

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

На правах рукописи

ШАГИДУЛЛИН Андрей Владиславович

**ПЛАНИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ
НА ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ
С УЧЕТОМ ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ, ОПРЕДЕЛЯЕМЫХ
ПО ЭКВИВАЛЕНТНОМУ СОПРОТИВЛЕНИЮ ЦЕХОВЫХ СЕТЕЙ**

05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы»

Диссертация на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук,
доцент
Грачева Елена Ивановна

Казань – 2016 г.

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ	4
ГЛАВА 1. АНАЛИЗ МЕТОДОВ ПЛАНИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ	9
1.1. Обзор литературных источников	9
1.2. Основные задачи планирования электропотребления	12
1.3. Формирование фактических и плановых балансов расхода и потребления электроэнергии	16
1.4. Основы и методика планирования электропотребления	19
1.5. Особенности технологии планирования электропотребления	21
1.6. Постановка задач исследования	25
1.7. Выводы	27
ГЛАВА 2. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОСНОВНЫХ СХЕМНЫХ И РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ ОБОРУДОВАНИЯ НА ВЕЛИЧИНУ ЭКВИВАЛЕНТНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ЦЕХОВЫХ СЕТЕЙ	28
2.1. Современное состояние рынка низковольтных коммутационных аппаратов, устанавливаемых в цеховых сетях	28
2.2. Особенности и результаты измерения сопротивления контактных соединений и контактов низковольтных коммутационных аппаратов	40
2.3. Исследование влияния основных параметров оборудования на величину эквивалентного сопротивления цеховых сетей	52
2.4. Выводы	70
ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ПЛАНИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ НА ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭКВИВАЛЕНТНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ЦЕХОВЫХ СЕТЕЙ	72
3.1. Использование эквивалентного сопротивления цеховых сетей при	72

планировании электропотребления	
3.2.Разработка мероприятий по экономии электроэнергии на промышленных предприятиях	81
3.3.Оценка экономического эффекта от замены низковольтных коммутационных аппаратов в зависимости от срока эксплуатации	88
3.4.Разработка методики планирования электропотребления на основе моделирования эквивалентного сопротивления внутрицеховых сетей	92
3.5. Выводы	97
ГЛАВА 4. ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДИКИ ПЛАНИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭКВИВАЛЕНТНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ЦЕХОВЫХ СЕТЕЙ НА ПРИМЕРЕ ЦЕХОВОЙ СЕТИ ПАО «КАЗАНЬОРГСИНТЕЗ»	98
4.1. Планирование расхода электроэнергии по величине эквивалентного сопротивления цеховой сети	98
4.2. Оценка эффективности предлагаемых мероприятий по экономии электроэнергии на промышленном предприятии ПАО «Казаньоргсинтез»	116
4.3. Выводы	120
Заключение	122
Список литературы	125
Приложение А	137
Приложение Б	142

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. Одной из важнейших проблем обеспечения эффективного функционирования систем электроэнергетики и промышленных предприятий является планирование электропотребления. Службы энергосистем, составляя планы на последующие сутки, месяц, год, решают задачу планирования электропотребления – соотношения между потребности в электроэнергии и методами ее удовлетворения. Согласно Федеральному закону от 23.11.2009 N 261 - ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» все промышленные предприятия и объекты электроэнергетики должны проводить энергообследование и разрабатывать планы мероприятий по энергосбережению с целью повышения энергоэффективности. В современных экономических условиях планирование электропотребления – один из определяющих факторов эффективной работы оборудования, и является составной частью общей концепции развития промышленности.

Задача планирования электропотребления состоит в расчете ожидаемых графиков нагрузки и анализе факторов, влияющих на их изменение. В зависимости от количества учитываемых факторов различают одно- и многофакторные методы.

Однако, несмотря на существенную значимость и возрастающую актуальность проблемы повышения достоверности объемов планируемых расходов электроэнергии на промышленных предприятиях, она не решена в достаточной степени из-за отсутствия необходимых данных по определению искомым закономерностей расходов электрической энергии промышленными электропотребителями, выявлению и оценке возможных способов энергосбережения. Решению этих задач посвящена диссертационная работа.

Степень разработанности. Решению задач совершенствования и развития методов планирования электропотребления посвящены работы Бляхера Р.М., Богданова В.А., Гамазина С.И., Германа И.М., Головкина П.И., Грачевой Е.И.,

Ежилова В.Х., Кароля Н.Б., Коновалова Ю.С., Конюховой Е.А., Крумма Л.А., Кугелевичуса И.Б., Львова Ю.А., Макоклюева Б.И., Мамедярова О.С., Рабиновича М.А., Резникова В.П., Седова А.В., Ставровского А.Н., Федорова О.В. и других. В известных работах недостаточно полно и точно определены потери в цеховых сетях промышленных предприятий, которые получили развитие в предлагаемой работе.

Целью работы является разработка методики планирования расхода электроэнергии на промышленных предприятиях по эквивалентному сопротивлению цеховых сетей.

Для достижения цели поставлены и решены следующие **задачи**:

- 1) анализ современного состояния рынка низковольтных коммутационных аппаратов при решении задач импортозамещения;
- 2) исследование влияния основных схемных и режимных параметров оборудования на величину эквивалентного сопротивления цеховых сетей;
- 3) разработка алгоритмов и моделей учета влияния факторов на определение эквивалентного сопротивления низковольтных цеховых сетей;
- 4) разработка математических моделей планирования расхода электроэнергии на основе эквивалентного сопротивления цеховых сетей;
- 5) разработка мероприятий, направленных на снижение электропотребления на промышленных предприятиях.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- 1) предложены принципы и методы эквивалентирования распределительных электрических сетей низкого напряжения, основанные на равенстве эквивалентного сопротивления в исходной схеме и ее модели, позволяющие достоверно определять и анализировать величину потерь электроэнергии;
- 2) впервые разработаны алгоритмы и математические модели учета основных параметров электрооборудования, определяющих эквивалентное сопротивление низковольтных цеховых сетей;

3) разработана новая методика планирования электропотребления промышленными предприятиями, основанная на моделировании эквивалентного сопротивления цеховых сетей с учетом установленных низковольтных коммутационных аппаратов;

4) программная реализация разработанной методики планирования электропотребления промышленными предприятиями;

5) выработаны рекомендации по снижению электропотребления промышленными предприятиями, реализуемые за счет замены низковольтных коммутационных аппаратов.

Теоретическая и практическая значимость работы. Разработанные алгоритмы, методики и математические модели позволяют:

1) оценить влияние схемно-режимных факторов на точность расчёта эквивалентного сопротивления низковольтных цеховых сетей, минимизирована ошибка расчета этого показателя в зависимости от загрузки оборудования и структуры схемы;

2) оценивать и прогнозировать электропотребление промышленных предприятий с учетом уточненной величины потерь электроэнергии по эквивалентному сопротивлению цеховой сети;

3) снижать электропотребление промышленных предприятий, путем замены низковольтных коммутационных аппаратов в зависимости от отработанного ресурса.

Методология и методы диссертационного исследования определялись характером поставленных задач и опирались на положения теории электрических цепей, теории вероятностей и математической статистики, методы моделирования в среде MATLAB. Режимные исследования и расчеты выполнялись на ПЭВМ с использованием стандартных и специально разработанных алгоритмов и программ.

Положения, выносимые на защиту:

1. Результаты исследований влияния основных схемных и режимных параметров оборудования на величину эквивалентного сопротивления цеховых сетей промышленных предприятий.

2. Методика планирования расхода электроэнергии на промышленных предприятиях, разработанная на основе моделирования эквивалентного сопротивления цеховых сетей промышленных предприятий.

3. Результаты исследований и рекомендации по замене низковольтных коммутационных аппаратов, направленные на снижение электропотребления на промышленных предприятиях.

Обоснованность и достоверность выводов и результатов работы достигается использованием при решении поставленных задач математических методов, экспериментальной обоснованностью принятых допущений, сопоставлением результатов с общеизвестными, опубликованными в научно-технической литературе исследованиями.

Апробация работы. Основные положения работы и ее результаты докладывались и обсуждались на Международных молодежных конференциях «Тинчуринские чтения» (г. Казань, 2011, 2012, 2013, 2014), Международной научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития электротехнологии» (г. Иваново, 2011), Международных научно-практических конференциях «Федоровские чтения» (г. Москва, 2011, 2012, 2013, 2014, 2015), Межрегиональной научно-практической конференции «Камские чтения» (г. Набережные Челны, 2012), Международной молодежной научно-технической конференции «Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций «РТ-2012» (г. Севастополь, 2012), Международных научно-технических конференциях студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия» (г. Иваново, 2012, 2013), Всероссийской молодежной научной конференции «Мавлютовские чтения» (г. Уфа, 2012), XVIII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии» (г. Томск, 2013), Международной научно-технической конференции «Состояние и

перспективы развития электротехнологии» (XVII Бенардосовские чтения) (г. Иваново, 2013), Международной молодежной научной конференции по естественнонаучным и техническим дисциплинам «Научному прогрессу – творчество молодых» (г. Йошкар-Ола, 2013), а также обсуждались на аспирантско-магистерских семинарах, посвященный «Дню энергетика» в КГЭУ.

Внедрение. Полученные теоретические и практические результаты работы использованы:

- при определении прогнозного значения электропотребления, с выделением расхода электроэнергии на потери и технологию и при реализации программы замены низковольтных коммутационных аппаратов с учетом отработанного ресурса, что позволило снизить величину расхода электроэнергии на 1,5 % на участке низковольтной сети ПАО «Казаньоргсинтез» при применении разработанной методики;

- при определении величины эквивалентного сопротивления радиальных и магистральных схем сетей и его использование для осуществления контроля потерь электроэнергии в процессе проектирования и формирования результатов энергоаудита промпредприятий в АО «Казанский Гипронефтеавиапром»;

- в учебном процессе кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Казанский государственный энергетический университет» при подготовке магистров по направлению 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника».

Публикации. По результатам выполненных исследований опубликовано 41 научная работа, из них в изданиях по перечню ВАК 9 статей.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, 4-х глав, заключения, списка литературы, включающего 117 наименований и 2-х приложений. Содержит 151 страницу основного машинописного текста, проиллюстрированного 45 рисунками и 34 таблицами.

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ МЕТОДОВ ПЛАНИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ

1.1. Обзор литературных источников

Одной из важнейших проблем обеспечения эффективного функционирования систем электроэнергетики и промышленных предприятий является планирование электропотребления. Службы энергосистем, составляя планы на последующие сутки, месяц, год, решают задачу планирования электропотребления – соотношения между потребности в электроэнергии и методами ее удовлетворения. В современных экономических условиях планирование электропотребления – один из определяющих факторов эффективной работы оборудования, что является составной частью общей концепции развития промышленности.

Задача планирования электропотребления состоит в расчете ожидаемых графиков нагрузки и анализе факторов, влияющих на их изменение. В зависимости от количества учитываемых факторов различают одно- и многофакторные методы.

В первых работах по исследуемой тематике планирования электропотребления Бляхера Р.М., Львова Ю.А., Шаханова В.С. [8], Папяна С.К. [72] прогнозирование графика нагрузки основывается на подобии его предыдущим дням. Наибольшее количество публикаций, посвященных методам планирования электропотребления, представлено однофакторными методами. В работе Германа И.М. [14] методика планирования заключается в определении значений часового потребления в будущий день ($i+n$) по известным предыдущим значениям ($i-1$), ($i-2$), ..., ($i-m$): $P_{(i+n)} = f[P_{(i-1)}, P_{(i-2)}, \dots, P_{(i-m)}]$. Наилучшей считается функция, для которой математическое ожидание квадрата ошибки минимально.

Кузнецов Г.Г. и Черченко П.А. [56] представляют метод информативного анализа периодически нестационарных случайных процессов. Для

прогнозирования электропотребления используется последнее измеренное значение случайной функции из имеющегося множества стохастических матриц, что вызывает определенные трудности при использовании данного метода для систем промышленного электроснабжения.

В работах Богданова В.А.[9], Ставровского А.Н. [92] рассматривается методика корректируемого выбора предыдущих дней, которые используются для расчета параметров модели прогнозирования. Прогнозируемая нагрузка получается на основании данных о суточных нагрузках предыдущих дней и данных о почасовых нагрузках текущих суток.

Ежилов В.Х. и Тимченко В.Ф. [19] определяют регулярные изменения нагрузки (Z), такие, как суточные, месячные, сезонные и естественный рост нагрузки. В основе метода нелинейное преобразование, нормализующее массив суточного потребления (W):

$$Z[I, J] = \frac{W[I + \Delta I, J]}{\sum_{J=1}^7 W[I, J]}, \text{ где } I\text{-номер недели в году; } J\text{- номер дня в неделе.}$$

Данный метод, с дополненной методикой учета метеофакторов, широко применялся в России в начале 90-х годов.

В работах авторов Коновалов Ю.С., Крумм Л.А., Кугелевичус И.Б. [50; 54], Маледханов В.А., Мамедяров О.С. [64], рассмотрены однофакторные методы планирования электропотребления.

Головкин П.И. [15] описывает метод планирования полезного отпуска электроэнергии на будущий год. Данный метод осуществляется по приросту отпуска электроэнергии, ведется учет рабочих и выходных дней и изменение среднегодовых температур.

В своей работе Резников В.П. [84] отмечает значительное влияние на общую нагрузку температуры и освещенности помещений. Причем влияние температуры «запаздывает» на изменение нагрузки.

Многие авторы отмечают целесообразность рассмотрения нагрузки во внутричасовых интервалах. У Кароля Н.Б., Ставровского А.Н. [33] рассмотрена

зависимость погрешности аппроксимирующей функции графика нагрузки от множества его измерений. Экспериментальные замеры суммарной нагрузки выступают в качестве статистических результатов. Отмечено, что при планировании на интервалы более 30 минут следует учитывать изменения графика нагрузки в предшествующие дни.

В работе Орнова В.Г. и Рабиновича М.А.[71], посвященной методу оперативного прогнозирования 10 минутных значений нагрузки, фактическая реализация потребления представлена в виде регулярной $P_p(t)$ и случайной $P_c(t)$ составляющих: $P(t) = P_p(t) + P_c(t)$. Недостаток данного метода заключается в использовании в качестве регулярной $P_p(t)$ составляющей нагрузки значений потребления в предыдущий день, что может вносить значительную погрешность в вычисления.

Надтока И.И. и Седов А.В. [68] усовершенствовали методику на основе анализа и автоматического разложения сложных систем при моделировании процессов в устройствах распознавания, контроля и прогнозирования электропотребления. Данные методы требуют большого количества исходной информации, возникают также сложности в подготовке исходных данных, процесс отличается большой трудоемкостью.

Макоклюев Б.И. [61] разработал систему математических моделей, позволяющую осуществлять прогнозирование сбалансированной многокомпонентной структуры электропотребления. Осуществил внедрение программных средств «Энергостат» в региональные энергосистемы страны для обработки данных балансов электроэнергии и мощности.

В приведенном обзоре литературы представлены методы и алгоритмы, описанные в периодических изданиях и книгах. С введением рыночных принципов в электроэнергетике России повысились требования к точности и достоверности расчетов прогнозов электропотребления[45; 46]. Внедрение современных методик планирования и прогнозирования расхода электроэнергии стало приносить реальную прибыль предприятиям.

1.2. Основные задачи планирования электропотребления

Электропотребление является составной частью балансов электроэнергии и мощности. Основной задачей планирования балансов является определение объемов выработки электроэнергии, мощности в энергосистеме по данным о прогнозируемой потребляемой электроэнергии и мощности.

Одним из основных показателей работы энергосистемы при планировании является прогноз ожидаемого потребления мощности и электроэнергии по системе в целом, по группам и отдельным потребителям. Необходимость прогнозирования обусловлена экономическими и технологическими причинами. Наиболее точные расчеты прогнозов обеспечивают оптимальное распределение нагрузок между станциями, способствуют экономически целесообразным операциям по покупке и продаже электроэнергии.

На рисунке 1.1 укрупненно показаны компоненты баланса электроэнергии, разделенные по определенным признакам, где

ФСК - Федеральная сетевая компания;

ЭСК - энергосбытовая компания;

ОРЭМ - оптовый рынок электроэнергии и мощности[96].

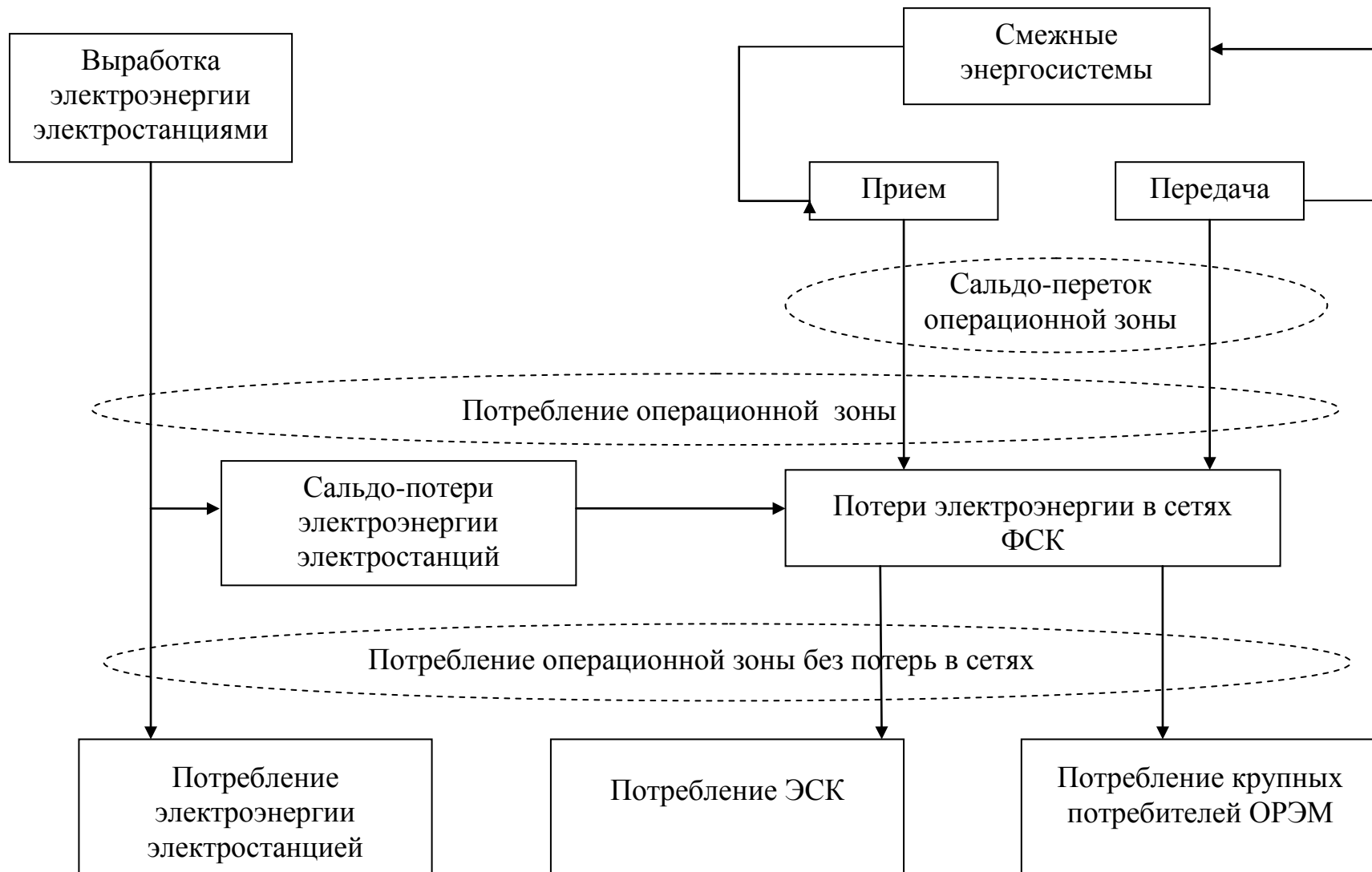


Рисунок 1.1 – Структурная схема показателей баланса электроэнергии энергосистемы

Режимы нагрузки электрических систем являются совокупностью суммарного графика Единой энергетической системы России. Федеральный закон «Об электроэнергетике» предлагает единые принципы общего диспетчерского управления в электроэнергетических системах. Основными из них являются соблюдение баланса производства и электропотребления, а также возможность прогнозирования электропотребления. Долгосрочное прогнозирование электропотребления требуется для составления Федеральной энергетической комиссией ежегодных общих балансов.

Краткосрочные прогнозы электропотребления составляют основу диспетчерских графиков, формируемых на период от суток до недели вперед. Объемы потребления энергосистемой согласовываются с подразделениями Системного оператора – региональными, объединенными и Центральным диспетчерскими управлениями. Помимо заявленных графиков потребления Системный оператор самостоятельно прогнозирует суточный график потребления активной мощности.

Цель составления Системным оператором таких собственных прогнозов - повышение надежности функционирования энергетической системы за счет принятия решений по:

- составлению графиков работы генерирующего оборудования с учетом резервов;
- определению состава генерирующего оборудования, находящегося в работе.

При составлении прогнозов электропотребления энергосистемами Системный оператор должен использовать имеющиеся в распоряжении расчетные и статистические данные:

- о значениях параметров, определяющих величины фактического потребления активной мощности за аналогичные дни недели текущего и прошлого годов, которые включают:
 - степень освещенности;
 - температуру окружающей среды;

- продолжительность дня;
- переносы праздничных и выходных дней;
- форс-мажорные обстоятельства (стихийное бедствие, забастовки, революции и др.);
- о конфигурации и величинах фактического потребления активной мощности, зарегистрированные за аналогичные дни недели текущего и прошлого годов;
- прогнозы погодных условий;
- информацию о планируемых включениях (отключениях) энергоемких производств.

На рисунке 1.2 показана временная иерархия планирования электропотребления промышленными предприятиями.



