8 -1,8 ];
% матрица фактора x2
X2=t';
y = [-2.4 -2.4 -2.4 -2.4 -2.4 -2.4 -2.4 -2.4 -2.4
-2.4 -2.4 -2.4 -2.4 -2.4 -2.4 -2.4 ];
% матрица фактора x3
X3 = y';
u = [-1.1 -1.1 -1.1 -1.1 -1.1 -1.1 -1.1 -1.1 -1.1
-1.1 -1.1 -1.1 -1.1 -1.1 -1.1 -1.1 ];
% матрица фактора x4
X4 = u';
o = [-1.3 -1.3 -1.3 -1.3 -1.3 -1.3 -1.3 -1.3 -1.3
-1.3 -1.3 -1.3 -1.3 -1.3 -1.3 -1.3];
% матрица фактора x5
X5 = o';
for i = 1 to 16 step 1
% эквивалентное сопротивление
re = 5.4+4.2*x1-1.7*x2-3.9*x3+0.53*x4+0.23*x5-
1.3*x1*x2-3.19*x1*x3+0.44*x1*x4+1.22*x2*x3-
0.24*x2*x4-0.4*x3*x4+0.95*x4*x5
% условие для эквивалентного сопротивления
deltax=0.21;
x11 = x1+deltax
re2 = 5.4+4.2*x11-1.7*x2-3.9*x3+0.53*x4+0.23*x5-
1.3*x1*x2-3.19*x1*x3+0.44*x1*x4+1.22*x2*x3-
0.24*x2*x4-0.4*x3*x4+0.95*x4*x5
(re-re2)^2
df = [x0 x1 x2 x3 x4 x5 x1.*x2 x1.*x3 x1.*x4
x1.*x5 x2.*x3 x2.*x4 x2.*x5 x3.*x4 x3.*x5 x4.*x5
re (re-re2)^2]

```

```

% матрица фактора x0
X0 = p';
r = [-1.1 -1.1 -1.1 -1.1 -1.1 -1.1 -1.1 -1.1 -1.1
-1.1 -1.1 -1.1 -1.1 -1.1 -1.1 -1.1];
% матрица фактора x1
X1 = r';
t = [-1.8 -1.6 -1.3 -1.1 -0.8 -0.6 -0.4 -0.1 0.12
0.36 0.6 0.84 1.08 1.32 1.56 1.8];
% матрица фактора x2
X2 = t';
y = [-2.4 -2.4 -2.4 -2.4 -2.4 -2.4 -2.4 -2.4 -2.4
-2.4 -2.4 -2.4 -2.4 -2.4 -2.4 -2.4];
% матрица фактора x3
X3 = y';
u = [-1.1 -1.1 -1.1 -1.1 -1.1 -1.1 -1.1 -1.1 -1.1
-1.1 -1.1 -1.1 -1.1 -1.1 -1.1 -1.1];
% матрица фактора x4
X4 = u';
o = [-1.3 -1.3 -1.3 -1.3 -1.3 -1.3 -1.3 -1.3 -1.3
-1.3 -1.3 -1.3 -1.3 -1.3 -1.3 -1.3];
% матрица фактора x5
X5 = o';
for i = 1 to 16 step 1
% эквивалентное сопротивление
re = 5.4+4.2*x1-1.7*x2-3.9*x3+0.53*x4+0.23*x5-
1.3*x1*x2-3.19*x1*x3+0.44*x1*x4+1.22*x2*x3-
0.24*x2*x4-0.4*x3*x4+0.95*x4*x5
% условие для эквивалентного сопротивления
deltax = 0.21;
x21 = x2+deltax
re2 = 5.4+4.2*x1-1.7*x21-3.9*x3+0.53*x4+0.23*x5-
1.3*x1*x2-3.19*x1*x3+0.44*x1*x4+1.22*x2*x3-
0.24*x2*x4-0.4*x3*x4+0.95*x4*x5
(re-re2)^2
df = [x0 x1 x2 x3 x4 x5 x1.*x2 x1.*x3 x1.*x4
x1.*x5 x2.*x3 x2.*x4 x2.*x5 x3.*x4 x3.*x5 x4.*x5
re (re-re2)^2]

```

```

% матрица фактора x0
X0=p';
r=[-1.1 -1.1 -1.1 -1.1 -1.1 -1.1 -1.1 -1.1 -1.1