Рисунок 1.2–Виды планирования электропотребления промышленными предприятиями

Задача прогнозирования электропотребления решается на каждом временном интервале с уточнением полученных результатов по мере уменьшения рассматриваемого интервала времени. Точность прогноза определяется соответствием применяемых математических моделей процессу колебаний потребления. Колебания электропотребления являются сложным непостоянным случайным процессом, имеющим повторяющиеся колебания, которые определяются технологическим режимом работы предприятий, сезонными

колебаниями температуры и освещенности (продолжительности дня), режимом труда и отдыха населения. На данные колебания накладываются случайные и нерегулярные составляющие, появляющиеся в следствии резкого изменения погодных условий, возникновения различных социальных факторов и т. п., учет которых необходим при разработке математических моделей прогнозирования электропотребления.

В настоящее время цена неточного планирования электропотребления промышленными предприятиями возрастает. Как показывает опыт зарубежных специалистов [113 - 117] экономическая эффективность достоверного прогнозирования электропотребления заставляет энергоменеджеров проводить свой анализ электропотребления и прогнозов, объединять усилия энергетиков и программистов. Установлено, что различные виды прогнозирования с соответствующими временными интервалами соответствуют различным методическим подходам. Долгосрочные прогнозы должны учитывать общие экономические тренды, а краткосрочное прогнозирование, как правило, учитывает конкретные условия эксплуатации предприятий с выявлением наиболее их значимых факторов.

В зависимости от необходимой детальности планирования и решаемых задач, в итоговое электропотребление входят составляющие, характеризующие работу промышленного предприятия на различных этапах технологического процесса. Особым образом делится полезный отпуск – структурирование возможно по тарифной группе, типу присоединения, социальной группе потребителя и т.п. Планирование электропотребления выполняется на основе прогноза каждой составляющей и суммарного показателя.

1.3. Формирование фактических и плановых балансов расхода и потребления электроэнергии

Электропотребление, как показатель балансов, представляет собой суммарный расход электроэнергии на промышленном предприятии. В состав

баланса входит товарная составляющая – полезный отпуск, производственные и собственные нужды, потери электроэнергии.

Средством осуществления баланса электроэнергии является баланс активной мощности. Структурная схема показателей фактического баланса приведена на рисунке 1.3.



Рисунок 1.3– Структурная схема показателей баланса мощности

Компоненты баланса представлены укрупненно и на практике могут развертываться на более подробные составляющие, в зависимости от назначения баланса. На структурной схеме представлены следующие компоненты:

Установленная мощность электростанций — наибольшая активная электрическая мощность, с которой агрегаты электростанций могут длительно работать без перегрузки в соответствии с паспортными данными оборудования;

Ограничения — различие между номинальной и фактической мощностью оборудования в следствии его изношенности, неудовлетворительного состояния, ограничения по максимальной мощности в период приработки нового оборудования и т. п.;

Располагаемая мощность — установленная мощность энергосистемы за вычетом ограничений;

Консервация — суммарная мощность остановленных для консервации агрегатов, как правило, по причине низких технико-экономических показателей;

Ремонты — мощность агрегатов, выводимых в капитальный, текущий и аварийный ремонты;

Рабочая мощность — располагаемая мощность энергосистемы за вычетом мощности оборудования, находящего на консервации и выведенного в ремонт. Максимальная мощность оборудования энергосистемы, способного к несению нагрузки;

Холодный резерв — суммарная максимальная мощность не работающего, но готового к работе оборудования энергосистемы;

Включенная мощность — суммарная мощность генераторов электростанций, включенных в сеть - рабочая мощность за вычетом холодного резерва;

Нагрузка — фактическая нагрузка оборудования энергосистемы, зафиксированная в рассматриваемый момент времени приборами учета;

Сальдо-переток — сумма значений перетоков мощности с другими энергосистемами;

Потребляемая мощность — фактическая мощность потребителей электроэнергии[63].

Основой оптимального планирования балансов является оптимизация характерных суточных режимов энергосистемы.

1.4. Основы и методика планирования электропотребления

Методика планирования электропотребления представляет собой методы и алгоритмы расчетов, а также средства и способы обработки данных, необходимых для реализации всего цикла планирования расхода электроэнергии [62]. Порядок выполнения основных этапов методики планирования (рисунок 1.4):

1. Подготовка исходной информации для планирования электропотребления:

- Подготовка структуры составляющих балансов электропотребления промышленного предприятия. Создание объектной модели оборудования и данных электропотребления;

- Сбор архивных данных электропотребления за несколько лет. Статистический анализ данных, выявление недостоверных значений. Замена недостоверных значений – смоделированными;

- Подготовка информации по составу технологического оборудования и его характеристикам.

2. Выбор математической модели для реализации планирования электропотребления:

- Проведение расчетов для оценки точности прогнозов по фактическим данным. В случае необходимости, коррекция моделей прогнозирования.

3. Расчет прогнозных значений электропотребления:

- Прогнозирование суточных графиков электропотребления;

- Прогнозирование характерных графиков и экстремальных точек;

- Расчета прогнозного баланса потребления промышленного предприятия.

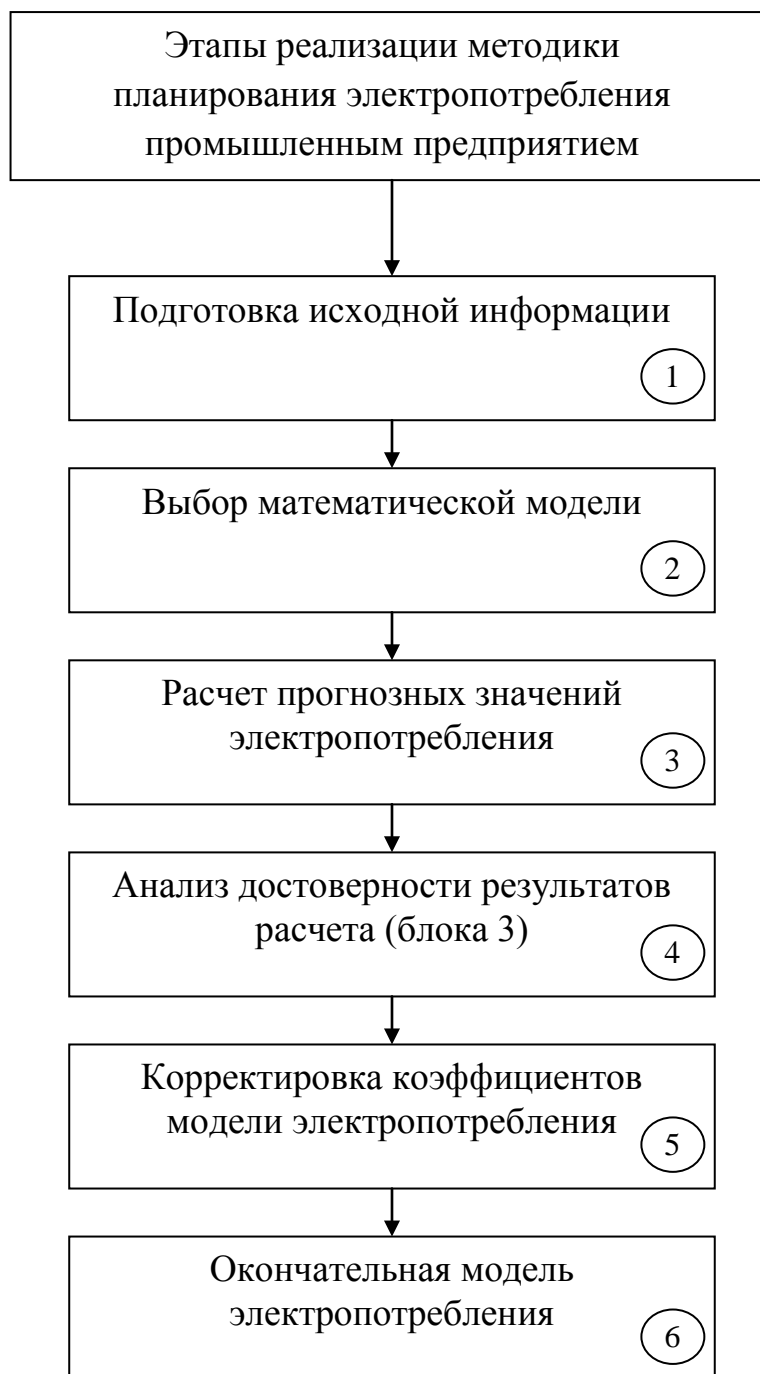


Рисунок 1.4–Основные этапы реализации методики планирования электропотребления

4. Анализ достоверности результатов расчета прогнозных значений электропотребления:

- Определение величины отклонения прогнозных значений от фактических данных;
- Вычисление относительных ошибок прогноза в процентном соотношении.

5. Корректировка модели планирования расхода электроэнергии по полученным на предыдущем шаге результатам анализа:

- Коррекция типа математической модели прогнозирования электропотребления;
- Пересчет коэффициентов математической модели электропотребления;
- Пересчет количества суток, учитываемых при прогнозировании электропотребления.

При планировании электропотребления самым важным этапом является разработка информационной структуры электропотребления и подготовка математической модели прогнозирования расхода электроэнергии. В зависимости от решаемой задачи и детальности планирования, в суммарное электропотребление могут входить показатели, характеризующие промышленное предприятие на различных этапах технологического процесса. Эти показатели могут разбиваться на отдельные составляющие при планировании многокомпонентной структуры электропотребления[61].

1.5. Особенности технологии планирования электропотребления

Расчет траектории прогноза электропотребления на определенном интервале осуществляется одним из следующих методов, которые различаются способом формирования траектории и адаптации коэффициентов математической модели, используемой при прогнозировании расхода электроэнергии.

Определение координат точек траектории по первому методу выполняется путем независимого прогнозирования отдельных точек графика [6] электропотребления на рассматриваемом интервале. Уточнение коэффициентов прогнозирующей математической модели для данного метода осуществляется при каждой аппроксимации точек обучающей выборки. Использование этого метода позволяет рассчитать график прогноза электропотребления с учётом всех измеряемых факторов (температуры, времени суток и др.), влияющих на электропотребление.



Рисунок 1.5– Схема определения формы суточных графиков на основе прогноза значений месячных показателей балансов

В результате определения значений месячного электропотребления и показателей баланса по смоделированным часовым графикам нагрузки возникает небаланс. При устранении этого небаланса в разрезе часов и суток появляется небаланс на уровне месячного электропотребления. Для устранения небалансов на каждом этапе корректируется соотношение суточных графиков, что позволяет

минимизировать небаланс за несколько итераций(рисунок1.5). На этапе устранения небалансов могут быть применены оптимизационные алгоритмы.

Второй метод предполагает использование первого метода для составления базовой математической модели прогноза электропотребления и использование дополнительных способов уточнения коэффициентов прогнозирующей модели. Применение этого метода целесообразно, когда базовая модель прогнозирования расхода электроэнергии составляется по фактическому графику электропотребления за предшествующие интервалы времени.

I. Составление траектории прогноза электропотребления по первому методу делится на два этапа:

1.Прогнозирование электропотребления отдельно для каждой суток, попадающих в рассматриваемый интервал. Данное разбиение учитывает различия в графиках расхода электроэнергии по дням недели. Данные, включаемые в обучающую выборку, формируются из записей, относящихся к одноименным дням предыдущего периода.

2.Уточнение прогноза расхода электроэнергии на рассматриваемом интервале.

Циклическое уточнение электропотребления выполняется в соответствии с алгоритмом:

1) Для времени прогноза $t = T_0$ составляется обучающая выборка, содержащая фактические значения расхода электроэнергии на интервале $[t-\Delta t_p, t]$, а также прогнозные точки на интервале $[t, t+\Delta t_y]$.

2) Выполняется прогнозирование электропотребления.

3) Фактические значения на интервале $[t, t+\Delta t_y]$ дополняются спрогнозированными значениями.

4) Осуществляется сдвиг времени прогнозирования на величину циклического уточнения прогноза Δt_n , т.е. $t = t + \Delta t_n$, $\Delta t_n \leq \Delta T_y$.

5) Шаги 1) – 4) повторяются до тех пор, пока не будут спрогнозированы все значения электропотребления на рассматриваемом интервале ΔT_y .

II. Вторым методом заключается в использовании, помимо базовой, дополнительной математической модели прогнозирования электропотребления. В базовой модели описано поведение электропотребления в базовом случае, а дополнительные модели служат для корректировки коэффициентов используемой модели.

Прогнозирование электропотребления выполняется также для каждого дня недели, попадающего в рассматриваемый интервал. Для корректирования коэффициентов базовой модели используются упрощенные математические модели (по сравнению с базовой).

Прогнозирование электропотребления для второго метода выполняется по следующему алгоритму действий:

1) Составление обучающей выборки.

Обучающая выборка составляется из значений коэффициентов базовой математической модели прогнозирования. Эти значения рассчитываются с использованием архивов фактических данных об электропотреблении.

В качестве прогнозных точек могут использоваться значения коэффициентов модели, найденные на основе краткосрочного прогнозирования электропотребления, получаемого статистическим методом [6].

2) Уточнение коэффициентов, составляющих базовую модель прогнозирования электропотребления.

3) Определение значений расхода электроэнергии по прогнозирующей математической модели с уточненными коэффициентами базовой модели прогноза электропотребления.

Методики планирования электропотребления, используемые на большинстве промышленных предприятий, практически не учитывают экономических изменений. Существующие методики ориентированы на устойчивый длительный период времени, в то время как рыночные механизмы обуславливают динамические изменения объемов производства [86]. Несмотря на актуальность и практическую значимость рассматриваемого вопроса, отсутствуют достоверные методики текущей оценки электропотребления, учитывающие

влияние рыночных условий на загрузку предприятий с непрерывной технологией производства.

1.6. Постановка задач исследования

Для прогнозирования и планирования расхода электроэнергии применяется большое число методов и методик [61].

Основные задачи планирования и прогнозирования электропотребления - обоснование факторов, вызывающих изменения, и способов снижения расхода электроэнергии.

Количество электроэнергии, поступившей на предприятие, равно сумме электроэнергии, израсходованной внутри предприятия и ушедшей с него. Небалансы электроэнергии и мощности возникают вследствие неточного измерения приборами учета составляющих баланса [48], коммерческих потерь, зависящих от воздействия внешних сил, а также технических потерь – расхода электроэнергии, вообще не измеренного приборами, величина которого находится расчетным путем [22;24].

Важным условием устранения небалансов является учет технических потерь на промышленном предприятии. Известно, что эти потери находятся расчетным путем с имеющимися погрешностями, присущими любому расчетному методу.

В опытах прошлых лет показано, что на предприятиях (цехах), занимающихся выпуском однотипной продукции в примерно одинаковых объемах, но имеющих различные удельные расходы, фактические потери электроэнергии связаны с размерами удельных затрат. С увеличением удельных энергозатрат происходил рост фактических потерь электроэнергии и наоборот (при неизменном качестве готовой продукции)[7].

Как известно, потери электроэнергии связаны с электропотреблением квадратичной зависимостью, поэтому рост электропотребления будет приводить к увеличению нагрузочных потерь [111; 112]. Вместе с тем наблюдается развитие сетей 0,4 кВ, связанное с развитием малого и среднего бизнеса. Модернизация

существующих, строительство новых линий 0,4 кВ и ввод новых коммутационных аппаратов ведет к снижению нагрузочных потерь, а увеличение протяженности линий 0,4 кВ приводит к росту по сравнению с квадратичной зависимостью [22 - 24].

Выявленная необходимость уточнения существующих методов планирования электропотребления определила задачу обоснования применения методов планирования потребления электроэнергии по эквивалентному сопротивлению низковольтной сети предприятия. Это позволяет при учете основных схемных и режимных параметров оборудования систем цехового электроснабжения существенно повысить точность величины электропотребления, а также управлять режимами эксплуатации и эффективно внедрять мероприятия по энергосбережению.

Основной трудностью на этом пути является отсутствие полной информации [91], неопределенность в исходных данных, которая обусловлена нечеткими значениями длин сети и их количеством [1-5; 10], характеристиками эксплуатации оборудования, температурными режимами и т.п. [31]. Потери активной энергии в элементах цеховых сетей обычно вычисляют с целью использования их в технико-экономических расчетах, поэтому находится она прямым расчетом по величинам фактических нагрузок. Использование метода планирования электропотребления по эквивалентному сопротивлению позволит учесть основные схемно-режимные характеристики исследуемой цеховой сети и оценить эффект предлагаемых мероприятий, направленных на снижение расхода электроэнергии, что позволит наиболее точно спланировать электропотребление.

Как показано выше, методы планирования и прогнозирования электропотребления в системах внутризаводского электроснабжения имеют существенные погрешности, что требует дальнейшего совершенствования методических подходов к указанной проблеме. Таким образом, ставятся следующие задачи исследования:

- анализ современного состояния рынка низковольтных коммутационных аппаратов при решении задач импортозамещения;

- исследование влияния основных схемных и режимных параметров оборудования на величину эквивалентного сопротивления цеховых сетей;
- разработка алгоритмов и моделей учета влияния факторов на определение эквивалентного сопротивления низковольтных цеховых сетей;
- разработка математических моделей планирования расхода электроэнергии на основе эквивалентного сопротивления цеховых сетей;
- разработка мероприятий, направленных на снижение электропотребления на промышленных предприятиях.

1.7. Выводы

1. В результате аналитического обзора методов планирования электропотребления определены их особенности, основными из которых являются неучет режимов эксплуатации и модернизации оборудования производства. Большинство методов рассматривается колебание электропотребления, как непостоянный процесс, состоящий из двух составляющих: периодической и остаточной, описываемых регрессионными и стохастическими моделями соответственно.
2. Выявлены основные виды, показатели и задачи формирования фактических и плановых балансов электроэнергии объектов электроэнергетики и промышленных предприятий.
3. Сформулированы основные этапы реализации методики планирования электропотребления, включающие в себя способы обработки данных, методы расчетов, необходимые для осуществления всего цикла планирования расхода электроэнергии.
4. Показано, что при планировании электропотребления на промышленных предприятиях необходимы совершенствование существующих и разработка новых методических подходов, позволяющих повысить достоверность полученных результатов.

ГЛАВА 2. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОСНОВНЫХ СХЕМНЫХ И РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ ОБОРУДОВАНИЯ НА ВЕЛИЧИНУ ЭКВИВАЛЕНТНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ЦЕХОВЫХ СЕТЕЙ

2.1. Современное состояние рынка низковольтных коммутационных аппаратов, устанавливаемых в цеховых сетях

Низковольтные коммутационные аппараты (НКА) являются одним из основных видов оборудования цеховых сетей.

В связи с разрабатываемыми планами Минпромторга России по содействию импортозамещению в промышленности, проведен анализ рынка НКА отечественного производства. По данным каталогов проведено сравнительное исследование ассортимента выпускаемой продукции, цен и технических характеристик НКА крупнейших российских фирм-производителей, таких как ИЕК, ЕКФ, Курский электроаппаратный завод (КЭАЗ), завод «Контактор», Чебоксарский электроаппаратный завод (ЧЭАЗ), Владикавказский завод «Электроконтактор» и «Дагэлектроавтомат»[35-44; 67; 95].

Ассортимент и цена продукции некоторых фирм-изготовителей, представленный рядом автоматических выключателей, приведен в таблице 2.1, магнитных пускателей и контакторов в таблице 2.2[76-82].

Таблица 2.1– Ассортимент автоматических выключателей фирм-изготовителей

Производитель	Серия аппарата	Номинальный ток, I _н	Цена за штуку, руб.
Автоматические выключатели			
IEK	BA 47-29	0,5 – 63	51 – 433
	BA47-60	6 – 63	67 – 526
	BA47-100	10 – 100	373 – 1490
	BA 07	800 – 4000	41362 – 344726
	BA 88	12,5 – 1600	1971 – 56299
КЭАЗ	Optimat E100	16 – 100	2030 – 2639
	Optimat E250	125 – 250	2967 – 7249
	Optimat D	100 – 250	11295 – 20859
	AE 20	10 – 160	882 -2531
	BA 04	16 – 400	3514 – 7865
	BA 21	0,6 – 100	3326 – 8204
	BA 47	6 – 100	67 – 1381
	BA 51	16 – 630	2289 – 10336
	BA 53	250 – 2000	59339 – 172149
	BA 57	16 – 100	2290 – 3097
	OptiDin BM63	1 – 63	169 – 2417
	OptiDin BM125	80 – 125	2841 – 5682
ЕКФ	BA 47-29	6 – 63	74 – 305
	BA 47-63	1 – 63	67 – 510
	BA 47-100	10 – 125	106 – 1258
	BA 47-125	80 – 125	655 – 2431
	BA 99	16 – 1600	2065 – 59003
«Контактор»	BA 47	1 – 100	155 – 2072
	BA 04	16 – 250	2151 – 5497
	BA 50	250 – 630	14037 – 15489
	BA 51	320 – 630	12616 – 14644
	BA 08	400 – 800	14919 – 24950
	A 3790	40 -630	33784 – 46122
«Дагэлектроавтомат»	AE 2030 (2060)	0,6 – 250	175 – 1331

Таблица 2.2 – Ассортимент магнитных пускателей и контакторов фирм-изготовителей

Производитель	Серия аппарата	Номинальный ток, I _н	Цена за штуку, руб.
Контакторы			
IEK	КМИ	9 – 95	385 – 2388
	КТИ	115 – 630	5367 – 29484
	КТ 6600 И	100 – 500	6182 – 19118
КЭАЗ	OptiDinMK63	20 – 63	1074 – 4328
	OptiStartКАС	9 – 1200	1469 – 602513
ЕКФ	КМ	10 – 63	674 – 1666
	КТЭ	115 – 630	5269 – 28950
	КМЭ	9 – 95	350 -2352
Электроконтактор	МК	40 – 160	2990 – 4699
	КТПВ	63 – 250	1390 – 12900
	КТП 60 (66)	100 – 630	4800 – 15000
	КТ 60 (66)	100 – 630	3228 – 14200
ЧЭАЗ	КТ 6050 (6060)	400 – 1000	9300 – 25500
Магнитные пускатели			
IEK	ПМ12	10 – 63	189 – 1085
КЭАЗ	ПМ12	10 – 250	402 – 1111
	ПМЛ	10 – 100	447 – 52059
ЕКФ	ПМ12	63 – 1000	3447 – 37887
Электроконтактор	ПМ12	100 – 250	2917 – 11495
	ПМЕ, ПМА	25, 40	627 – 1770

Характеристики автоматических выключателей фирмы IEK представлены в широком диапазоне номинальных токов (таблица 2.1), а основные характеристики контакторов и магнитных пускателей приведены из диапазона наиболее часто встречающихся номинальных токов в сетях низкого напряжения (таблица 2.2).

Ассортимент аппаратов завода «КЭАЗ» включает в себя большой выбор автоматических выключателей (таблица 2.1), контакторов и магнитных пускателей (таблица 2.2). При широком ассортименте продукции фирмы «КЭАЗ», цены оказываются выше цен на аппараты с аналогичными техническими характеристиками фирмы IEK.

Производственные объединения ЕКФ, «Контактор», «Дагэлектроавтомат», Чебоксарский электроаппаратный завод и Владикавказский завод «Электроконтактор» крупнейшие производители НКА на отечественном рынке.

На рисунке 2.1 представлены результаты сравнения цен на аппаратуру со схожими техническими характеристиками различных торговых марок.

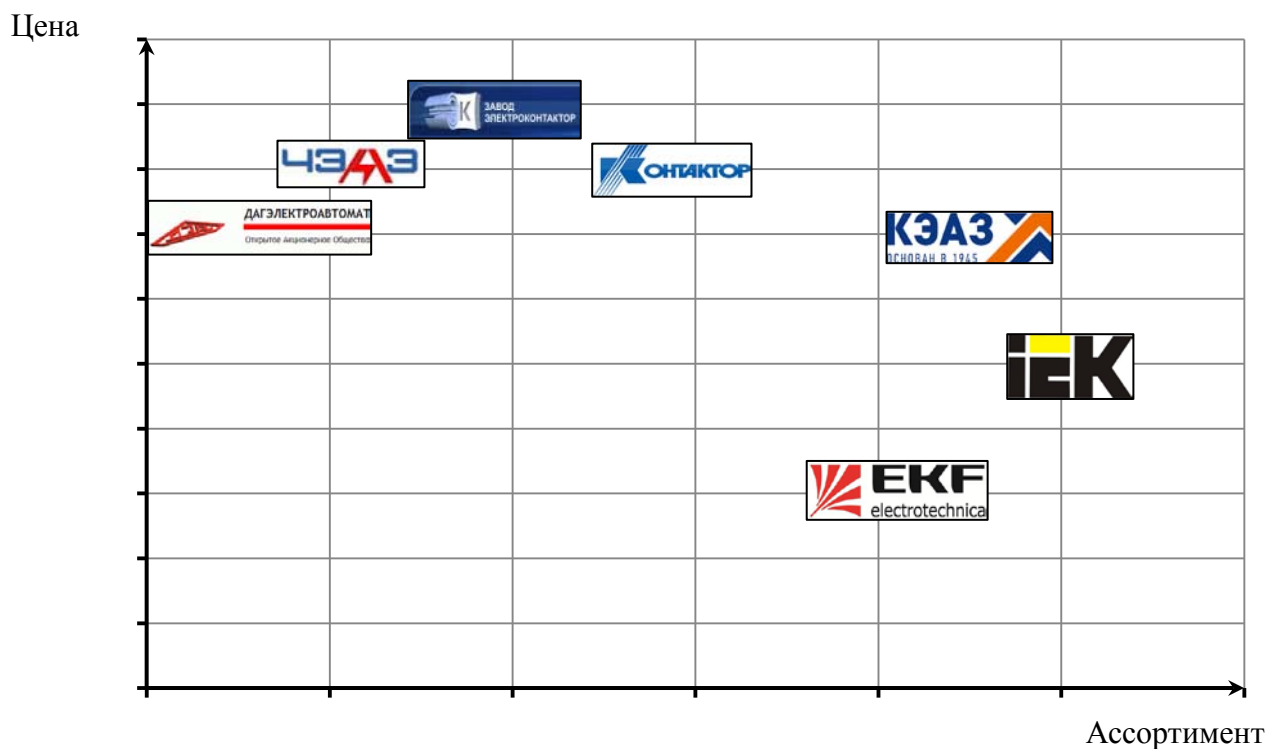


Рисунок 2.1– Сравнительное соотношение ассортимент-цена для низковольтных аппаратов некоторых заводов изготовителей

От потребителей поступают вопросы [2; 27], касающиеся качества, цены, различия и сходства технических характеристик того или иного вида электротехнической продукции. По результатам исследования [105;106] выявлены некоторые особенности НКА торговых марок IEK, КЭАЗ, ЕКФ, «Контактор». При этом сравнивались основные технические параметры, такие как номинальная отключающая способность, механическая и коммутационная износостойкость, диапазон рабочих температур автоматических выключателей с идентичным значением номинального тока [83].

Исследования по сравнению автоматических выключателей проводились в три этапа.

Первый этап заключался в конструктивном сравнении составляющих автоматических выключателей: геометрия контактов, число биметаллических пластин, наличие защиты корпуса от прожигания электрической дугой и дугогасительных камер и др. (таблица 2.3).

По результатам исследования установлено, что различие в конструкции автоматических выключателей некоторых производителей состоит в защите механизма теплового расцепителя и количестве пластин дугогасительной камеры, что обусловлено требованиями к режимам эксплуатации [93; 94].

На втором этапе исследован материал контактов выключателей (с разделением на составные элементы серебросодержащей напайки). Контакты всех рассматриваемых автоматических выключателей выполнены со серебросодержащими напайками с содержанием серебра 97,2% от массы контакта.

На третьем этапе сравнивались технические параметры [103] автоматических выключателей. Исходные данные для сравнения получены из ресурсов, находящихся в открытом доступе: информационные сайты и технические каталоги фирм-производителей. Проведен сравнительный анализ номинальной отключающей способности, коммутационной и механической износостойкости, диапазона рабочих температур и др. (таблица 2.4).

Таблица 2.3– Анализ конструктивных особенностей автоматических выключателей разных фирм-производителей

Наименование элемента	IEK	EKF	КЭАЗ	Контактор
Электромагнитный расцепитель	+	+	+	+
Защита теплового расцепителя от изменения заводских настроек	+	+	+	+
Биметаллическая пластина	+	+	+	+
Число пластин дугогасительной камеры	9	9	13	12
Защита корпуса выключателя от прожигания электрической дугой	+	+	+	+
Серебросодержащая напайка на неподвижном контакте	+	+	+	+
Серебросодержащая напайка на подвижном контакте	—	—	+	—
Регулировочный винт с прижимной закладкой	+	+	+	—
Пластик корпуса	Не поддерживающий горение	Не поддерживающий горение	Не поддерживающий горение	Не поддерживающий горение
Дугоотводящий лабиринт	+	+	+	+
Искрогасящая решетка выхлопа	+	—	+	—

Таблица 2.4– Технические характеристики автоматических выключателей на номинальный ток 63 А различных фирм-производителей

Наименование	IEK (BA47-29)	EKF (BA47-29)	КЭАЗ (BA47)	«Контактор» (BA47)
Предельная коммутационная способность, А	4500	4500	4500	4500
Коммутационная износостойкость, циклов В-О, не менее	6 000	10 000	4 000	4 000
Механическая износостойкость, циклов В-О, не менее	20 000	20 000	10000	10 000
Номинальное напряжение частотой 50 Гц, В	230/400	240/415	230/400	230/400
Максимальное сечение подключаемого провода, мм ²	25	25	25	25
Степень защиты выключателя	IP 20	IP 20	IP 20	IP 20
Диапазон рабочих температур, °С	- 40...+50	-40...+50	-60...+40	-40...+70

В результате проведенного анализа установлено, что предельная коммутационная способность у всех типов рассмотренных автоматических выключателей с $I_n = 63\text{А}$ составляет не менее 4,5 кА. Механическая износостойкость выше у аппаратов производителей ИЕК и ЕКФ и составляет не менее 20 000 циклов. Более широкий диапазон рабочих температур у автоматических выключателей фирмы «Контактор», но в свою очередь аппараты завода «КЭАЗ» обладают максимально-низким допуском работы по температуре, что позволяет применять их в более холодных климатических условиях нашей страны. Степень защиты выключателей и максимальное сечение подключаемого провода близки для аппаратов всех фирм-изготовителей.

Также для оценки энергоэффективности эксплуатации автоматических выключателей определены зависимости и построены графики потерь мощности в контактных системах автоматических выключателей от номинального тока для различных изготовителей (рисунки 2.2, 2.3)[35-44; 67; 95].

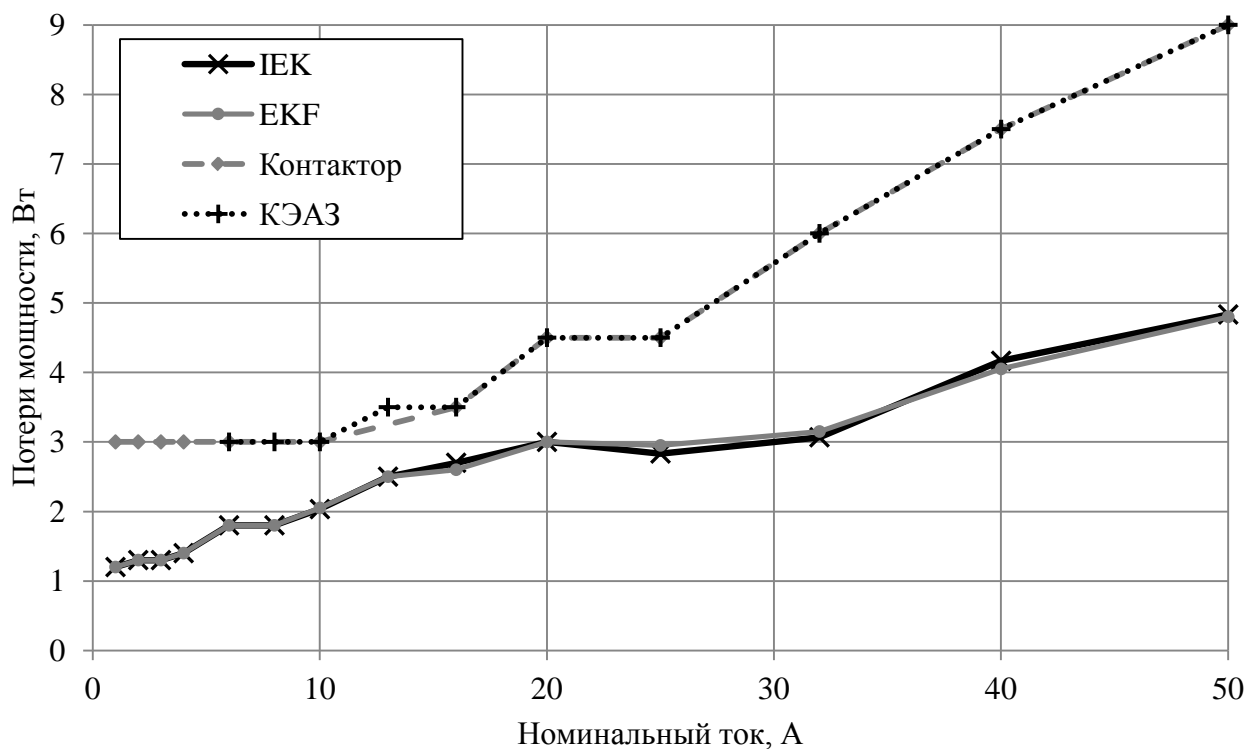


Рисунок 2.2–Зависимости потерь мощности в контактных системах автоматических выключателей от их номинального тока ($I_n = 1 \div 50\text{ А}$)

Рисунок 2.2 показывает, что потери мощности на полюс автоматических выключателей с $I_H = 1 \div 50$ А ИЕК и ЕКФ имеют меньшее значение, чем автоматических выключателей завода КЭАЗ и фирмы «Контактор», что, с точки зрения электропотребления, свидетельствует о более энергоэффективном их использовании. При этом для номинальных токов $I_H = 25$ и 32 А, меньшими потерями мощности на аппарат обладают автоматические выключатели изготовителя ИЕК. Для номинальных токов в диапазоне $I_H = 50 \div 650$ А преимущество, с точки зрения меньших потерь электроэнергии, принадлежит автоматическим выключателям ИЕК(рисунок 2.3).

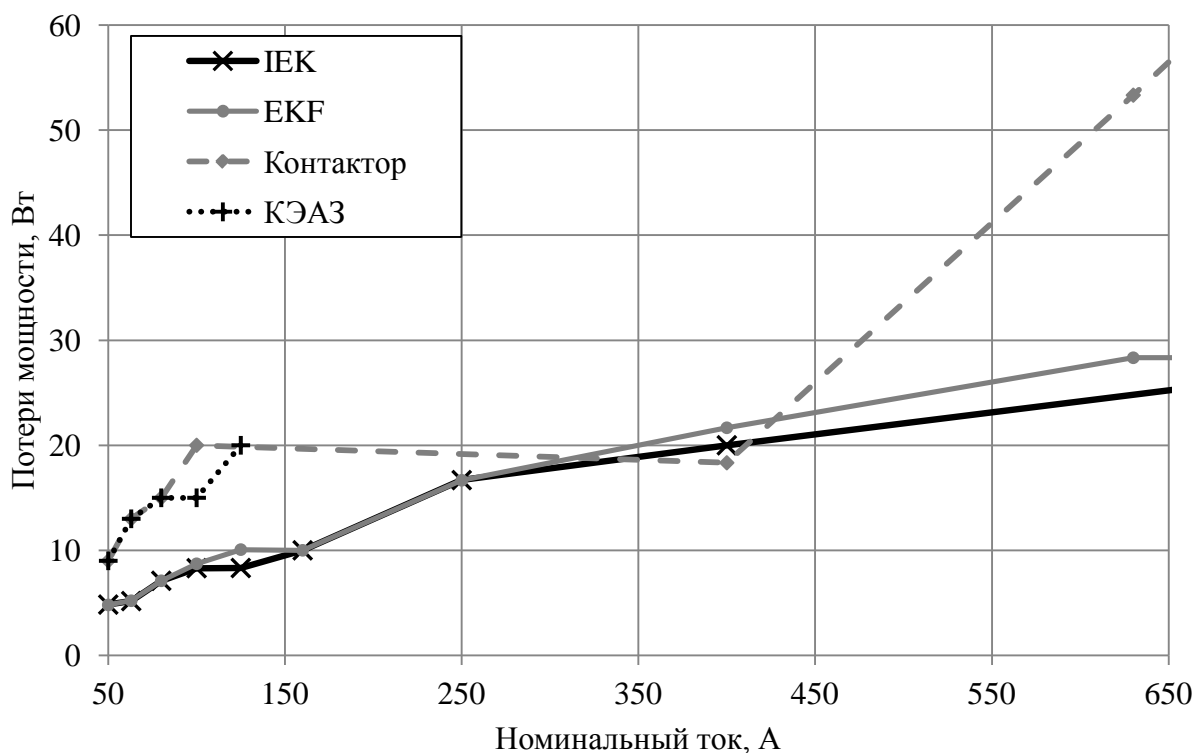


Рисунок 2.3–Зависимости потерь мощности в контактных системах автоматических выключателей от их номинального тока ($I_H = 50 \div 650$ А)

Графики зависимости потерь мощности в контактных системах контакторов от их номинального тока построены также по каталожным данным [35-44; 67; 95] и представлены на рисунках 2.4, 2.5.

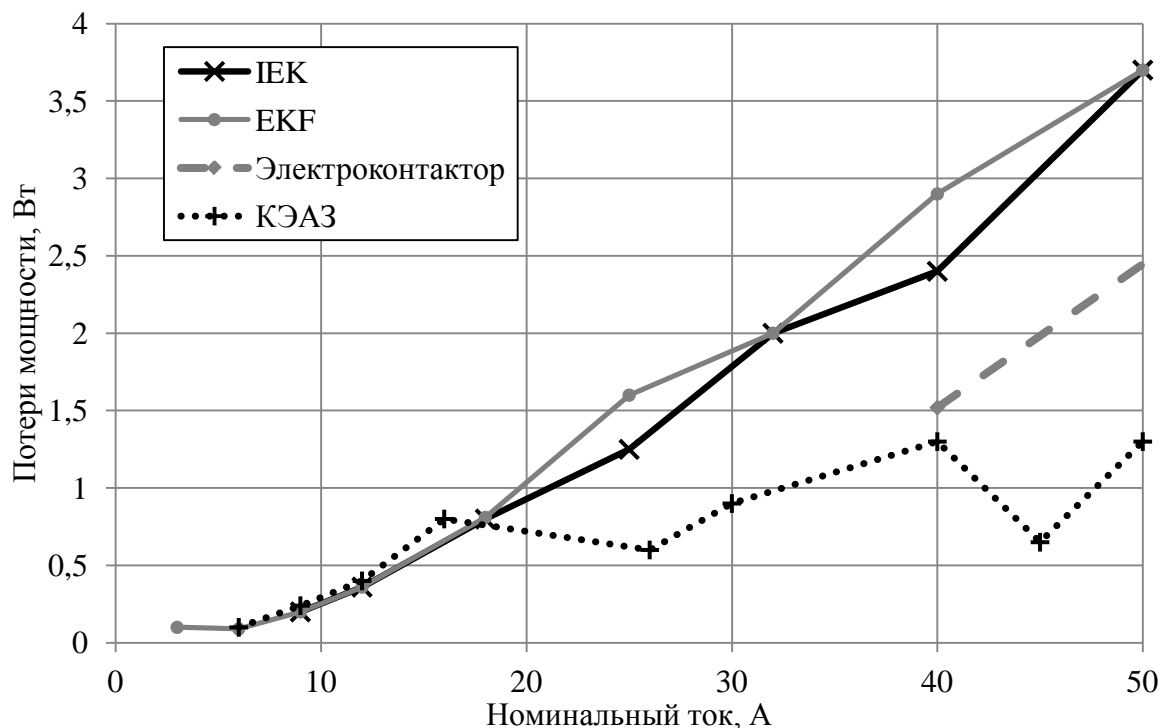


Рисунок 2.4—Зависимости потерь мощности в контактных системах контакторов от их номинального тока ($I_H = 3 \div 50$ А)

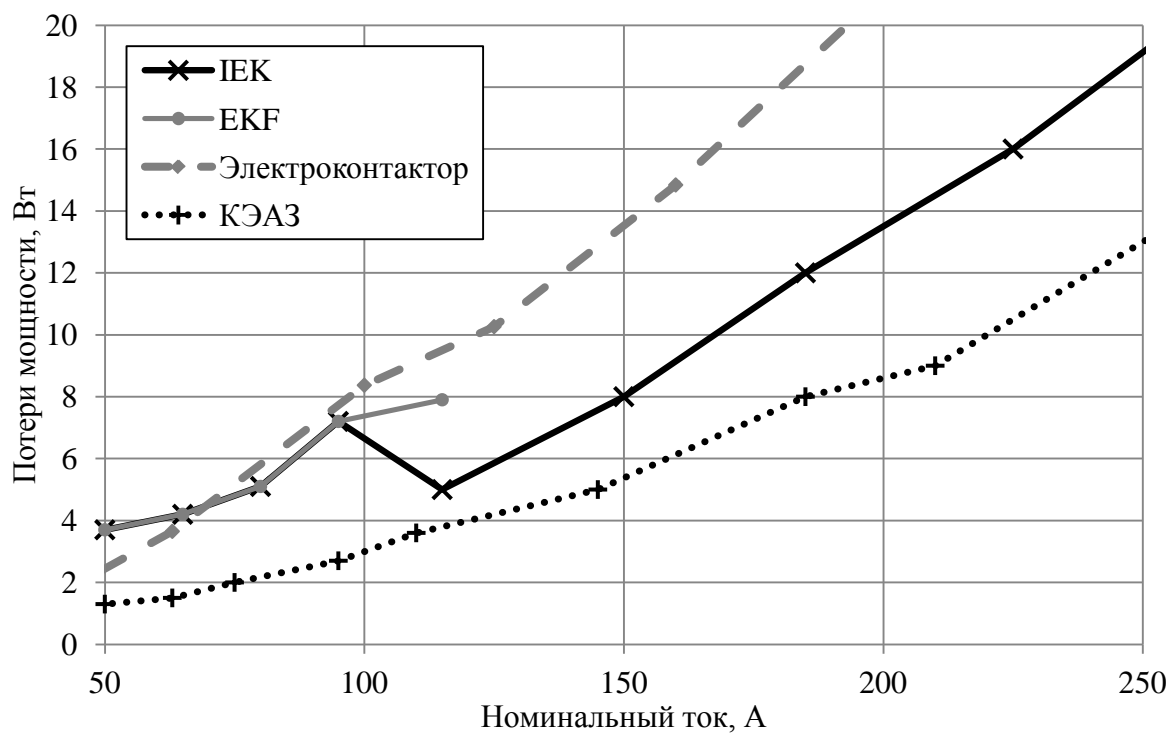


Рисунок 2.5—Зависимости потерь мощности в контактных системах контакторов от их номинального тока ($I_H = 50 \div 250$ А)

Наиболее энергоэффективные с точки зрения меньших потерь – контакторы завода КЭАЗ, аппараты других рассматриваемых фирм имеют примерно равную энергоэффективность.

Сопротивление контактных соединений и контактов НКА определяется по выражению

$$R = \frac{\Delta P}{I_n^2}, \quad (2.1)$$

где ΔP – потери мощности, находятся по каталожным данным;

I_n – номинальный ток аппарата.