-1.1 -1.1 -1.1 -1.1 -1.1 -1.1 -1.1];
% матрица фактора x1
X1 = r';
t=[-1,8 -1,8 -1,8 -1,8 -1,8 -1,8 -1,8 -1,8
-1,8 -1,8 -1,8 -1,8 -1,8 -1,8 -1,8];
% матрица фактора x2
X2 = t';
y=[-2.4 -2.17 -1.93 -1.7 -1.47 -1.23 -1 -0.77 -0.53
-0.3 -0.07 0.17 0.4 0.63 0.87 1.1];
% матрица фактора x3
X3 = y';
u=[-1.1 -1.1 -1.1 -1.1 -1.1 -1.1 -1.1 -1.1 -1.1
-1.1 -1.1 -1.1 -1.1 -1.1 -1.1 -1.1];
% матрица фактора x4
X4 = u';
o=[-1.3 -1.3 -1.3 -1.3 -1.3 -1.3 -1.3 -1.3 -1.3
-1.3 -1.3 -1.3 -1.3 -1.3 -1.3 -1.3];
% матрица фактора x5
X5 = o';
for i = 1 to 16 step 1
% эквивалентное сопротивление
re = 5.4+4.2*x1-1.7*x2-3.9*x3+0.53*x4+0.23*x5-
1.3*x1*x2-3.19*x1*x3+0.44*x1*x4+1.22*x2*x3-
0.24*x2*x4-0.4*x3*x4+0.95*x4*x5
% условие для эквивалентного сопротивления
deltax = 0.21;
x31 = x3+deltax
re2=5.4+4.2*x1-1.7*x2-3.9*x31+0.53*x4+0.23*x5-
1.3*x1*x2-3.19*x1*x3+0.44*x1*x4+1.22*x2*x3-
0.24*x2*x4-0.4*x3*x4+0.95*x4*x5
(re-re2)^2
df = [x0 x1 x2 x3 x4 x5 x1.*x2 x1.*x3 x1.*x4
x1.*x5 x2.*x3 x2.*x4 x2.*x5 x3.*x4 x3.*x5 x4*x5
re (re-re2)^2]

```

```

% матрица фактора x0
X0=p';
r=[-1.1 -1.1 -1.1 -1.1 -1.1 -1.1 -1.1 -1.1 -1.1
-1.1 -1.1 -1.1 -1.1 -1.1 -1.1 -1.1];
% матрица фактора x1
X1 = r';
t=[-1,8 -1,8 -1,8 -1,8 -1,8 -1,8 -1,8 -1,8 -1,8
-1,8 -1,8 -1,8 -1,8 -1,8 -1,8 -1,8];
% матрица фактора x2
X2 = t';
y=[-2.4 -2.4 -2.4 -2.4 -2.4 -2.4 -2.4 -2.4 -2.4
-2.4 -2.4 -2.4 -2.4 -2.4 -2.4 -2.4];
% матрица фактора x3
X3 = y';
u=[-1.1 -0.86 -0.62 -0.38 -0.14 0.1 0.34 0.58 0.82
1.06 1.3 1.54 1.78 2.02 2.26 2.5];
% матрица фактора x4
X4 = u';
o=[-1.3 -1.3 -1.3 -1.3 -1.3 -1.3 -1.3 -1.3 -1.3
-1.3 -1.3 -1.3 -1.3 -1.3 -1.3 -1.3];
% матрица фактора x5
X5 = o';
for i = 1 to 16 step 1
% эквивалентное сопротивление
re = 5.4+4.2*x1-1.7*x2-3.9*x3+0.53*x4+0.23*x5-
1.3*x1*x2-3.19*x1*x3+0.44*x1*x4+1.22*x2*x3-
0.24*x2*x4-0.4*x3*x4+0.95*x4*x5
% условие для эквивалентного сопротивления
deltax = 0.21;
x41 = x4+deltax
re2=5.4+4.2*x1-1.7*x2-3.9*x3+0.53*x41+0.23*x5-
1.3*x1*x2-3.19*x1*x3+0.44*x1*x4+1.22*x2*x3-
0.24*x2*x4-0.4*x3*x4+0.95*x4*x5
(re-re2)^2
df = [x0 x1 x2 x3 x4 x5 x1.*x2 x1.*x3 x1.*x4
x1.*x5 x2.*x3 x2.*x4 x2.*x5 x3.*x4 x3.*x5 x4*x5