Таблица 2.5– Технические данные контактных систем автоматических выключателей

Ном. ток, I_n А	Потери мощности, Вт				Сопротивление, мОм			
	IEK	КЭАЗ	ЕКФ	Контактор	IEK	КЭАЗ	ЕКФ	Контактор
1	1,2	-	1,2	3	1200	-	1200	3000
2	1,3	-	1,3	3	325	-	325	750
3	1,3	-	1,3	3	144,4	-	144,4	333,3
4	1,4	-	1,4	3	87,5	-	87,5	187,5
6	1,8	3	1,8	3	50	83,3	50	83,3
10	1,9	3	2,1	3	19	30,0	21	30
16	2,7	3,5	2,6	3,5	10,5	13,7	10,2	13,7
20	3	4,5	3	4,5	7,5	11,3	7,5	11,3
25	2,8	4,5	3	4,5	4,5	7,2	4,8	7,2
32	3,1	6	3,2	6	3,03	5,86	3,13	5,86
40	3,7	7,5	4,1	7,5	2,31	4,69	2,56	4,69
50	4,5	9	4,8	9	1,80	3,60	1,92	3,60
63	5,2	13	5,2	13	1,31	3,28	1,31	3,28
80	7,1	15	7,1	15	1,11	2,34	1,11	2,34
100	7,5	15	8,7	20	0,75	1,50	0,87	2,00
125	8,3	20	10,1	-	0,53	1,28	0,65	-
160	10	-	10	-	0,39	-	0,39	-
250	16,7	-	16,7	-	0,27	-	0,27	-
400	20	-	21,7	18,3	0,13	-	0,14	0,11
800	28,4	-	28,3	80	0,04	-	0,04	0,13

В таблице 2.5 представлены данные о потерях мощности (каталожные данные) и вычисленные по формуле (2.1) сопротивления контактных соединений и контактов автоматических выключателей [104].

По результатам исследований параметров автоматических выключателей [47] построены графики зависимости сопротивлений контактных систем аппаратов от номинального тока (рисунок 2.6).

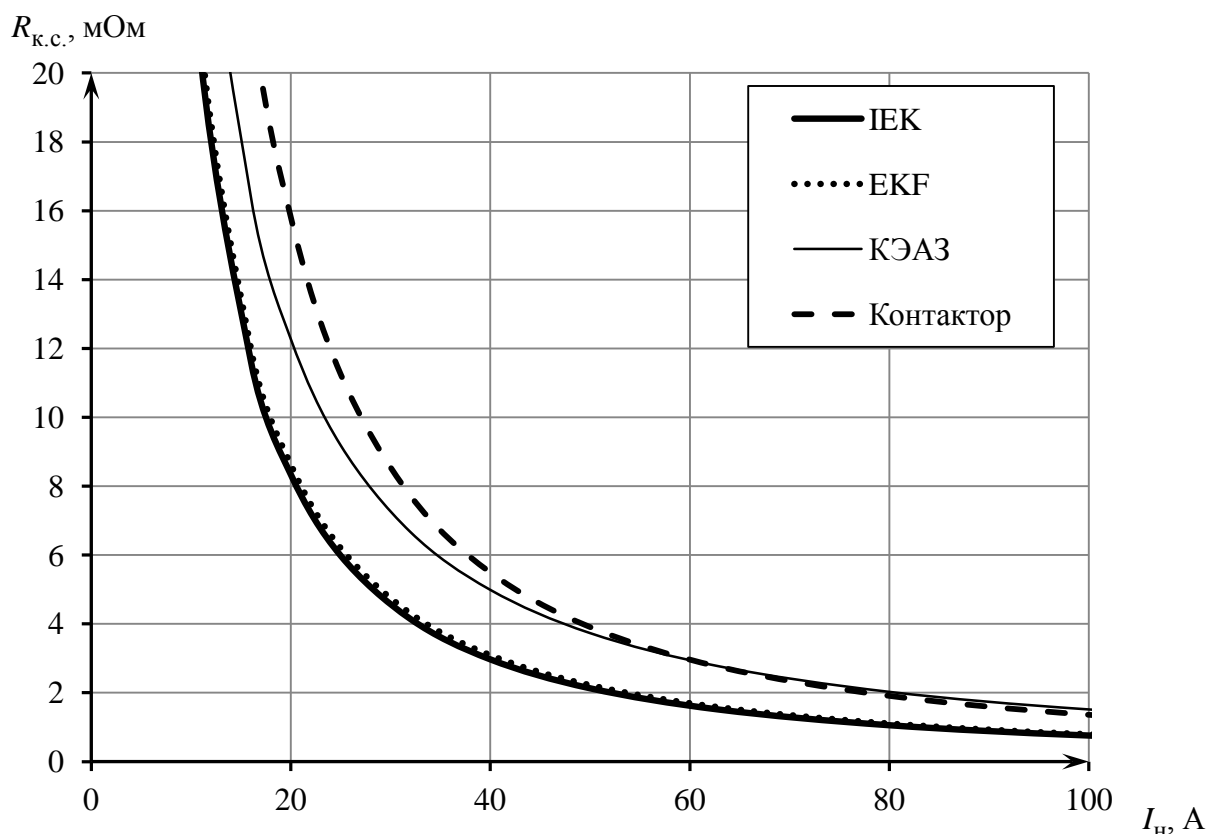


Рисунок 2.6–Графики зависимости сопротивлений контактных систем $R_{к.с.}$ автоматических выключателей от номинального тока I_H

Приведенные данные (рис. 2.6) показывают, что автоматические выключатели фирмы IEK имеют в основном меньшие потери мощности и сопротивление контактных соединений за исключением аппаратов на номинальный ток 16 А, что позволяет применять их с наибольшей энергоэффективностью.

2.2. Особенности и результаты измерения сопротивления контактных соединений и контактов низковольтных коммутационных аппаратов

Для определения зависимостей сопротивлений контактов и контактных соединений НКА от номинального тока необходимо исследовать параметры аппаратов экспериментальными методами.

Для контроля состояния контактов существуют следующие методы измерения сопротивления контактов:

- с помощью микроомметров;
- методом амперметра-вольтметра;
- двойными мостами.

Измерение сопротивления контактов и контактных соединений автоматических выключателей, как правило, производится при помощи микроомметров [34].

Микроомметр МІ 3242 предназначен для измерения сопротивления выключателей, переключателей, шин, обмоток двигателей и генераторов, силовых трансформаторов и других сопротивлений с помощью испытательного тока до 2А.

Микроомметр МІ 3242 имеет четыре режима работы:

- измерение электрического сопротивления постоянному току;
- измерение сопротивления с индуктивной составляющей (обмотки трансформаторов и электрических машин);
- настройка микроомметра;
- зарядка и проверка аккумуляторной батареи.

Микроомметр МІ 3242 обеспечивает измерение сопротивлений в диапазоне от 1·мкОм до 199,9 Ом. Измеренные результаты высвечиваются на экране дисплея с указанием единиц измерения, обозначенных символами: $m\Omega$ (мОм), Ω (Ом).

Погрешность измерения сопротивлений ($R_{изм}$) зависит от единицы младшего разряда (емр.). Погрешность и диапазон измерения сопротивления микроомметром МІ 3242 представлены в таблице 2.6.

Таблица 2.6– Диапазон и погрешность измерения сопротивления

Измеряемый ток	Диапазон измерения	Разрешение	Погрешность
2 А	0,000÷9,999 мОм	1 мкОм	$\pm(0,0025 \times R_{\text{изм}} + 2\text{емр})$
	10,00÷99,99 мОм	10 мкОм	
	100,0÷999,9 мОм	100 мкОм	
100 мА	0,00÷99,99 мОм	10 мкОм	
	100,0÷999,9 мОм	100 мкОм	
	1,000÷9,999 Ом	1 мОм	
	10,00÷19,99 Ом	10 мОм	
10 мА	0,0÷999,9 мОм	100 мкОм	
	1,000÷9,999 Ом	1 мОм	
	10,00÷99,99 Ом	10 мОм	
	100,0÷199,9 мОм	100 мОм	

Измерения производились в автоматическом режиме (однократное двунаправленное измерение) током из диапазона от 10 мА до 2 А. Измеряемый ток выбирался автоматически по следующему правилу:

$$I_{\text{изм}} = \frac{U_{\text{вых.макс}}}{R_x}, \quad (2.2)$$

где $U_{\text{вых.макс}}$ – максимальное выходное напряжение 9 В; R_x – значение измеряемого сопротивления.

Время измерения 1 сек для однократного режима и не имеет ограничения для непрерывного режима.

Принцип действия микрометра МІ 3242, как и других подобных приборов, основан на определении падения напряжения, на измеряемом сопротивлении. Это падение напряжения вызвано протеканием постоянного измерительного тока. Измерение активного сопротивления производится дважды в автоматическом режиме, при различных направлениях тока измерения.

Микроомметр выбирает необходимое значение тока, в зависимости от величины сопротивления, и замеряет падение напряжения на сопротивлении. Микроконтроллер, получая значение падения напряжения и значение измерительного тока, вычисляет и выдает на экран значение сопротивления, обрабатывая команды, с блока управления, обеспечивая общение с оператором.

В микроомметр МІ 3242 (рисунок 2.7) встроена память на 1500 ячеек, имеется возможность проведения до 800 измерений при нагрузке 500 мОм, токе измерения 2 А и длительности каждого измерения до 15 сек. Степень защиты прибора IP 40, рекомендуемый температурный диапазон ± 20 С. В микроомметре установлен матричный дисплей с подсветкой, разрешением 128x64 пикселей.



Рисунок 2.7– Внешний вид микроомметра МІ 3242

Условные обозначения

1	ЖК дисплей	Матричный дисплей с разрешением 128x64 пикселей с подсветкой
4	TEST	Начало измерений / подтверждение выбранной опции
5	ВВЕРХ	Изменение выбранного параметра
6	ВНИЗ	
7	MEM	Сохранение / вызов результатов из памяти прибора
8 11	Переключатель функций	Выбор измерительной функции
9	Подсветка	Изменение уровня подсветки и контрастности
10	ВКЛ / ВЫКЛ	Включение / Выключение прибора
12	HELP	Вход в меню помощи
13	Табулятор	Выбор параметра в выбранной функции
2	Не соответствует	Красный индикатор
3	Соответствует	Зеленый индикатор

Питание микроомметра производится от шести перезаряжаемых NiMH аккумуляторов, либо щелочных батарей размером типа АА. Подзарядка аккумулятора производится от сети 220 В / 50 Гц, ток заряда регулируется внутренней цепью и составляет 250 мА.

Схема подключения при измерении сопротивления НКА представлена на рисунке 2.8.

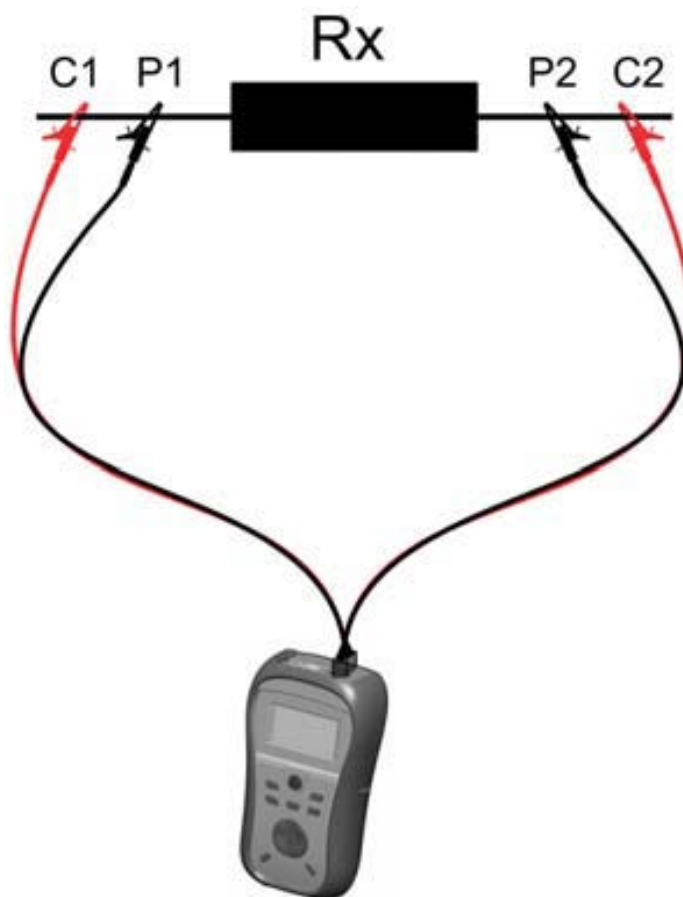


Рисунок 2.8– Схема подключения для измерения сопротивлений

При измерении сопротивлений до 20 Ом для достижения наивысшей точности рекомендуется использовать 4-проводный метод измерения (рисунок 2.9). При использовании данного метода в результат измерения не включается сопротивление измерительных проводов, к тому же нет необходимости в калибровке и компенсации проводов.

Измерительный ток протекает через неизвестное сопротивление R_x по проводам C1 и C2. Расположение данных проводов не имеет большого значения, но они всегда должны размещаться за проводами P1 и P2. Падение напряжения на R_x измеряется между P1 и P2, поэтому потенциальные провода должны быть расположены точно в тех точках, между которыми измеряется сопротивление.

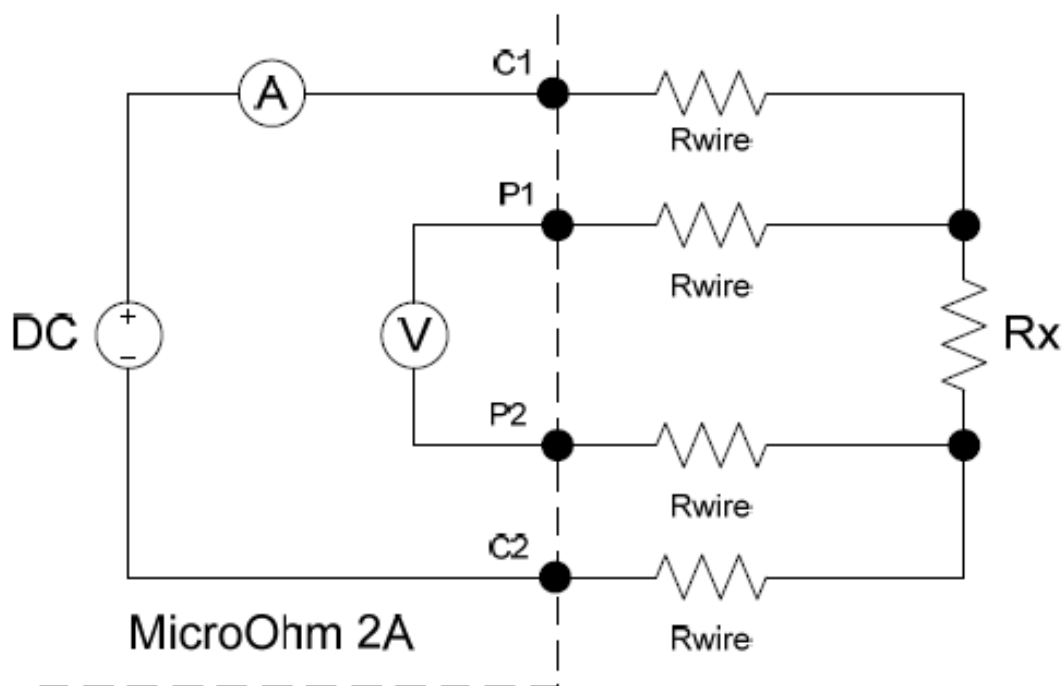


Рисунок 2.9– 4-проводный метод Кельвина

На рисунке 2.10 представлена принципиальная схема микроомметра МІ 3242. При подключении щупов T ток от батарей аккумуляторов создает в сопротивлении R напряжение, подаваемое на обмотку измерительного прибора 1. Посредством щупов II на обмотку микроомметра 2 подается напряжение, возникающее в измеряемом сопротивлении R_x . В обмотке 1 ток создает противодействующий момент, стремящийся установить значение на 0, а в обмотке 2 ток создает рабочий момент, пропорциональный падению напряжения на сопротивлении R_x . Прибор, отградуированный в Омах, показывает при этом значение сопротивления контактного соединения аппарата (R_x).

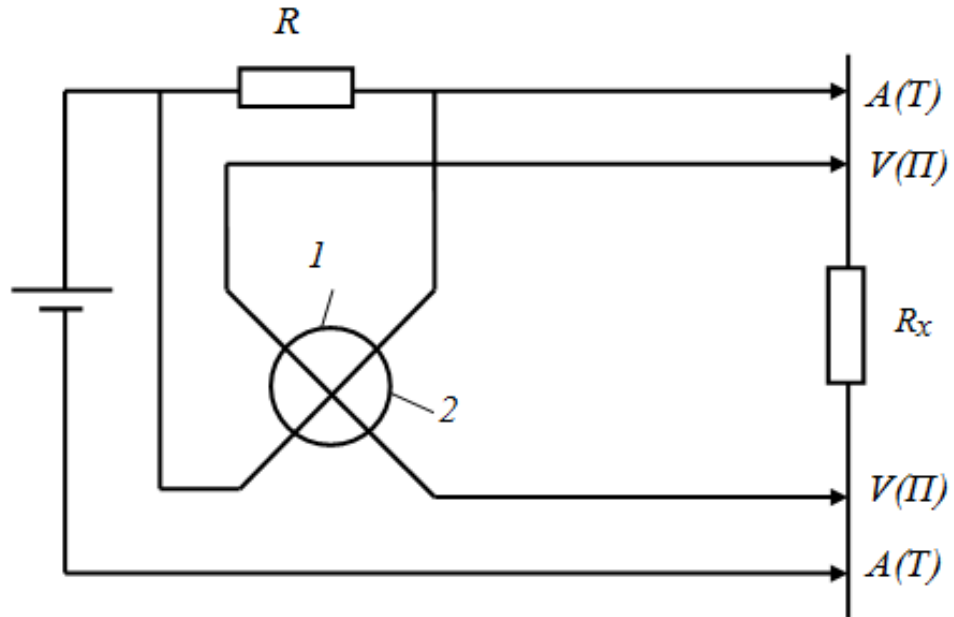


Рисунок 2.10– Принципиальная схема измерения сопротивления микроомметром МІ 3242

Достоверность эксперимента по определению сопротивления контактных соединений и контактов автоматических выключателей проверялась по минимально необходимому количеству аппаратов выборки [17; 65], чтобы погрешность измеренных значений не превышала $\Delta \leq 0,5\%$ с вероятностью $P = 0,995$.

Минимально достаточный объем выборки для оценки математического ожидания значения сопротивления с заданной достоверностью P и точностью $\Delta, \%$, находится по выражению

$$\omega = \left(\frac{\tau \gamma_y \cdot 100}{\Delta} \right)^2, \quad (2.3)$$

где τ - параметр, зависящий от значения желаемой достоверности P (при $P = 0,995$; $\tau = 2$);

γ_y – генеральный коэффициент вариации или мера рассеяния величины y , определяемая по выражению:

$$\gamma_y = \sigma / M_y. \quad (2.4)$$

Мера рассеяния величины y по выражению(2.4) принимает значение: $\gamma = 0,006$, тогда минимально достаточный объем выборки, для обеспечения погрешности 0,5 % по (2.3) составляет: $\omega = \left(\frac{2 \cdot 0,006 \cdot 100}{0,5} \right)^2 \approx 6$.

Следовательно, минимально необходимый объем выборки определения сопротивления контактных соединений, при показателе достоверности $P = 0,995$, составляет минимум 6 аппаратов, когда в эксперименте количество автоматов с $I_H = 4; 16; 25; 63; 100; 160$ А составило по 15 аппаратов.

По средним результатам экспериментальных данных измерений сопротивлений контактных систем автоматических выключателей и контакторов отечественных фирм построены зависимости от номинального тока (рисунки 2.11, 2.13).

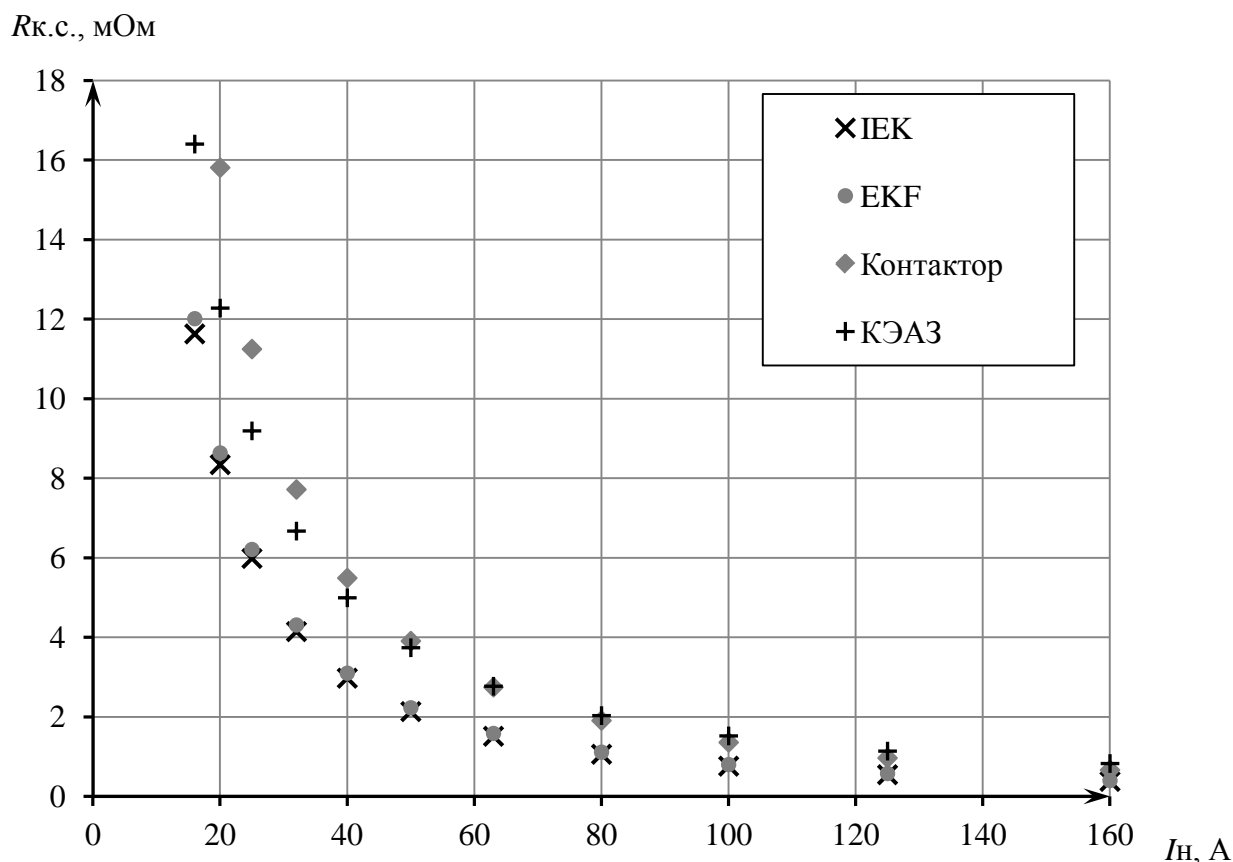


Рисунок 2.11—Экспериментальные зависимости сопротивления контактных систем автоматических выключателей от номинального тока

Аппроксимации зависимости сопротивления в контактных системах автоматических выключателей различных заводов-изготовителей от номинального тока приведены в таблице 2.7.

Таблица 2.7– Виды аппроксимирующих функций зависимостей сопротивлений контактных систем автоматических выключателей от их номинального тока

Фирма	Аппроксимирующая функция
IEK	$R_{ав} = 4,39 \cdot 10^{-3} \cdot I_H^{-2,02} + 1,08$
EKF	$R_{ав} = 1,99 \cdot I_H^{-2} + 0,08 \cdot I_H^{-3} - 1,45 \cdot 10^{-4} + 1,15 \cdot 10^{-7} \cdot I_H$
Контактор	$R_{ав} = 2,07 \cdot e^{0,02 \cdot I_H} \cdot I_H^{-2} - 0,43 \cdot I_H^{-2}$
КЭАЗ	$R_{ав} = 1,84 \cdot I_H^{-2} + 0,07 \cdot I_H^{-3} - 1,45 \cdot 10^{-4} + 1,15 \cdot 10^{-7} \cdot I_H$

Влияние на сопротивление контактных соединений низковольтных коммутационных аппаратов коэффициента загрузки (K_3) приведено на рисунке 2.12

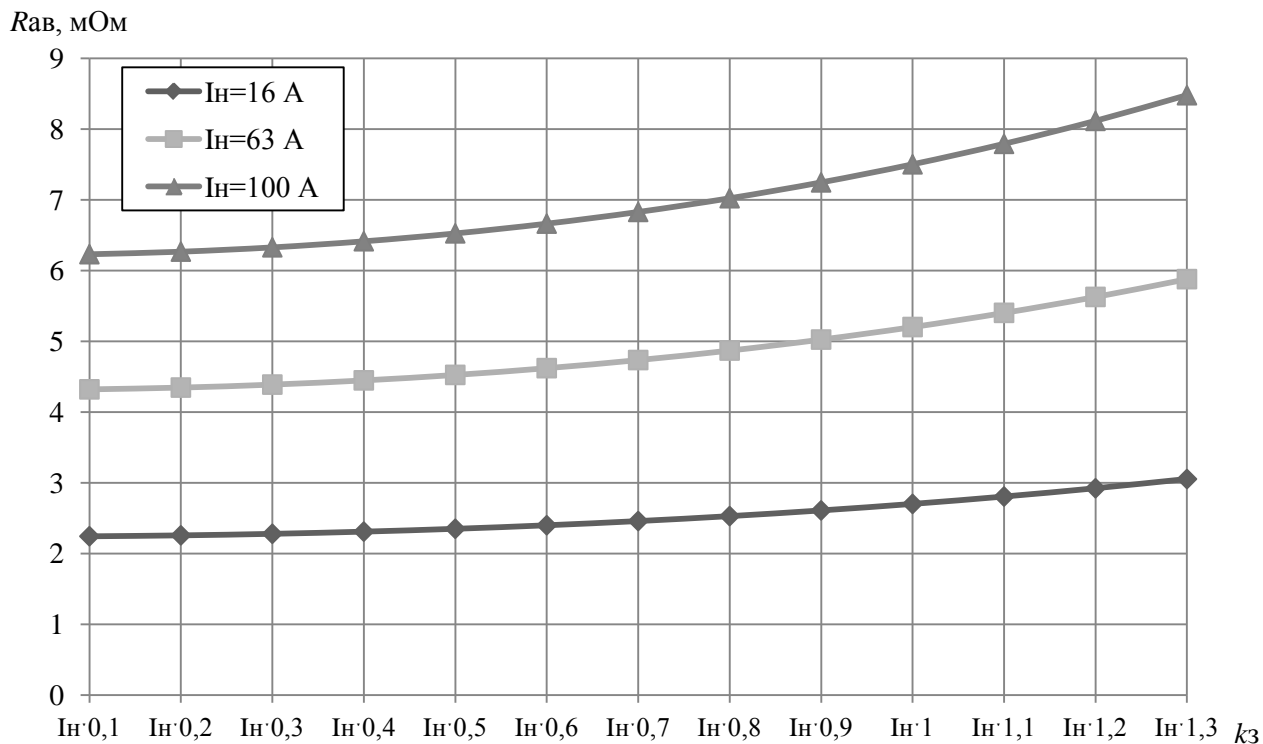


Рисунок 2.12– График зависимости изменения сопротивления контактов автоматических выключателей от коэффициента загрузки аппарата ($k_3 = 0,1 \div 1,3$)

На рисунке 2.12 приведены зависимости сопротивления от коэффициента загрузки для автоматических выключателей фирмы IEK на номинальные токи 16, 63 и 100 А.

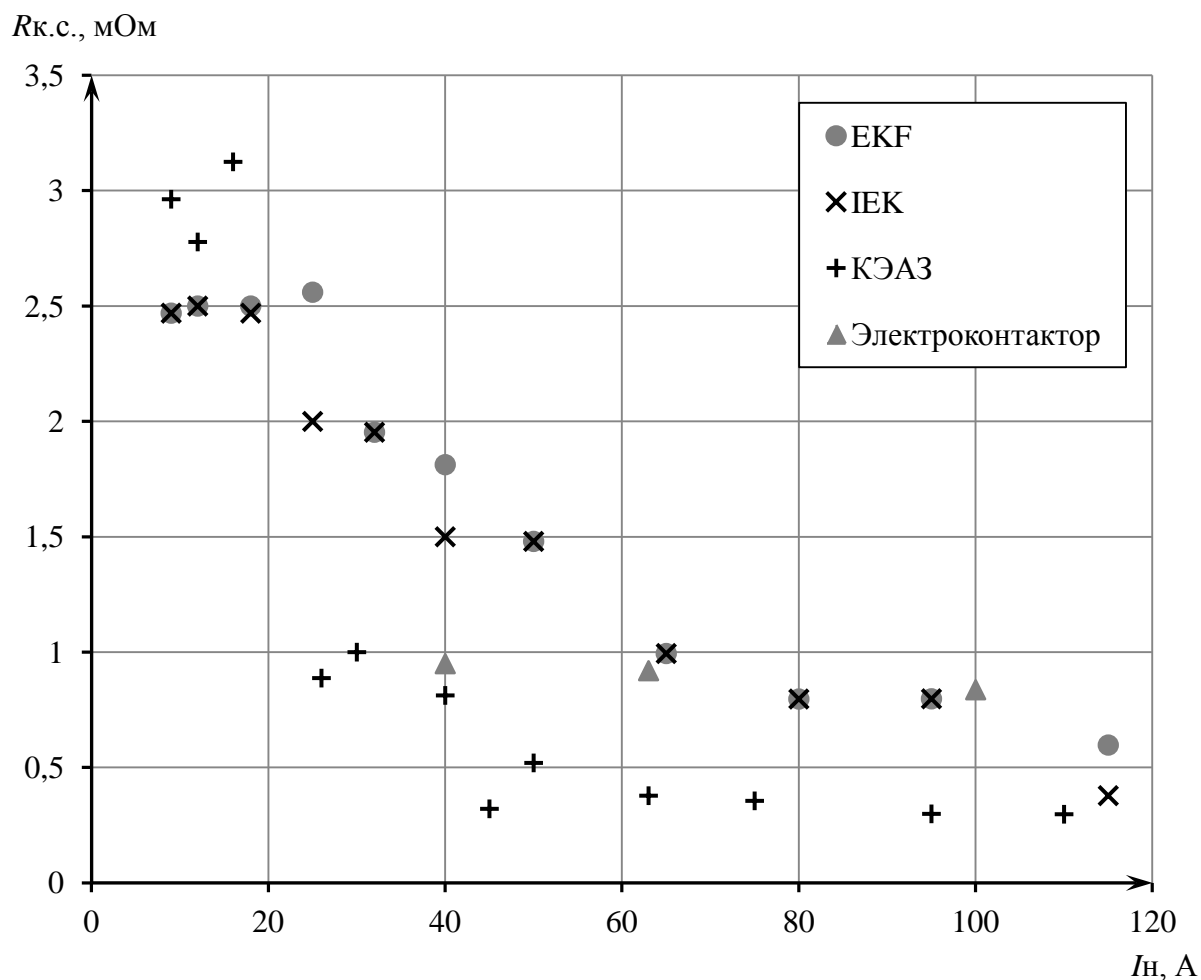


Рисунок 2.13—Экспериментальные зависимости сопротивления контактных систем контакторов от номинального тока

Результаты измерений сопротивлений контактных соединений магнитных пускателей фирм: IEK, EKF, КЭАЗ и «Электроконтактор» представлены на рисунке 2.14.

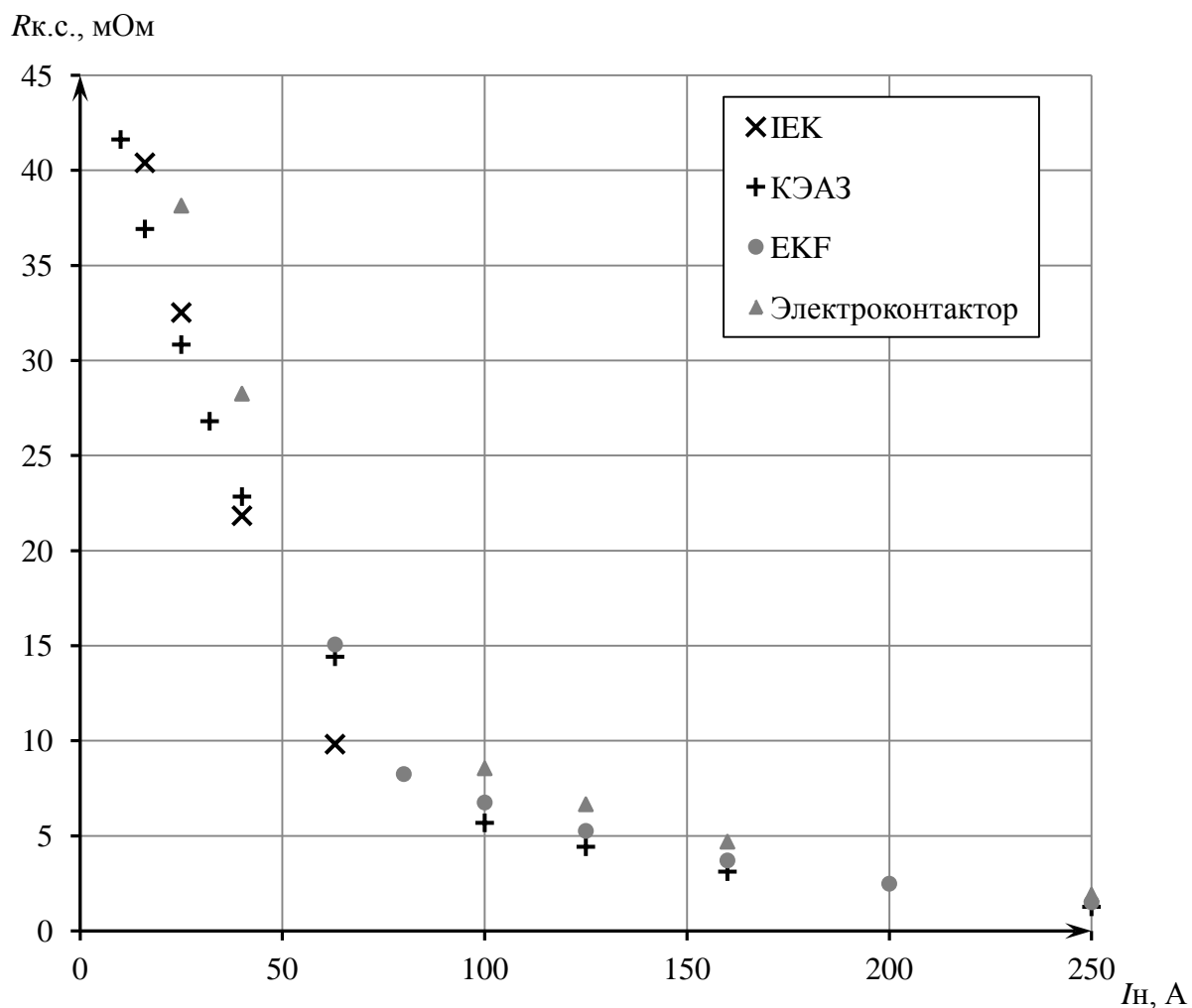


Рисунок 2.14—Экспериментальные зависимости сопротивления контактных систем магнитных пускателей от номинального тока

Данные при аппроксимации в программе Mathcad 14 зависимостей сопротивления контактных соединений контакторов и магнитных пускателей от номинального тока, построенных по результатам экспериментальных значений (рисунки 2.13, 2.14) представлены в таблице 2.8.

Таблица 2.8– Виды аппроксимирующих функций зависимостей сопротивлений контактных соединений контакторов и магнитных пускателей от номинального тока

Аппараты	Фирма	Аппроксимирующая функция
Контакторы	IEK	$R_K = 4,84 \cdot 10^{-4} \cdot I_H^{-2,01} + 0,06$
	EKF	$R_K = -86,4 \cdot e^{-8,9 \cdot I_H} \cdot I_H^{-2} + 86 \cdot I_H^{-2}$
	Электро- контактор	$R_K = 0,18 \cdot I_H^{-2} + 0,01 \cdot I_H^{-3} - 6,9 \cdot 10^{-4} - 4,48 \cdot 10^{-7} \cdot I_H$
	КЭАЗ	$R_K = 1,88 \cdot I_H^{-2} + 0,02 \cdot I_H^{-3} - 2,1 \cdot 10^{-4} - 3,26 \cdot 10^{-7} \cdot I_H$
Магнитные пускатели	IEK	$R_{МП} = 6472 \cdot I_H^{-1,69}$
	EKF	$R_{МП} = -72,1 \cdot e^{-6,5 \cdot I_H} \cdot I_H^{-2} + 64 \cdot I_H^{-2}$
	Электро- контактор	$R_{МП} = 2,35 \cdot I_H^{-2} + 0,04 \cdot I_H^{-3} - 1,1 \cdot 10^{-4} + 5,14 \cdot 10^{-7} \cdot I_H$
	КЭАЗ	$R_{МП} = 0,25 \cdot I_H^{-2} + 0,03 \cdot I_H^{-3} - 7,7 \cdot 10^{-4} + 5,12 \cdot 10^{-7} \cdot I_H$

Результаты экспериментальных исследований сопротивлений контактных соединений НКА показывают, что автоматические выключатели фирм IEK и EKF с $I_H = 4 \div 160$ А имеют более низкие значения сопротивлений в отличие от автоматов других заводов-изготовителей. Контакторы с номинальными токами в диапазоне $I_H = 25 \div 400$ А завода КЭАЗ обладают наименьшим сопротивлением контактных соединений среди рассмотренных аппаратов из того же ряда номинальных токов. Минимальным сопротивлением контактных систем магнитных пускателей с $I_H = 10 \div 250$ А обладают произведенные заводом КЭАЗ, за исключением аппаратов фирмы EKF на $I_H = 40$ и 63 А. Учитывая, что контактодержатели НКА всех фирм-производителей изготовлены из меди, то более низкое сопротивление контактных систем НКА, обеспечивается за счёт

наличия покрытия, конструкции и обработки поверхности контактного соединения.

2.3. Исследование влияния основных параметров оборудования на величину эквивалентного сопротивления цеховых сетей

Как известно, эквивалентное сопротивление схемы цеховой сети является определяющим параметром для расчета потерь электроэнергии[97] и, следовательно, расхода электроэнергии.

Потери электроэнергии, определяемые квадратом эффективного тока и эквивалентным сопротивлением схемы, являются одним из важнейших показателей, характеризующим экономичность работы сетей. Определение величины потерь с минимально возможной погрешностью необходимо для решения задач, возникающих при планировании расходов электроэнергии и эксплуатации цеховых сетей[57].

При планировании электропотребления наиболее экономичные решения выбираются путем комплексного анализа множества факторов[109], в числе которых фактор учета потерь электроэнергии, наряду с величиной расхода на технологию является одним из доминирующих[66].

При планировании электропотребления и оценке потерь в качестве основной характеристики схемы с различным набором количества и типа аппаратов, установленных на линии, используется эквивалентное сопротивление всей цепи. Целесообразно исследовать влияние технических характеристик оборудования на величину эквивалентного сопротивления цеховой сети. В результате проведенных исследований установлено, что эквивалентное сопротивление одной линии $R_{\text{ЭК}}(t)$ складывается из сопротивления линии и суммы сопротивлений контактных систем аппаратов, установленных на данной линии[110]:

$$R_{\text{ЭК}}(t) = r_{20} \cdot l \left[1 + \alpha (\Theta_{\text{пр}} - 20^\circ) \right] + \sum_{i=1}^k r_{i,\text{ап}}, \quad (2.5)$$

где $r_{i,ап}$ – сопротивления контактных соединений установленных на линии НКА по данным таблиц 2.7, 2.8

l – длина линии, м;

r_{20} – удельное сопротивление 1 м проводника при температуре 20°C , мОм/м;

α – температурный коэффициент увеличения сопротивления материала проводника линии, для меди равный $0,00441/^{\circ}\text{C}$, для алюминия $0,00421/^{\circ}\text{C}$ [28].

Температура нагрева токопроводящей жилы определяется по выражению [90]:

$$\Theta_{пр} = k_3^2 \cdot (T_{доп} - \Theta_{окр}) + \Theta_{окр}, \quad (2.6)$$

k_3^2 – среднеквадратичный коэффициент загрузки линии;

$T_{доп}$ – допустимая температура жилы кабеля, определяется по справочным данным;

$\Theta_{пр}$ – температура жилы провода, изменяющаяся в зависимости от температуры среды и загрузки линии, $^{\circ}\text{C}$ [58; 60];

$\Theta_{окр}$ – температура окружающей среды.

Для оценки степени влияния основных факторов, определяющих эквивалентное сопротивление цеховой сети, исследуем параметры схемы электроснабжения участка механического цеха с преобладанием радиальных линий (рисунок 2.15).

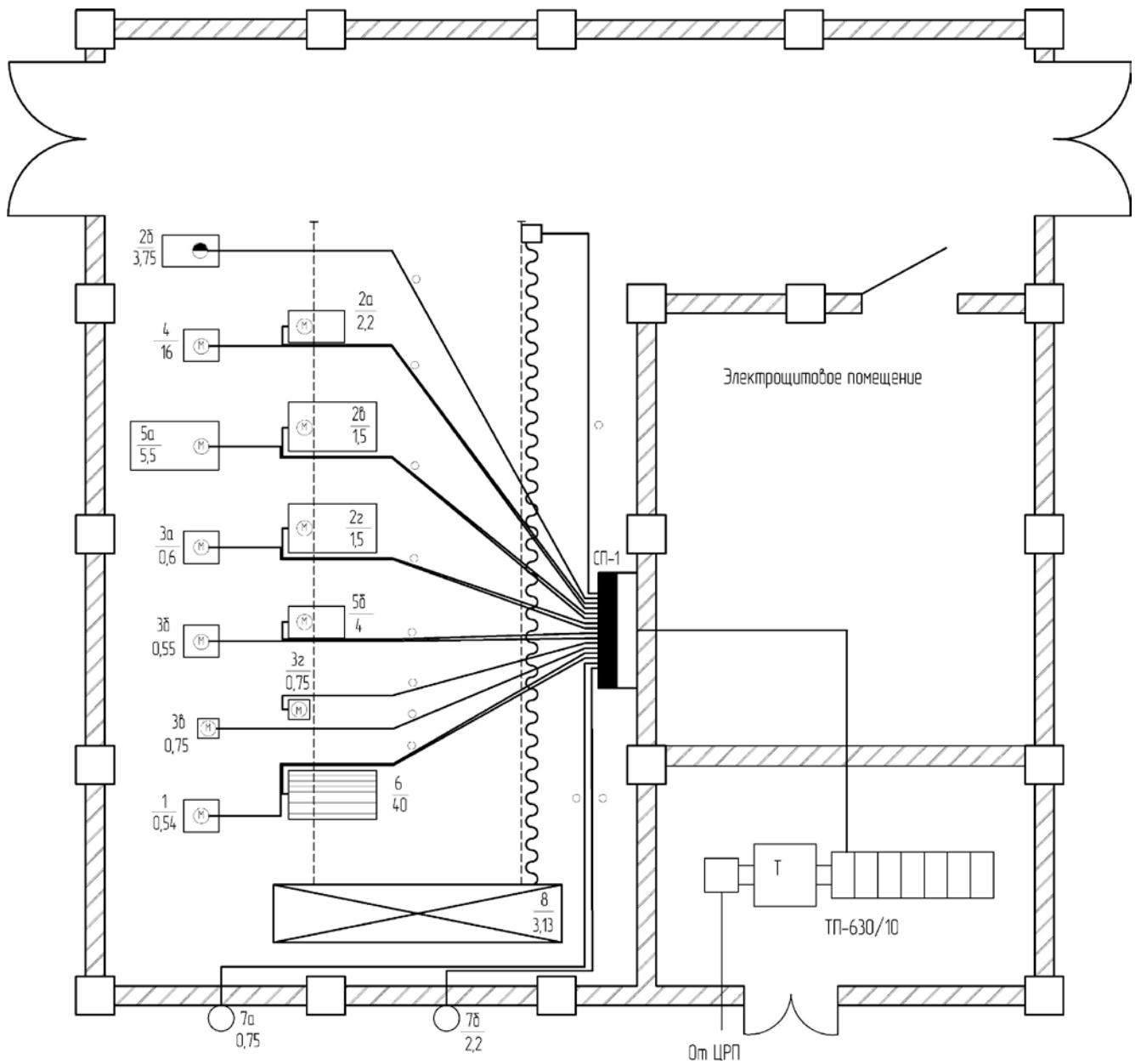


Рисунок 2.15– Радиальная схема электроснабжения участка механического цеха

В таблице 2.9 приведены характеристики электрооборудования участка механического цеха.