re (re-re2)^2]

```

```

% матрица фактора x0
X0=p';
r=[-1.1 -1.1 -1.1 -1.1 -1.1 -1.1 -1.1 -1.1 -1.1
-1.1 -1.1 -1.1 -1.1 -1.1 -1.1 -1.1];
% матрица фактора x1
X1 = r';
t=[-1,8 -1,8 -1,8 -1,8 -1,8 -1,8 -1,8 -1,8 -1,8
-1,8 -1,8 -1,8 -1,8 -1,8 -1,8 -1,8];
% матрица фактора x2
X2 = t';
y=[-2.4 -2.4 -2.4 -2.4 -2.4 -2.4 -2.4 -2.4 -2.4
-2.4 -2.4 -2.4 -2.4 -2.4 -2.4 -2.4];
% матрица фактора x3
X3 = y';
u=[-1.1 -1.1 -1.1 -1.1 -1.1 -1.1 -1.1 -1.1 -1.1
-1.1 -1.1 -1.1 -1.1 -1.1 -1.1 -1.1];
% матрица фактора x4
X4 = u';
o=[-1.3 -1.1 -1 -0.8 -0.6 -0.4 -0.3 -0.1 0.1
0.3 0.6 1 1.6 2.2 2.9 3.8];
% матрица фактора x5
X5 = o';
for i = 1 to 16 step 1
% эквивалентное сопротивление
re = 5.4+4.2*x1-1.7*x2-3.9*x3+0.53*x4+0.23*x5-
1.3*x1*x2-3.19*x1*x3+0.44*x1*x4+1.22*x2*x3-
0.24*x2*x4-0.4*x3*x4+0.95*x4*x5
% условие для эквивалентного сопротивления
deltax = 0.21;
x51 = x5+deltax
re2=5.4+4.2*x11-1.7*x2-3.9*x3+0.53*x4+0.23*x51-
1.3*x1*x2-3.19*x1*x3+0.44*x1*x4+1.22*x2*x3-
0.24*x2*x4-0.4*x3*x4+0.95*x4*x5
(re-re2)^2
df=[x0 x1 x2 x3 x4 x5 x1.*x2 x1.*x3 x1.*x4
x1.*x5 x2.*x3 x2.*x4 x2.*x5 x3.*x4 x3.*x5 x4.*x5
re (re-re2)^2]

```

1	1	-1,1	-1,8	-2,4	-1,1	-1,3	1,98	2,64	1,21	1,43	4,32	1,98	2,34	2,64	3,12	1,43	6,96	
2	1	-0,89	-1,8	-2,4	-1,1	-1,3	1,6	2,13	0,975	1,15	4,32	1,98	2,34	2,64	3,12	1,43	9,89	8,6
3	1	-0,67	-1,8	-2,4	-1,1	-1,3	1,21	1,62	0,741	0,88	4,32	1,98	2,34	2,64	3,12	1,43	12,8	34,4
4	1	-0,46	-1,8	-2,4	-1,1	-1,3	0,83	1,1	0,506	0,6	4,32	1,98	2,34	2,64	3,12	1,43	15,8	77,4
5	1	-0,25	-1,8	-2,4	-1,1	-1,3	0,44	0,59	0,271	0,32	4,32	1,98	2,34	2,64	3,12	1,43	18,7	138
6	1	-0,03	-1,8	-2,4	-1,1	-1,3	0,06	0,08	0,037	0,04	4,32	1,98	2,34	2,64	3,12	1,43	21,6	215
7	1	0,18	-1,8	-2,4	-1,1	-1,3	-0,32	-0,4	-0,2	-0,2	4,32	1,98	2,34	2,64	3,12	1,43	24,6	309
8	1	0,39	-1,8	-2,4	-1,1	-1,3	-0,71	-0,9	-0,43	-0,5	4,32	1,98	2,34	2,64	3,12	1,43	27,5	421
9	1	0,61	-1,8	-2,4	-1,1	-1,3	-1,09	-1,5	-0,67	-0,8	4,32	1,98	2,34	2,64	3,12	1,43	30,4	550
10	1	0,82	-1,8	-2,4	-1,1	-1,3	-1,48	-2	-0,9	-1,1	4,32	1,98	2,34	2,64	3,12	1,43	33,3	696
11	1	1,03	-1,8	-2,4	-1,1	-1,3	-1,86	-2,5	-1,14	-1,3	4,32	1,98	2,34	2,64	3,12	1,43	36,3	860