Таблица 2.9– Характеристики электрооборудования участка механического цеха

Наименование электроприемников	Номер линии на схеме	Мощность приемника P_n , кВт	Расчетный ток в линии I_p , А	Допустимый длительный ток $I_{доп}$, А	Кабель			Удельное сопротивление провода r_0 , мОм/м	Количество автоматов приемников электроэнергии	Количество магнитных пускателей приемников электроэнергии	Коэффициент загрузки линии, K_3
					Марка	Сечение, $мм^2$	Длина, м				
1. Настольный сверлильный станок	Л1	0,54	2,89	19	ВВГнг-LS	5x1,5	17,3	12,3	1	1	0,15
2в. Универсально-фрезерный станок	Л12	3,75	13,41	19	ВВГнг-LS	5x1,5	15,6	12,3	1	1	0,71
2г. Универсально-фрезерный станок	Л11	1,5	6,00	19	ВВГнг-LS	5x1,5	14,4	12,3	1	1	0,32
3а. Токарный станок	Л4	0,6	2,57	19	ВВГнг-LS	5x1,5	15,8	12,3	1	1	0,14
3б. Токарный станок	Л3	0,55	2,35	19	ВВГнг-LS	5x1,5	15,1	12,3	1	1	0,12
3в. Токарный станок	Л2	0,75	3,17	19	ВВГнг-LS	5x1,5	15,4	12,3	1	1	0,17
3г. Токарный станок	Л9	0,75	3,17	19	ВВГнг-LS	5x1,5	13,9	12,3	1	1	0,17
5а. Компрессор	Л5	4	8,22	19	ВВГнг-LS	5x1,5	16,9	12,3	1	1	0,43
5б. Компрессор	Л10	5,5	11,17	19	ВВГнг-LS	5x1,5	13,8	12,3	1	1	0,59
6. Настольный сверлильный станок	Л8	4	21,40	26	ВВГнг-LS	5x2,5	14,8	7,4	1	1	0,82
2а. Универсально-фрезерный станок	Л13	2,2	8,05	19	ВВГнг-LS	5x1,5	17,2	12,3	1	1	0,42
2б. Универсально-фрезерный станок	Л7	1,5	5,56	19	ВВГнг-LS	5x1,5	20,5	12,3	1	1	0,29
4. Настольный сверлильный станок	Л6	5	26,75	34	ВВГнг-LS	5x4	18,6	4,63	1	1	0,79
7а. Вентилятор	Л14	0,75	1,98	19	ВВГнг-LS	5x1,5	22,4	12,3	1	1	0,10
7б. Вентилятор	Л15	2,2	4,85	19	ВВГнг-LS	5x1,5	16,6	12,3	1	1	0,26
8. Кран-балка электрическая опорная грузоподъемность 16 т	Л16	3,13	12,77	19	ВВГнг-LS	5x1,5	15,6	12,3	1	1	0,67
Итого по СП-1:		26,9	40,91	45	ВВГнг-LS	5x6	16,3	3,09	1	-	0,91

Эквивалентное сопротивление радиальной сети определяется по выражению[16]:

$$R_{\text{ЭКВ}} = \frac{\frac{\sum_{i=1}^n r_{i,20} \cdot l_i}{n} \left[1 + \alpha(\Theta_{i,\text{пр}} - 20^\circ) \right] + \frac{\sum_{i=1}^m r_{i,\text{ап}}}{n}}{n}, \quad (2.7)$$

где n – количество приемников электроэнергии;

m – количество аппаратов в схеме.

Для определения эталонного эквивалентного сопротивления поэлементно находятся потери мощности в каждой линии участка радиальной сети ΔP_i

$$R_{\text{э}} = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta P_i}{3I_{\text{сум}}^2} = \frac{\sum_{i=1}^n I_{i,\text{р}}^2 \left\{ r_{i,20} \cdot l_i \left[1 + \alpha(\Theta_{i,\text{пр}} - 20^\circ) \right] + \sum_{i=1}^N r_{i,\text{ап}} \right\}}{I_{\text{сум}}^2}, \quad (2.8)$$

где $I_{i,\text{р}}$ – расчетный ток i -го участка сети, А;

l_i – длина линии i -го участка сети, м;

$r_{i,20}$ – удельное сопротивление 1 м линии при 20°C i -го участка сети, мОм/м;

$\Theta_{i,\text{пр}}$ – температура токопроводящей жилы i -го участка сети, зависящая от коэффициента загрузки линии и от температуры окружающей среды, $^\circ\text{C}$;

$r_{i,\text{ап}}$ – сопротивление контактных систем коммутационных аппаратов i -го участка сети, установленных на линии, мОм;

$I_{\text{сум}}$ – суммарный ток n -го количества электроприемников, А;

n – количество приемников электроэнергии;

N – количество аппаратов на линии.

Результаты расчетов сопротивления линий без учета нагрева провода и с учетом аппаратов приведены в таблице 2.10.

Таблица 2.10– Результаты вычислений сопротивлений радиальных линий с учетом различных параметров оборудования при поэлементном расчете

Номер линии на схеме	Сопротивление линии без учета нагрева провода, мОм	Сопротивление линии с учетом нагрева провода, мОм	Сопротивление автоматов, мОм	Сопротивление магнитных пускателей, мОм	Суммарное сопротивление линии, мОм
Л1	212,8	213,8	116,33	82,50	412,68
Л12	191,9	212,3	21,81	51,56	285,70
Л11	177,1	180,9	43,63	82,50	307,02
Л4	194,3	195,1	116,33	82,50	393,93
Л3	185,7	186,3	116,33	82,50	385,17
Л2	189,4	190,5	87,25	82,50	360,30
Л9	171,0	172,0	87,25	82,50	341,74
Л5	207,9	216,2	34,90	83	333,59
Л10	169,7	182,3	21,81	52	255,67
Л8	109,5	125,4	12,28	33	170,68
Л13	211,6	219,7	34,90	82,50	337,10
Л7	252,2	256,8	58,17	82,50	397,44
Л6	86,1	97,5	10,91	26	134,21
Л14	275,5	276,2	174,50	82,50	533,16
Л15	204,2	207,0	58,17	82,50	347,70
Л16	191,9	210,4	21,81	51,56	283,79
СП-1	50,4	59,3	6,14	-	65,41

По результатам проведенных исследований установлены соотношения в эквивалентном сопротивлении радиальной сети сопротивления контактных соединений низковольтных аппаратов и сопротивления линий в зависимости от количества приемников электроэнергии, присоединенных к распределительному устройству (рисунок 2.16).

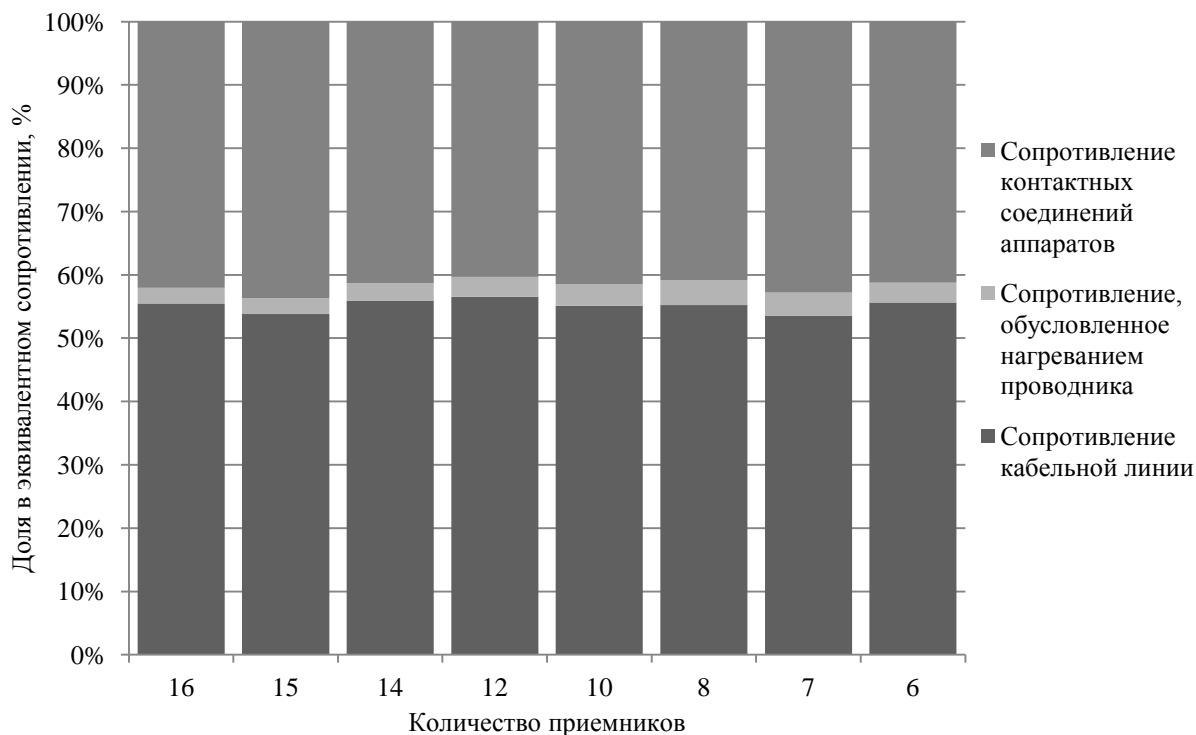


Рисунок 2.16–Соотношения в эквивалентном сопротивлении радиальной сети сопротивления контактных соединений низковольтных аппаратов и сопротивления линий, с учетом нагрева проводников

На рисунке 2.17 представлена динамика изменения значения эквивалентного сопротивления участка цеховой сети, представленного на рисунке 2.15, при учете и неучете таких параметров, как:

- нагрев проводников током нагрузки $\Theta_{\text{пр}}$ [73];
- сопротивления коммутационных аппаратов $r_{i,\text{ап}}$;
- k_3^2 - среднеквадратичный коэффициент загрузки линии.

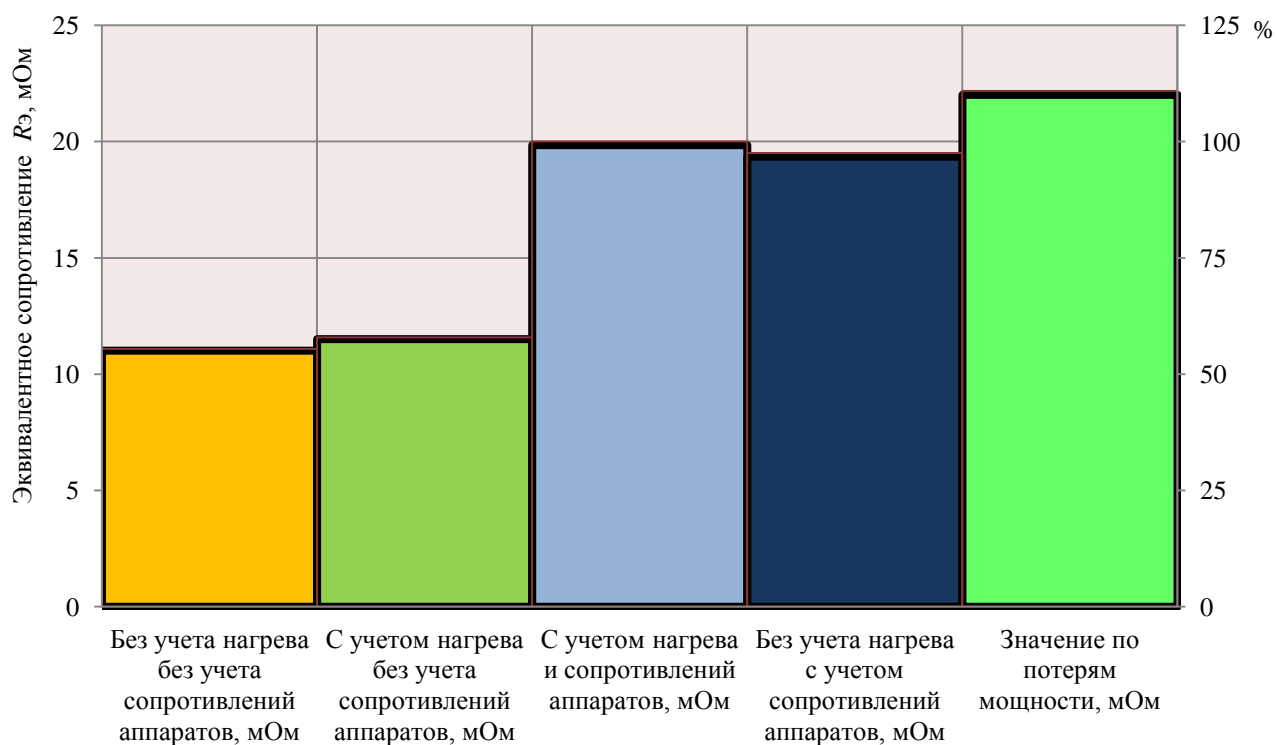


Рисунок 2.17– Значения эквивалентного сопротивления участка цеховой сети с учетом влияния основных параметров оборудования

Как показали исследования [105; 108], при расчете эквивалентного сопротивления в линиях цеховых сетей необходимо учитывать влияние нагрева проводников, обусловленного прохождением тока нагрузки и температурой окружающей среды [75;102]; сопротивлений контактных систем коммутационных аппаратов и их числа, так как цеховые линии содержат множество последовательно соединенных узлов с контактными соединениями, и сопротивление аппаратов соизмеримо с сопротивлением линии; а также необходимо учитывать среднеквадратичный коэффициент загрузки линий сети k_3^2 , что позволяет снизить погрешность вычисления эквивалентного сопротивления, а следовательно повысить точность вычисления величины потерь электроэнергии в цеховых сетях низкого напряжения.

Для оценки влияния схемных и режимных факторов на эквивалентное сопротивление исследуем параметры электрооборудования схемы участка механического цеха с преобладанием магистральных линий (рисунок 2.18).

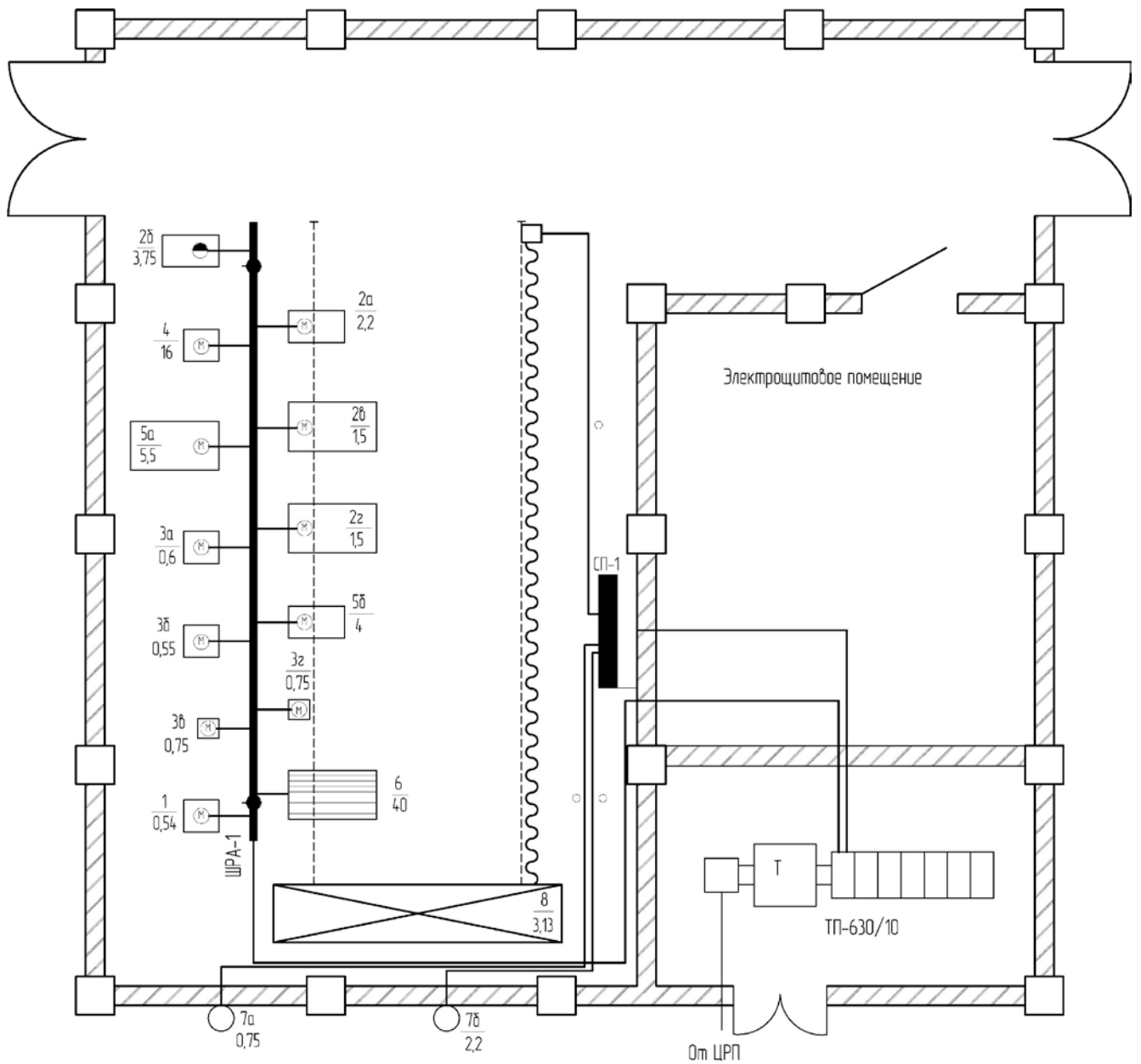


Рисунок 2.18– Магистральная схема электроснабжения участка механического цеха

Для магистральной сети, представленной шинопроводом с распределенной нагрузкой эквивалентное сопротивление шинопровода находится по выражению [16]:

$$R_{\text{экв ш}} = \left[r_{0, \text{ш}20} \cdot l_{\text{ш}} \cdot \frac{1}{6} \left(1 + \frac{1}{n} \right) \left(2 + \frac{1}{n} \right) \right] \cdot \left[1 + \alpha_{\text{ш}} (\Theta_{\text{ш}} - 20^\circ) \right] + \frac{r_{20} \cdot l_{\text{отв}}}{n} \left[1 + \alpha_{\text{отв}} (\Theta_{\text{пр}} - 20^\circ) \right] + \frac{\sum_{i=1}^N r_{i, \text{ап}}}{n}, \quad (2.9)$$

где $l_{\text{ш}}$ – длина шинпровода, м;

$r_{0,\text{ш}20}$ – сопротивление шинпровода длиной 1 м при температуре 20°C;

n – количество приемников электроэнергии, присоединенных к шинпроводу;

r_{20} – удельное сопротивление 1 м ответвительной линии при 20°C, мОм/м;

$\Theta_{\text{ш}}$ – температура шинпровода, °C,

$\Theta_{\text{пр}}$ – температура жилы провода, изменяющаяся в зависимости от температуры среды и загрузки линии, °C;

$l_{\text{отв}}$ – длина провода ответвления от шинпровода, м;

$\alpha_{\text{отв}}$ – температурный коэффициент увеличения сопротивления материала токопроводящей жилы ответвлений, для меди равный $0,00441/^\circ\text{C}$, для алюминия $0,00421/^\circ\text{C}$;

$\alpha_{\text{ш}}$ – температурный коэффициент увеличения сопротивления материала шинпровода, для меди равный $0,00441/^\circ\text{C}$;

$\sum_{i=1}^N r_{i,\text{ап}}$ – суммарное сопротивление контактных соединений НКА, установленных на одной линии, мОм;

N – число аппаратов на линии.

Питание электроприемников, подключенных к шинпроводу, осуществляется кабелями марки ВВГнг-LS. В таблице 2.11 приведены параметры линий участка механического цеха.

Определение значений сопротивления контактных соединений НКА осуществлялось по выражениям, представленным в таблицах 2.7, 2.8.

Таблица 2.11– Характеристики электрооборудования участка механического цеха.