12	1	1,25	-1,8	-2,4	-1,1	-1,3	-2,24	-3	-1,37	-1,6	4,32	1,98	2,34	2,64	3,12	1,43	39,2	1040
13	1	1,46	-1,8	-2,4	-1,1	-1,3	-2,63	-3,5	-1,61	-1,9	4,32	1,98	2,34	2,64	3,12	1,43	42,1	1238
14	1	1,67	-1,8	-2,4	-1,1	-1,3	-3,01	-4	-1,84	-2,2	4,32	1,98	2,34	2,64	3,12	1,43	45,1	1453
15	1	1,89	-1,8	-2,4	-1,1	-1,3	-3,4	-4,5	-2,08	-2,5	4,32	1,98	2,34	2,64	3,12	1,43	48	1685
16	1	2,1	-1,8	-2,4	-1,1	-1,3	-3,78	-5	-2,31	-2,7	4,32	1,98	2,34	2,64	3,12	1,43	50,9	1934

1	1	-1,1	-1,8	-2,4	-1,1	-1,3	1,98	2,64	1,21	1,43	4,32	1,98	2,34	2,64	3,12	1,43	6,96	
2	1	-1,1	-1,56	-2,4	-1,1	-1,3	1,72	2,64	1,21	1,43	3,74	1,72	2,028	2,64	3,12	1,43	6,26	0,5
3	1	-1,1	-1,32	-2,4	-1,1	-1,3	1,45	2,64	1,21	1,43	3,17	1,45	1,716	2,64	3,12	1,43	5,55	1,98
4	1	-1,1	-1,08	-2,4	-1,1	-1,3	1,19	2,64	1,21	1,43	2,59	1,19	1,404	2,64	3,12	1,43	4,85	4,46
5	1	-1,1	-0,84	-2,4	-1,1	-1,3	0,92	2,64	1,21	1,43	2,02	0,92	1,092	2,64	3,12	1,43	4,14	7,93
6	1	-1,1	-0,6	-2,4	-1,1	-1,3	0,66	2,64	1,21	1,43	1,44	0,66	0,78	2,64	3,12	1,43	3,44	12,4
7	1	-1,1	-0,36	-2,4	-1,1	-1,3	0,4	2,64	1,21	1,43	0,86	0,4	0,468	2,64	3,12	1,43	2,74	17,8
8	1	-1,1	-0,12	-2,4	-1,1	-1,3	0,13	2,64	1,21	1,43	0,29	0,13	0,156	2,64	3,12	1,43	2,03	24,3
9	1	-1,1	0,12	-2,4	-1,1	-1,3	-0,13	2,64	1,21	1,43	-0,3	-0,13	0,16	2,64	3,12	1,43	1,33	31,7
10	1	-1,1	0,36	-2,4	-1,1	-1,3	-0,4	2,64	1,21	1,43	-0,9	-0,4	-0,47	2,64	3,12	1,43	0,63	40,1
11	1	-1,1	0,6	-2,4	-1,1	-1,3	-0,66	2,64	1,21	1,43	-1,4	-0,66	-0,78	2,64	3,12	1,43	-0,1	49,5
12	1	-1,1	0,84	-2,4	-1,1	-1,3	-0,92	2,64	1,21	1,43	-2	-0,92	-1,09	2,64	3,12	1,43	-0,8	59,9
13	1	-1,1	1,08	-2,4	-1,1	-1,3	-1,19	2,64	1,21	1,43	-2,6	-1,19	-1,4	2,64	3,12	1,43	-1,5	71,3
14	1	-1,1	1,32	-2,4	-1,1	-1,3	-1,45	2,64	1,21	1,43	-3,2	-1,45	-1,72	2,64	3,12	1,43	-2,2	83,7
15	1	-1,1	1,56	-2,4	-1,1	-1,3	-1,72	2,64	1,21	1,43	-3,7	-1,72	-2,03	2,64	3,12	1,43	-2,9	97,1
16	1	-1,1	1,8	-2,4	-1,1	-1,3	-1,98	2,64	1,21	1,43	-4,3	-1,98	-2,34	2,64	3,12	1,43	-3,6	111

1	1	-1,1	-1,8	-2,4	-1,1	-1,3	1,98	2,64	1,21	1,43	4,32	1,98	2,34	2,64	3,12	1,43	6,96	
2	1	-1,1	-1,8	-2,2	-1,1	-1,3	1,98	2,38	1,21	1,43	3,9	1,98	2,34	2,383	2,817	1,43	6,46	0,25