Наименование электроприемников	№ линии	Номинальная мощность $P_{н}$, кВт	Длина линии l , м	Расчетный ток в линии I_p , А	Допустимый длительный ток $I_{доп}$, А	Сечение провода, мм ²	Удельное сопротивление кабеля r_0 , мОм/м	Количество автоматов и контакторов приемников электроэнергии	Количество магнитных пускателей приемников электроэнергии	Коэффициент загрузки линии k_3
1.Настольный сверлильный станок Alztronic 9	Л1	0,54	2,7	2,89	19	1,5	12,3	1	1	0,15
2в.Универсально-фрезерный станок MF4 Vario DPA	Л12	3,75	2,7	13,41	19	1,5	12,3	1	1	0,71
2г.Универсально-фрезерный станок Proma FHV-50P	Л11	1,5	2,7	6,00	19	1,5	12,3	1	1	0,32
3а.Токарный станок Opti D180x300 Vario	Л4	0,6	2,7	2,57	19	1,5	12,3	1	1	0,14
3б.Токарный станок BD-920W Jet	Л3	0,55	2,7	2,35	19	1,5	12,3	1	1	0,12
3в.Токарный станок Quantum D210x400	Л2	0,75	2,7	3,17	19	1,5	12,3	1	1	0,17
3г.Токарный станок Quantum D210x400	Л9	0,75	2,7	3,17	19	1,5	12,3	1	1	0,17
5а.Универсально-фрезерный станок MF2 Vario DPA	Л5	4	2,7	8,22	19	1,5	12,3	1	1	0,43
5б.Универсально-фрезерный станок MF4 Vario DPA	Л10	5,5	2,7	11,17	19	1,5	12,3	1	1	0,59
6.Токарный станок BD-920W Jet	Л8	0,55	2,7	2,35	19	1,5	12,3	1	1	0,12
2а.Универсально-фрезерный станок MF1 Vario	Л13	6,5	2,7	19,83	26	2,5	7,4	1	1	0,76
2б.Универсально-фрезерный станок MF2 Vario DPA	Л7	4	2,7	8,72	19	1,5	12,3	1	1	0,46
4.Универсально-фрезерный станок MF1 Vario	Л6	5	2,7	26,75	34	4	4,63	1	1	0,79
Canalis KNA-04 63 А	ШР	27,64	15	41,99	63	-	1,9	-	-	0,67

Результаты расчетов сопротивления контактных соединений шинпровода без учета и с учетом нагрева провода и секций шинпровода, а также сопротивления контактов аппаратов приведены в таблице 2.12.

Таблица 2.12– Результаты вычислений сопротивлений линий с учетом различных параметров при поэлементном расчете

Номер линии на схеме	Сопротивление линии без учета нагрева провода, мОм	Сопротивление линии с учетом нагрева провода, мОм	Сопротивление автоматов, мОм	Сопротивление магнитных пускателей, мОм	Суммарное сопротивление участка сети, мОм
Л1	33,21	33,37	116,33	82,50	232,21
Л12	33,21	36,75	21,81	51,56	110,12
Л11	33,21	33,92	34,90	82,50	151,32
Л4	33,21	33,34	116,33	82,50	232,17
Л3	33,21	33,32	116,33	82,50	232,15
Л2	33,21	33,41	87,25	82,50	203,16
Л9	33,21	33,41	87,25	82,50	203,16
Л5	33,21	34,54	34,90	82,50	151,94
Л10	33,21	35,67	21,81	51,56	109,04
Л8	33,21	33,32	116,33	82,50	232,15
Л13	19,98	22,47	15,35	33,00	70,82
Л7	33,21	34,71	34,90	82,50	152,11
Л6	12,50	14,16	10,91	25,78	50,84
ШР	10,62	12,0	-	-	22,08

На рисунке 2.19 представлена гистограмма соотношения в эквивалентном сопротивлении шинпровода сопротивлению контактных соединений низковольтных аппаратов, сопротивлений секций шинпровода и проводов отходящих линий, с учетом их нагрева.

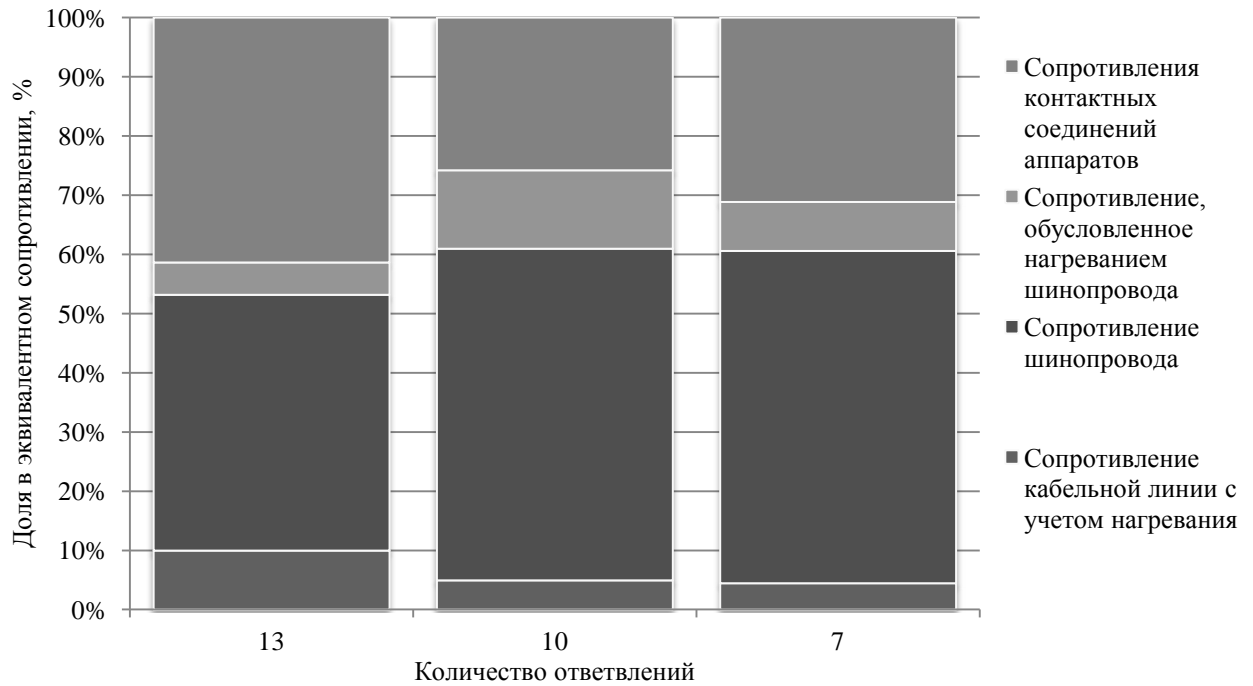


Рисунок 2.19–Соотношения в эквивалентном сопротивлении шинпровода сопротивления контактных соединений низковольтных аппаратов, секций шинпровода и проводов отходящих линий, с учетом нагрева проводника и количества ответвлений от шинпровода

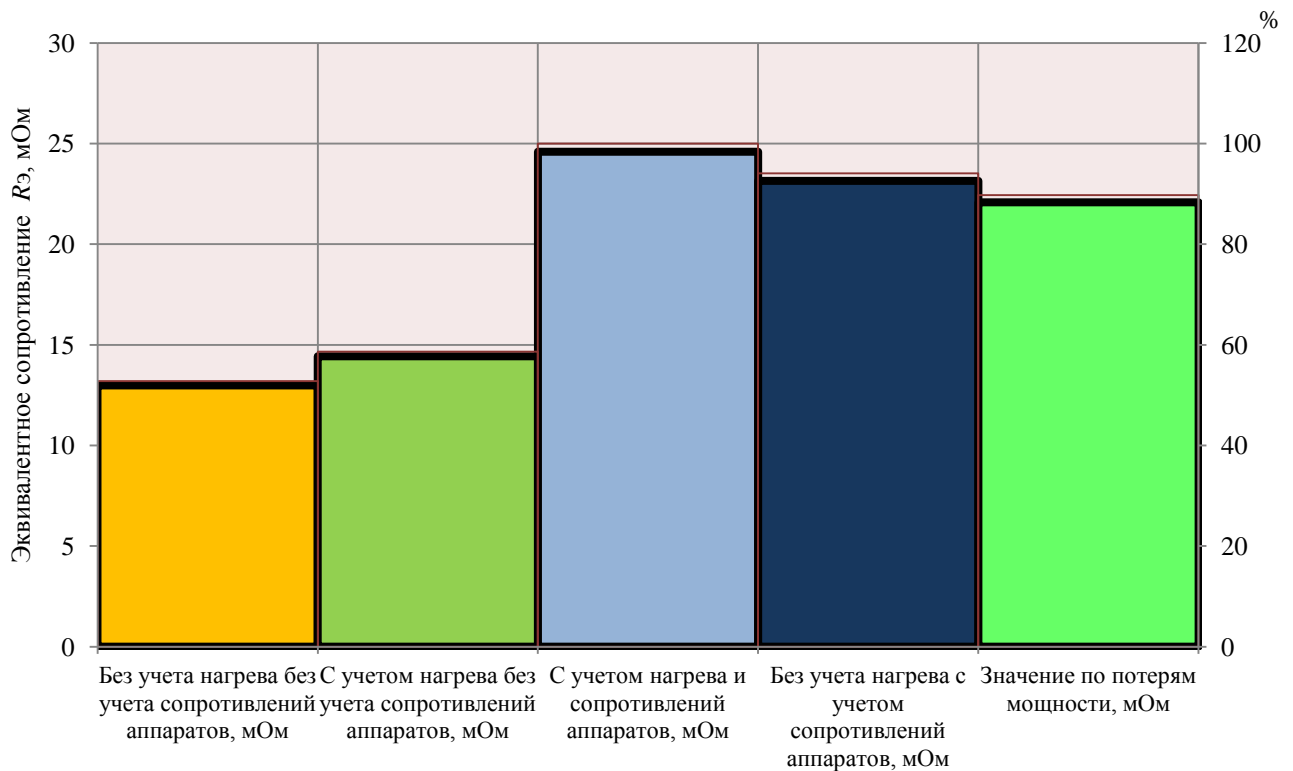


Рисунок 2.20– Влияние параметров оборудования на эквивалентное сопротивление шинпровода

Оценив величину относительной погрешности (таблицы 2.13, 2.14), можно сделать вывод о том, что расчет величины эквивалентного сопротивления низковольтных цеховых сетей только по сопротивлению кабельных линий (проводов) не обладает достаточной точностью и такие параметры, как нагрев проводника и сопротивление контактных соединений коммутационных аппаратов в эквивалентном сопротивлении составляют порядка 45% (рисунок 2.20).

В таблице 2.13 представлены результаты расчета эквивалентных сопротивлений участка радиальной цеховой сети и их отклонения от эталонного значения эквивалентного сопротивления, найденного по выражению (2.8) при изменении количества приемников электроэнергии.

Таблица 2.13– Результаты расчета эквивалентных сопротивлений участка радиальной цеховой сети при изменении количества линий

Количество приемников электроэнергии	С учетом нагрева и сопротивлений контактных соединений НКА	Без учета нагрева и сопротивлений контактных соединений НКА	Погрешность расчета эквивалентного сопротивления, %
	$R_{\text{ЭКВ}}$, МОм		
16	19,85	11,01	-45
14	22,38	12,52	-44
12	24,38	13,78	-43
10	27,88	15,36	-45
8	33,26	18,37	-45
6	51,17	28,47	-44

В таблице 2.14 представлены результаты расчета эквивалентных сопротивлений участка цеховой сети, представленного шинопроводом и их отклонения от эталонного значения эквивалентного сопротивления, найденного по выражению (2.8) при изменении количества приемников электроэнергии.

Таблица 2.14– Результаты расчета эквивалентных сопротивлений шинпровода и их отклонения от эталонного значения эквивалентного сопротивления

Количество приемников электроэнергии	Без учета нагрева без учета сопротивления контактных соединений аппаратов, мОм	С учетом нагрева без учета сопротивления контактных соединений аппаратов, мОм	С учетом нагрева и сопротивления контактных соединений аппаратов, мОм	Без учета нагрева с учетом сопротивления контактных соединений аппаратов, мОм
13	12,98	14,43	24,60	23,15
10	30,41	36,34	48,96	43,03
5	33,13	35,70	51,84	49,27
Относительная погрешность, %				
13	-47	-41	0	-6
10	-38	-26	0	-12
5	-36	-31	0	-5

Как показали исследования, при расчете потерь мощности в шинпроводах необходимо учитывать влияние следующих факторов: нагрев проводов ответвлений и шинпровода, обусловленного прохождением тока нагрузки через проводники (шинпровод) и температурой окружающей среды; сопротивления контактных соединений и контактов НКА и их числа, так как цеховые линии содержат множество последовательно соединенных узлов с контактными соединениями, и сопротивление аппаратов соразмерно с сопротивлением линии и погрешность неучета этих параметров при определении эквивалентного сопротивления шинпровода достигает до 47%.

Эквивалентное сопротивление радиальной сети без учета сопротивления коммутационных аппаратов определяется [108] по выражению:

$$R_{\text{экв}} = \frac{\sum_{i=1}^n r_{i,20} \cdot l_i}{n} \left[1 + \alpha (\Theta_{i,\text{пр}} - 20^\circ) \right], \quad (2.9)$$

где n – количество приемников электроэнергии.

По результатам исследований проанализированы и определены условия учета-неучета сопротивления коммутационных аппаратов для различных схем радиальных цеховых сетей со следующими изменяющимися параметрами:

- количество приемников электроэнергии 4-12;
- длина линии 5-200 м;
- сечение линии 2,5 – 240 мм²;
- количество коммутационных аппаратов на линии: 1 автоматический выключатель; 1 автоматический выключатель и 1 магнитный пускатель; 2 автоматических выключателя и 1 магнитный пускатель.

Результаты учета-неучета сопротивления коммутационных аппаратов приведены на рисунках 2.21-2.25 и в приложении А, где АВ – количество автоматических выключателей, МП – магнитных пускателей, установленных на линии.

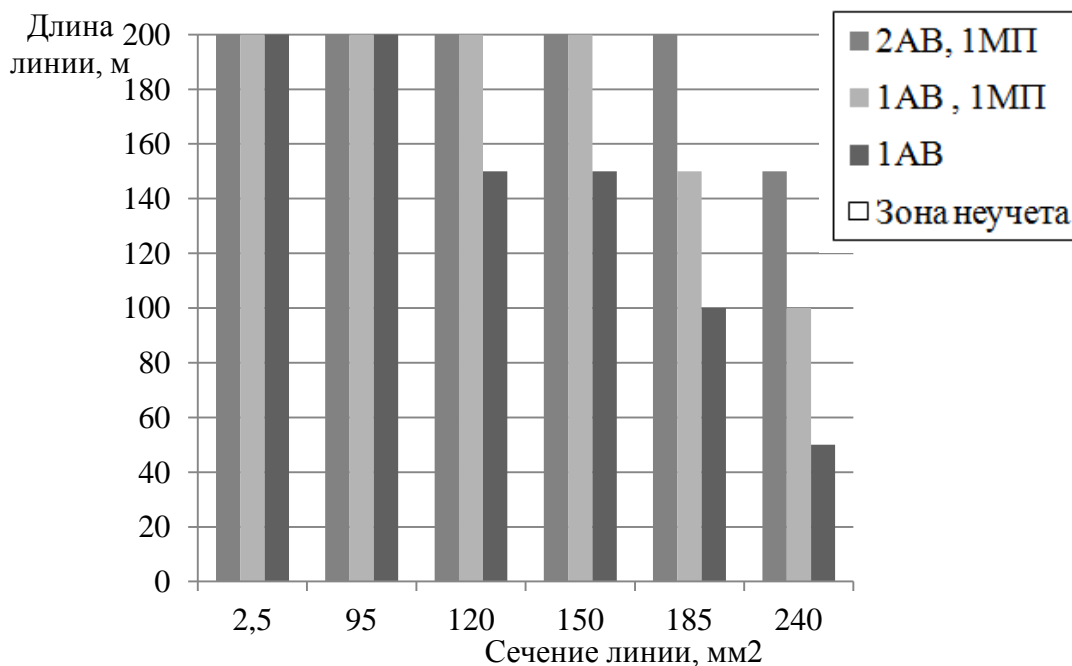


Рисунок 2.21– Зона учета сопротивления коммутационных аппаратов в эквивалентном сопротивлении цеховой сети с 4 радиальными линиями

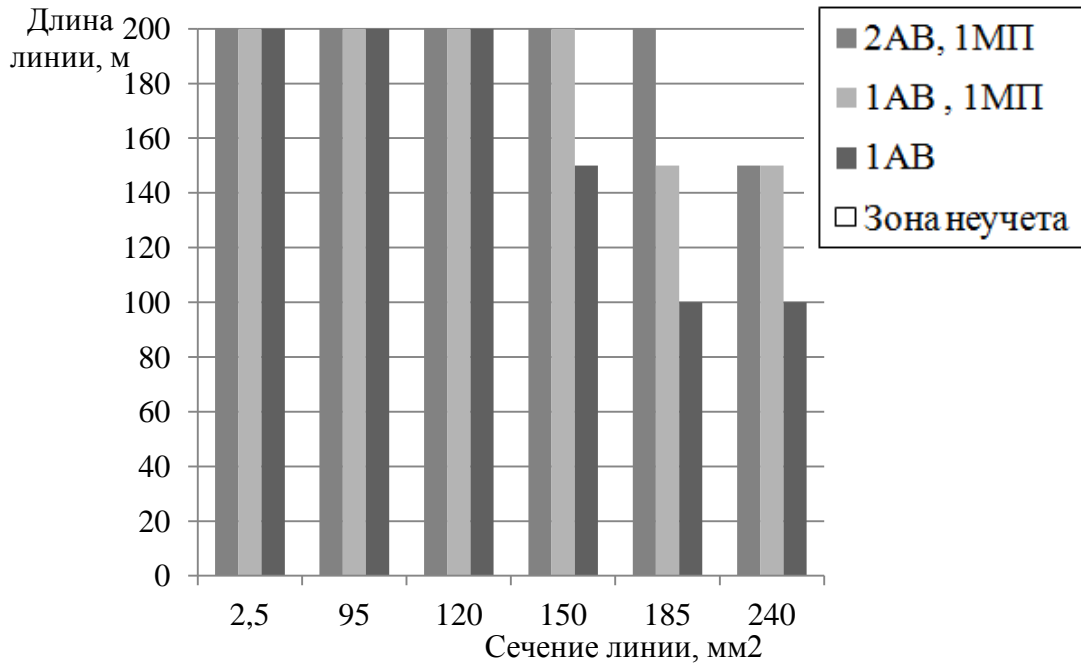


Рисунок 2.22– Зона учета сопротивления коммутационных аппаратов в эквивалентном сопротивлении цеховой сети с 6 радиальными линиями

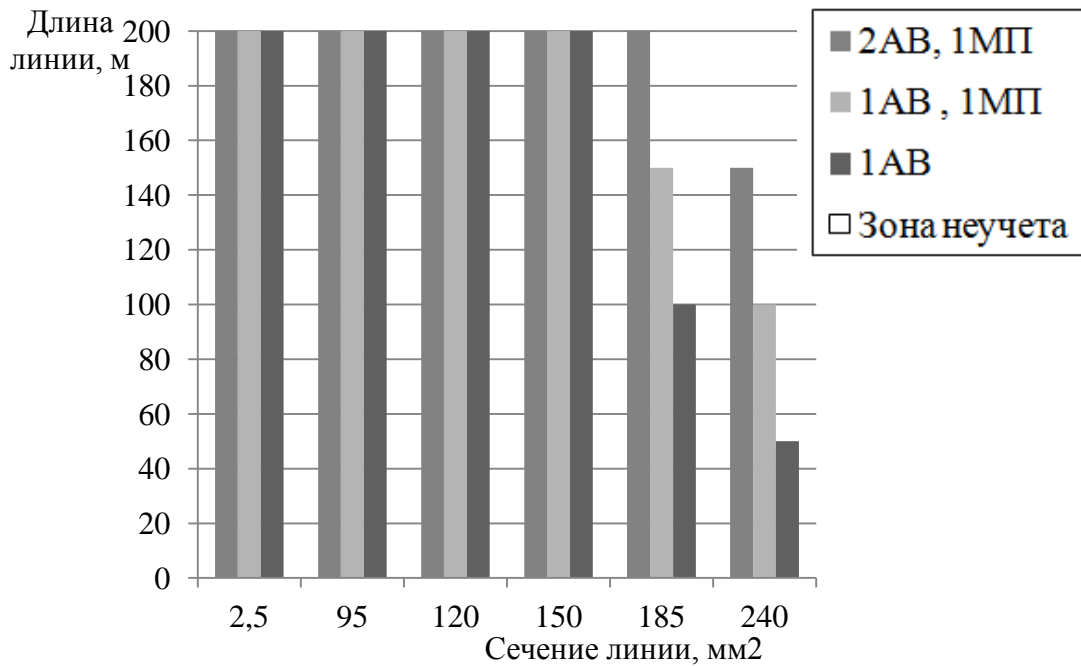


Рисунок 2.23– Зона учета сопротивления коммутационных аппаратов в эквивалентном сопротивлении цеховой сети с 8 радиальными линиями

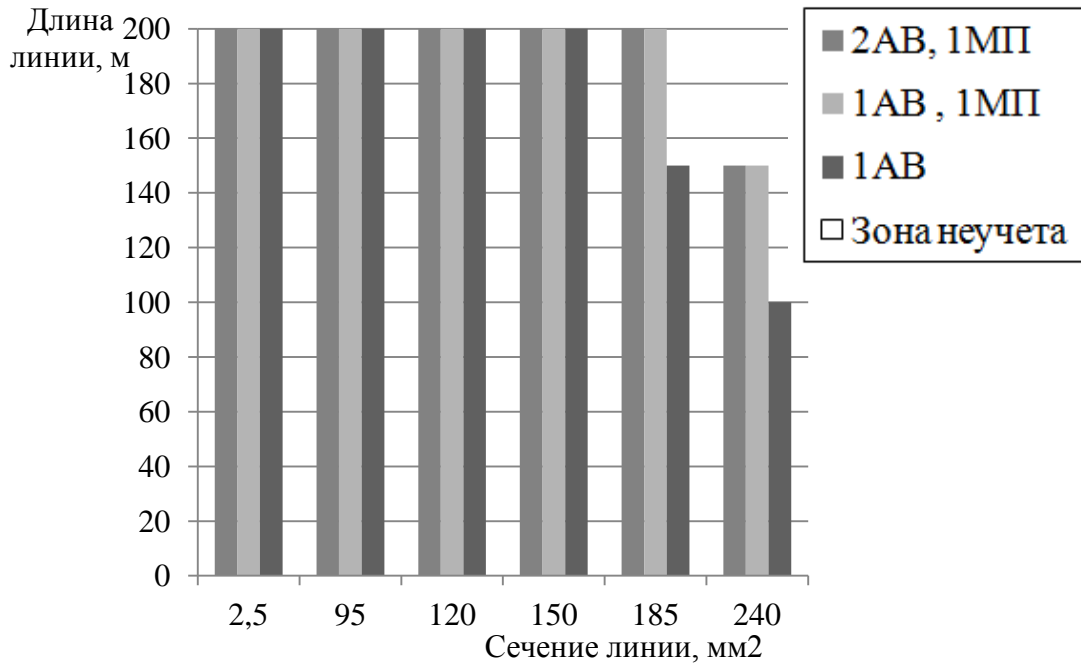


Рисунок 2.24– Зона учета сопротивления коммутационных аппаратов в эквивалентном сопротивлении цеховой сети с 10 радиальными линиями