3	1	-1,1	-1,8	-1,9	-1,1	-1,3	1,98	2,13	1,21	1,43	3,48	1,98	2,34	2,127	2,513	1,43	5,96	1
4	1	-1,1	-1,8	-1,7	-1,1	-1,3	1,98	1,87	1,21	1,43	3,06	1,98	2,34	1,87	2,21	1,43	5,46	2,24
5	1	-1,1	-1,8	-1,5	-1,1	-1,3	1,98	1,61	1,21	1,43	2,64	1,98	2,34	1,613	1,907	1,43	4,96	3,98
6	1	-1,1	-1,8	-1,2	-1,1	-1,3	1,98	1,36	1,21	1,43	2,22	1,98	2,34	1,357	1,603	1,43	4,47	6,22
7	1	-1,1	-1,8	-1	-1,1	-1,3	1,98	1,1	1,21	1,43	1,8	1,98	2,34	1,1	1,3	1,43	3,97	8,96
8	1	-1,1	-1,8	-0,8	-1,1	-1,3	1,98	0,84	1,21	1,43	1,38	1,98	2,34	0,843	0,997	1,43	3,47	12,2
9	1	-1,1	-1,8	-0,5	-1,1	-1,3	1,98	0,59	1,21	1,43	0,96	1,98	2,34	0,587	0,693	1,43	2,97	15,9
10	1	-1,1	-1,8	-0,3	-1,1	-1,3	1,98	0,33	1,21	1,43	0,54	1,98	2,34	0,33	0,39	1,43	2,47	20,2
11	1	-1,1	-1,8	-0,1	-1,1	-1,3	1,98	0,07	1,21	1,43	0,12	1,98	2,34	0,073	0,087	1,43	1,97	24,9
12	1	-1,1	-1,8	0,17	-1,1	-1,3	1,98	-0,2	1,21	1,43	-0,3	1,98	2,34	-0,18	-0,22	1,43	1,47	30,1
13	1	-1,1	-1,8	0,4	-1,1	-1,3	1,98	-0,4	1,21	1,43	-0,7	1,98	2,34	-0,44	-0,52	1,43	0,97	35,8
14	1	-1,1	-1,8	0,63	-1,1	-1,3	1,98	-0,7	1,21	1,43	-1,1	1,98	2,34	-0,7	-0,82	1,43	0,48	42
15	1	-1,1	-1,8	0,87	-1,1	-1,3	1,98	-1	1,21	1,43	-1,6	1,98	2,34	-0,95	-1,13	1,43	-0	48,8
16	1	-1,1	-1,8	1,1	-1,1	-1,3	1,98	-1,2	1,21	1,43	-2	1,98	2,34	-1,21	-1,43	1,43	-0,5	56

1	1	-1,1	-1,8	-2,4	-1,1	-1,3	1,98	2,64	1,21	1,43	4,32	1,98	2,34	2,64	3,12	1,43	6,96	
2	1	-1,1	-1,8	-2,4	-0,8	-1,3	1,98	2,64	0,946	1,43	4,32	1,55	2,34	2,064	3,12	1,118	7,02	0
3	1	-1,1	-1,8	-2,4	-0,6	-1,3	1,98	2,64	0,682	1,43	4,32	1,12	2,34	1,488	3,12	0,806	7,07	0,01
4	1	-1,1	-1,8	-2,4	-0,3	-1,3	1,98	2,64	0,418	1,43	4,32	0,68	2,34	0,912	3,12	0,494	7,13	0,03
5	1	-1,1	-1,8	-2,4	-0,1	-1,3	1,98	2,64	0,154	1,43	4,32	0,25	2,34	0,336	3,12	0,182	7,19	0,05
6	1	-1,1	-1,8	-2,4	0,1	-1,3	1,98	2,64	-0,11	1,43	4,32	-0,18	2,34	-0,24	3,12	-0,13	7,25	0,08
7	1	-1,1	-1,8	-2,4	0,34	-1,3	1,98	2,64	-0,37	1,43	4,32	-0,61	2,34	-0,82	3,12	-0,44	7,3	0,12
8	1	-1,1	-1,8	-2,4	0,58	-1,3	1,98	2,64	-0,64	1,43	4,32	-1,04	2,34	-1,39	3,12	-0,75	7,36	0,16
9	1	-1,1	-1,8	-2,4	0,82	-1,3	1,98	2,64	-0,9	1,43	4,32	-1,48	2,34	-1,97	3,12	-1,07	7,42	0,21
10	1	-1,1	-1,8	-2,4	1,06	-1,3	1,98	2,64	-1,17	1,43	4,32	-1,91	2,34	-2,54	3,12	-1,38	7,48	0,27
11	1	-1,1	-1,8	-2,4	1,3	-1,3	1,98	2,64	-1,43	1,43	4,32	-2,34	2,34	-3,12	3,12	-1,69	7,54	0,33
12	1	-1,1	-1,8	-2,4	1,54	-1,3	1,98	2,64	-1,69	1,43	4,32	-2,77	2,34	-3,7	3,12	-2	7,59	0,4
13	1	-1,1	-1,8	-2,4	1,78	-1,3	1,98	2,64	-1,96	1,43	4,32	-3,2	2,34	-4,27	3,12	-2,31	7,65	0,48
14	1	-1,1	-1,8	-2,4	2,02	-1,3	1,98	2,64	-2,22	1,43	4,32	-3,64	2,34	-4,85	3,12	-2,63	7,71	0,56
15	1	-1,1	-1,8	-2,4	2,26	-1,3	1,98	2,64	-2,49	1,43	4,32	-4,07	2,34	-5,42	3,12	-2,94	7,77	0,65
16	1	-1,1	-1,8	-2,4	2,5	-1,3	1,98	2,64	-2,75	1,43	4,32	-4,5	2,34	-6	3,12	-3,25	7,82	0,74

1	1	-1,1	-1,8	-2,4	-1,3	-1,3	1,98	2,64	1,43	1,43	4,32	2,34	2,34	3,12	3,12	1,69	6,91	
2	1	-1,1	-1,8	-2,4	-1,3	-1,1	1,98	2,64	1,43	1,24	4,32	2,34	2,028	3,12	2,704	1,465	6,74	0,03
3	1	-1,1	-1,8	-2,4	-1,3	-0,9	1,98	2,64	1,43	1,05	4,32	2,34	1,716	3,12	2,288	1,239	6,56	0,12
4	1	-1,1	-1,8	-2,4	-1,3	-0,7	1,98	2,64	1,43	0,86	4,32	2,34	1,404	3,12	1,872	1,014	6,39	0,28
5	1	-1,1	-1,8	-2,4	-1,3	-0,6	1,98	2,64	1,43	0,67	4,32	2,34	1,092	3,12	1,456	0,789	6,21	0,49
6	1	-1,1	-1,8	-2,4	-1,3	-0,4	1,98	2,64	1,43	0,48	4,32	2,34	0,78	3,12	1,04	0,563	6,04	0,77
7	1	-1,1	-1,8	-2,4	-1,3	-0,2	1,98	2,64	1,43	0,29	4,32	2,34	0,468	3,12	0,624	0,338	5,86	1,1
8	1	-1,1	-1,8	-2,4	-1,3	-0,1	1,98	2,64	1,43	0,1	4,32	2,34	0,156	3,12	0,208	0,113	5,69	1,5
9	1	-1,1	-1,8	-2,4	-1,3	0,09	1,98	2,64	1,43	-0,1	4,32	2,34	-0,16	3,12	-0,21	-0,11	5,51	1,96
10	1	-1,1	-1,8	-2,4	-1,3	0,26	1,98	2,64	1,43	-0,3	4,32	2,34	-0,47	3,12	-0,62	-0,34	5,34	2,48
11	1	-1,1	-1,8	-2,4	-1,3	0,43	1,98	2,64	1,43	-0,5	4,32	2,34	-0,78	3,12	-1,04	-0,56	5,16	3,07
12	1	-1,1	-1,8	-2,4	-1,3	0,61	1,98	2,64	1,43	-0,7	4,32	2,34	-1,09	3,12	-1,46	-0,79	4,99	3,71
13	1	-1,1	-1,8	-2,4	-1,3	0,78	1,98	2,64	1,43	-0,9	4,32	2,34	-1,4	3,12	-1,87	-1,01	4,81	4,42
14	1	-1,1	-1,8	-2,4	-1,3	0,95	1,98	2,64	1,43	-1	4,32	2,34	-1,72	3,12	-2,29	-1,24	4,64	5,18
15	1	-1,1	-1,8	-2,4	-1,3	1,13	1,98	2,64	1,43	-1,2	4,32	2,34	-2,03	3,12	-2,7	-1,46	4,46	6,01
16	1	-1,1	-1,8	-2,4	-1,3	1,3	1,98	2,64	1,43	-1,4	4,32	2,34	-2,34	3,12	-3,12	-1,69	4,28	6,9