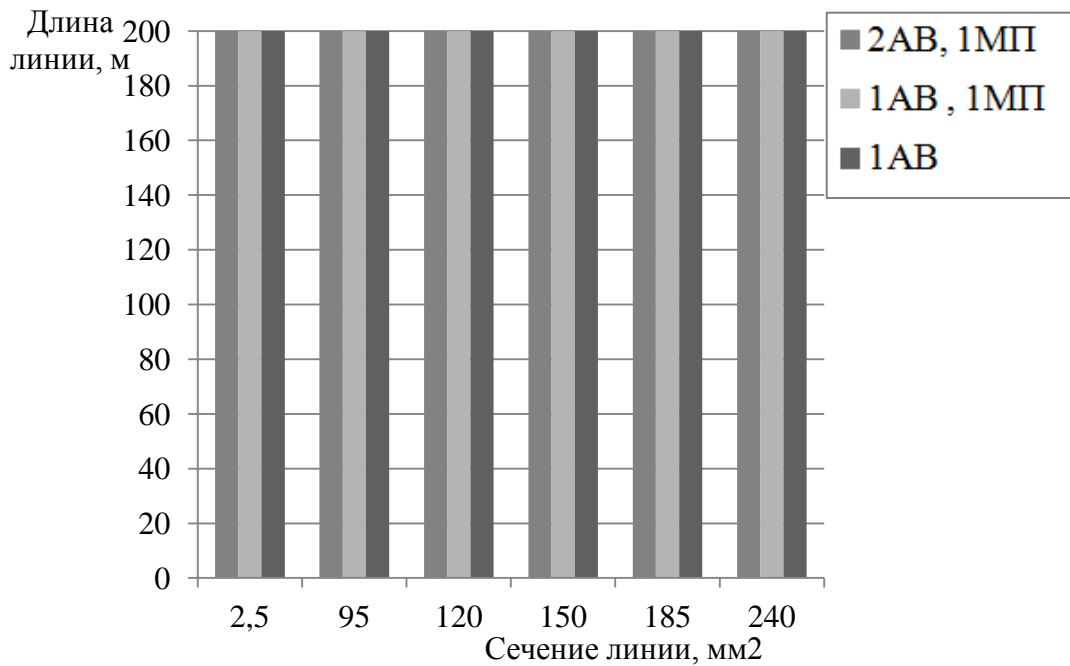


Рисунок 2.25– Зона учета сопротивления коммутационных аппаратов в эквивалентном сопротивлении цеховой сети с 12 радиальными линиями

Таким образом, определение эквивалентного сопротивления по выражению (2.9) для вариантов оборудования схем, не попадающих в зону учета

сопротивлений контактов, приведет к разнице менее 5% по сравнению с учетом сопротивлений коммутационных аппаратов в эквивалентном сопротивлении. Приведенные номограммы упрощают алгоритм определения эквивалентного сопротивления низковольтных сетей для различных схем.

2.4. Выводы

В результате проведенных теоретических и экспериментальных исследований основных параметров оборудования, применяемого в цеховых сетях:

1. Выявлены особенности технических характеристик низковольтных коммутационных аппаратов фирм-производителей ИЕК, ЕКФ, КЭАЗ, «Контактор» и «Электроконтактор».
2. Экспериментально установлены соотношения сопротивлений контактов аппаратов некоторых фирм-производителей в зависимости от номинальных токов аппаратов.
3. Выявлены зависимости изменения сопротивления контактов автоматических выключателей от коэффициента загрузки подключенного оборудования.
4. Разработана методика определения эквивалентного сопротивления, позволяющая учитывать основные характеристики оборудования цеховых сетей низкого напряжения, определяемые режимами эксплуатации и конфигурацией схем сетей.
5. Разработаны математические модели зависимости эквивалентного сопротивления радиальных и магистральных схем сетей в зависимости от таких параметров, как сечение и длина линий сети, количество и тип коммутационных аппаратов, установленных на линии, температура окружающей среды, нагрузка оборудования.

6. Разработан алгоритм определения зон учета-неучета сопротивления контактных соединений низковольтных аппаратов, при вычислении эквивалентного сопротивления цеховых сетей.

7. Определены зоны учета-неучета сопротивлений контактных соединений НКА для расчета эквивалентных сопротивлений цеховых сетей, позволяющие сократить трудоемкость вычислений, погрешность расчета эквивалентных сопротивлений составляла при этом менее 5%.

ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ПЛАНИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ НА ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭКВИВАЛЕНТНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ЦЕХОВЫХ СЕТЕЙ

3.1. Использование эквивалентного сопротивления цеховых сетей при планировании электропотребления

При разработке плановых заданий расхода электроэнергии удобно пользоваться эквивалентными сопротивлениями исследуемых сетей или их участков. Для этого надо установить, какие из параметров сопротивлений можно использовать, рассмотреть методы их определения и порядок применения.

Схемы электрических сетей можно разделить на два основных [98] вида (рисунок 3.1).

I схема— это простейшая схема одиночной линии, имеющей одну точку (шины) присоединения источника питания и другую точку (шины) присоединения потребителей (рисунок 3.1 а)[51]. Поскольку в этом случае токи нагрузок по элементам схемы распределяются пропорционально их сопротивлениям, такая схема может быть заменена простейшей схемой с эквивалентным физическим сопротивлением R_3^Φ [30; 53].

Переменные (нагрузочные) потери в данной сети (линии) будут:

$$\Delta W = 3R_3^\Phi \sum_{t=1}^T I_t^2 = 3R_3^\Phi T I_{\text{ср}}^2 K_{\text{гр}}, \quad (3.1)$$

где T — расчетный период, ч;

t — интервал времени, обычно $t = 1$ ч;

$I_{\text{ср}}^2$ — средний ток графика нагрузки[59];

$K_{\text{гр}}$ — коэффициент графика, определяющий, во сколько раз сумма квадратов ординат тока (мощности) переменного графика больше суммы квадратов ординат

среднего тока (мощности) этого же графика или во сколько раз потери при передаче энергии по данному графику больше потерь при передаче этой же энергии по равномерному графику.

Заменив

$$R_э^{cp} = R_э^{\phi} K_{гр} \quad (3.2)$$

и

$$I_{cp}^2 = \frac{W^2}{\left[\sqrt{3} U_{cp} \cos \varphi_{cp} T \right]^2}, \quad (3.3)$$

получим [109]

$$R_э^{cp} = \frac{\Delta \bar{W}_{отч} U_{cp}^2 \cos^2 \varphi_{cp}}{P_{cp}^2 T}. \quad (3.4)$$

II схема — это схема сети, имеющей много точек питания и еще больше точек присоединения нагрузок через индивидуальные или общие с другими потребителями участки сети (рисунок 3.1 б). В схеме II токи нагрузки, протекающие по ее элементам, в большей степени зависят от взаимного расположения точек питания, точек присоединения и величин нагрузок, чем от сопротивления самих элементов схемы. Если эту особенность схемы II учесть коэффициентом схемы $K_{сх}$, тогда среднее эквивалентное сопротивление, определенное по уравнению (3.4), окажется сформированным с учетом коэффициента графика $K_{гр}$ и коэффициента схемы $K_{сх}$ [53], т.е.

$$R_э^{cp} = R_э^{\phi} K_{гр} K_{сх}.$$

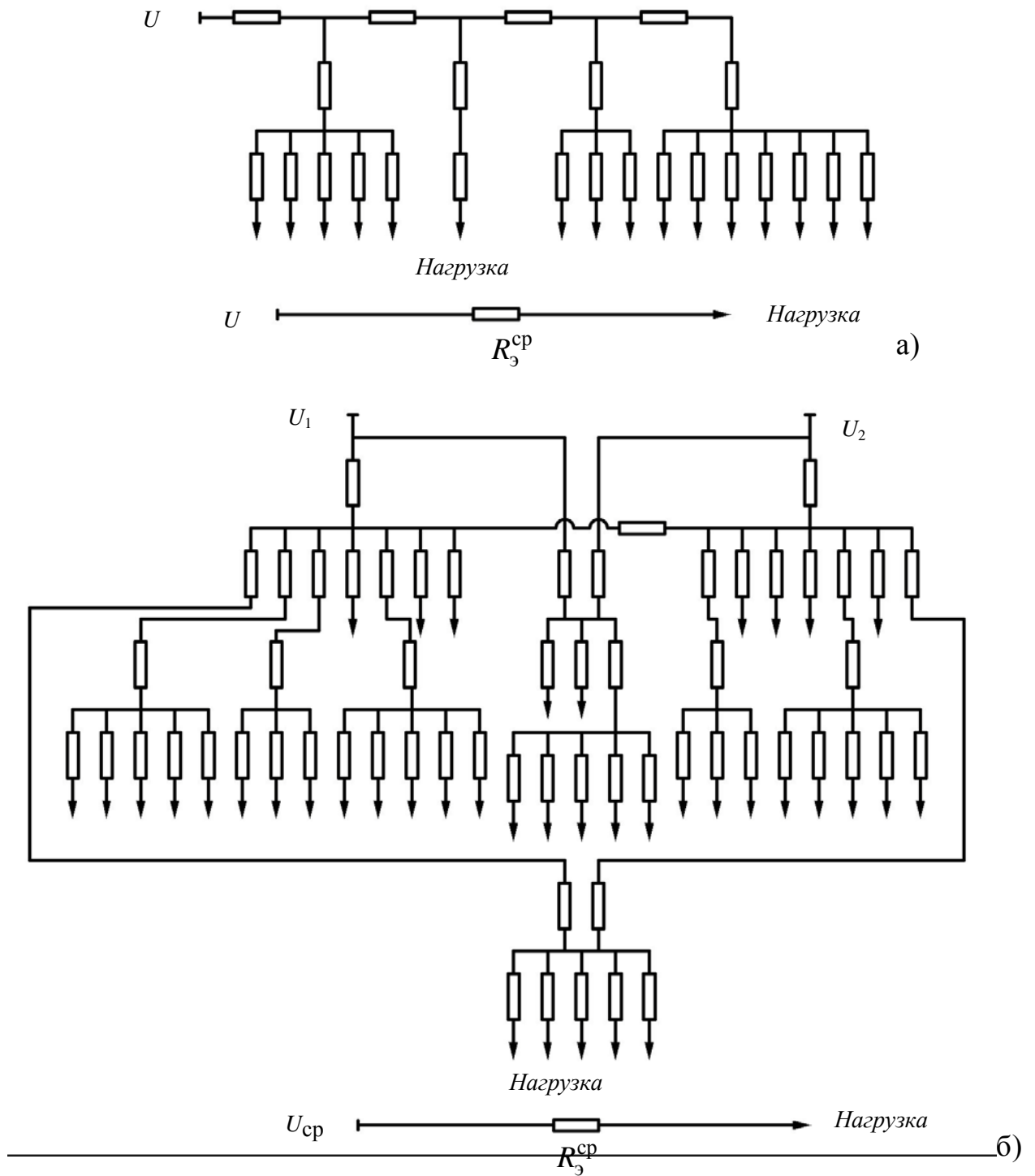


Рисунок 3.1– Схемы сети для определения среднего эквивалентного сопротивления

Очевидно, что в схеме I коэффициент $K_{сх} = 1$, поскольку токи по элементам схемы распределяются строго в соответствии с их сопротивлениями и при

равномерном графике передачи энергии создаются условия, когда $K_{\text{сх}} = K_{\text{гр}} = 1$ и $R_3^{\text{ср}} = R_3^{\text{ф}}$.

К простейшему варианту схемы II можно отнести распределительный щит, который имеет одну точку питания, но несколько точек присоединения нагрузок.

Если для данного момента времени определить сумму потерь мощности в каждом элементе распределительного щита или в любой схеме II и разделить эту сумму на квадрат тока головного участка линии $I_{\text{Гу}}^2$, или, соответственно на квадрат суммы токов, входящих в любую схему II, получим эквивалентное сопротивление распределительного щита или схемы II с учетом $K_{\text{сх}}$, для данного момента времени т.е. без учета $K_{\text{гр}}$ [45].

$$R_3 = R_3^{\text{ф}} K_{\text{сх}} = \frac{\sum_{i=1}^n I_i^2 R_i}{I_{\text{Гу}}^2}, \quad (3.5)$$

где I_i — ток в данном элементе линии (участок, отпайка);

n — число элементов линии;

R_i — сопротивление данного элемента линии;

$I_{\text{Гу}}$ — ток на головном участке линии;

$R_3^{\text{ф}}$ — эквивалентное физическое сопротивление линии, определяемое выражениями (2.7) для радиальных и (2.9) для магистральных сетей.

На рисунке 3.2 представлен простейший распределительный щит.

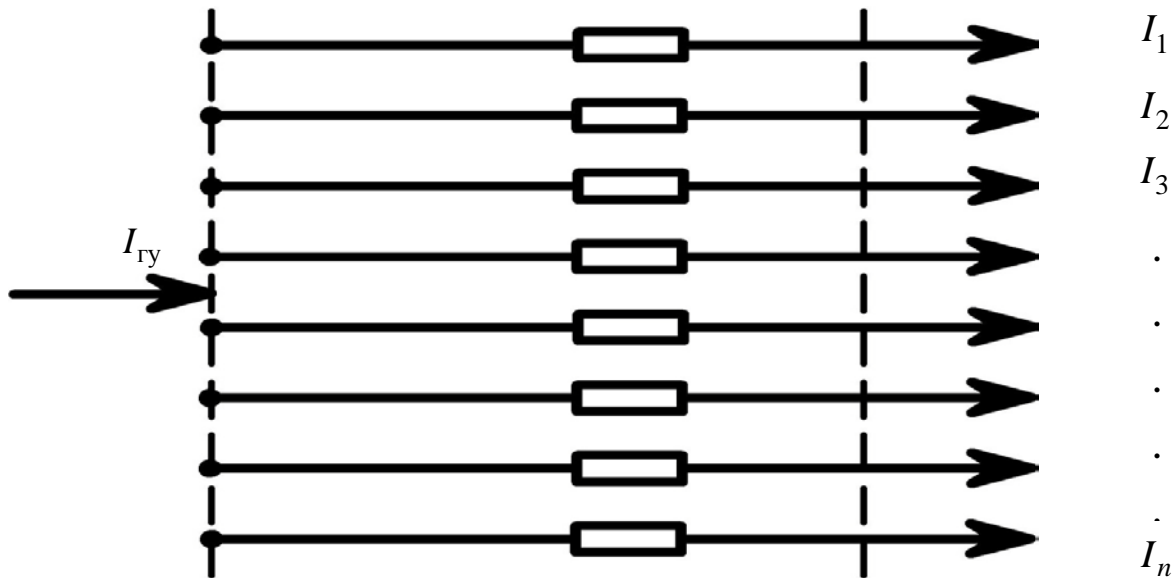


Рисунок 3.2– Схема замещения распределительного щита

Расчет R_3 и R_3^Φ для различных вариантов компоновки распределительного щита, количества ответвлений, температуры нагрева проводников приведен в табл. 3.1.

Рассмотрим распределительные щиты, питающие 16, 14, 12, 10 и 8 нагрузок. Результаты расчетов приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Расчет R_3 и R_3^Φ для различных вариантов компоновки распределительного щита

Номер опыта u	Допустимый длительный ток $I_{\text{доп ср}}, \text{A}$	Средняя длина проводника $l_{\text{ср}}, \text{м}$	Количество линий n	Средний коэффициент загрузки линии k_3	Температура окружающей среды $\theta_0, ^\circ\text{C}$	R_3	$K_{\text{сх}}$	\widehat{R}_3	$\widehat{K}_{\text{сх}}$	R_3^Φ
1	20,5	16,6	16	0,46	20	22,01	1,10	14,10	0,71	19,99
2	20,6	16,7	14	0,48	20	24,25	1,03	15,60	0,66	23,47
3	20,8	16,2	12	0,51	20	26,38	1,01	17,03	0,65	26,22
4	21,2	15,7	10	0,54	20	30,57	1,07	19,77	0,69	28,60
5	21,8	15,8	8	0,58	20	35,49	1,13	23,07	0,73	31,39

где $K_{\text{сх}} = R_3 / R_3^\Phi$.

Эквивалентные сопротивления R_3 и \widehat{R}_3 определяются по выражению (3.5). В первом случае (R_3) при определении сопротивлений каждого ответвления учитываются сопротивление кабельных линий с учетом нагрева проводников и сопротивления контактных соединений НКА. Во втором случае (\widehat{R}_3) учитывается только сопротивление кабельных линий.

Анализ полученных данных показывает, что $K_{сх}$ при учете сопротивления кабельных линий с учетом нагрева проводников и сопротивления контактных соединений коммутационных аппаратов близок к единице. А если не учитывать эти параметры при оценке расхода электроэнергии и потерь в цеховых сетях использование \widehat{R}_3 не будет отражать реальной картины [101]. Поэтому необходимо составление полиномов при оценке потерь в цеховых сетях.

Коэффициент $K_{сх}$ показывает, во сколько раз потери мощности (энергии) при данном распределении нагрузок по элементам схемы II будут больше, чем при распределении их строго в соответствии с сопротивлениями каждого ее элемента, когда $K_{сх} = 1$ (как при коротком замыкании на концах всех ответвлений).

Среднее эквивалентное сопротивление $R_3^{ср}$ используется для определения потерь энергии по известным средним значениям тока (мощности) графика передачи энергии в любых схемах данной сети за период времени T , за который определено ее $R_3^{ср}$ (обычно год).

Для примера определим $R_3^{ср}$ участка сети механического цеха за 2013 г. Рассмотрим сеть, состоящую из распределительного щита (рисунок 2.15). Параметры сети следующие: средняя длина линий $l = 16,5$ м, количество ответвлений $n = 16$, средний допустимый длительный ток $I_{доп ср} = 20,4$ А, средний коэффициент загрузки линии $k_3 = 0,46$, температура окружающей среды $\theta_0 = 20^\circ\text{C}$, напряжение сети $U_{ср} = 380$ В, средний коэффициент мощности $\cos\varphi = 0,59$. Отпуск

энергии в сеть за год составил $W = 95,518$ МВтч, беспотерьный полезный отпуск энергии потребителям составил $W_{\text{бп}} = 92,943$ МВтч, потери $-\Delta W = 2,575$ МВтч.

Сумма квадратов средней мощности пропускания энергии за год:

$$\sum P_{\text{ср}}^2 = P_{\text{ср}}^2 T = \frac{\Delta W^2}{T^2} T = \frac{\Delta W^2}{T} = \frac{2,575^2}{1987} = 3,336.$$

$$\Delta \tilde{W}_{\text{отч}} = \Delta W_{\text{отч}} - \Delta \bar{W}_{\text{отч}} = 4,843 - 0,27 = 2,305.$$

По выражению (3.4)

$$R_3^{\text{ср}} = \frac{\Delta W U_{\text{ср}}^2 \cos^2 \varphi_{\text{ср}}}{P_{\text{ср}}^2 T} = \frac{2,575 \cdot 0,38^2 \cdot 0,59^2}{3,336 \cdot 1987} = 19,527.$$

Результаты расчетов по другим годам до 2015 г. включительно приведены в табл.3.2, из которых видно, что $R_3^{\text{ср}}$ из года в год повышается.

В результате исследований установлено, что при неизменном технологическом цикле и составе оборудования, одной из основных причин увеличения эквивалентного сопротивления является увеличение контактного сопротивления низковольтных аппаратов. В противном случае $R_3^{\text{ср}}$ по годам оставалось бы неизменным, нагрузочные потери в такой сети изменялись бы строго пропорционально квадратам пропускания энергии (табл. 3.2).

Потери электроэнергии могут быть найдены по эквивалентному сопротивлению по выражению:

$$\Delta W = \frac{R_3^{\text{ср}} P_{\text{ср}}^2 T}{U_{\text{ср}}^2 \cos^2 \varphi_{\text{ср}}} \quad (3.6)$$

С учетом неизменности технологии потери электроэнергии для рассматриваемого участка цеховой сети составляют 2,77% от беспотерного потребления электроэнергии, тогда расчетный отпуск электроэнергии в сеть составит:

$$W_p = \frac{100}{2,77} \cdot \frac{R_3^{\text{ср}} P_{\text{ср}}^2 T}{U_{\text{ср}}^2 \cos^2 \varphi_{\text{ср}}} \quad (3.7)$$

Таблица 3.2 – Расход электроэнергии по годам

Параметр	2011	2012	2013	2014	2015	2016 (прогноз)
Число часов работы T , ч	1987	1981	1986	1970	1970	1971
Отпуск энергии в сеть W , МВтч	95,518	95,308	95,554	94,924	94,924	94,959
Беспотерное потребление $W_{\text{бп}}$, МВтч	92,943	92,74	92,98	92,369	92,369	92,403
Потери ΔW , МВтч	2,575	2,568	2,574	2,555	2,555	2,556
$\sum P_{\text{ср}}^2$, МВт ² ×10 ⁻³	3,336	3,328	3,337	3,314	3,314	3,315
$\Delta W_{\text{отч}}$, МВт	4,843	4,651	4,577	4,329	4,423	3,998
$\Delta W_{\text{отч}}$, %	5,07	4,88	4,79	4,56	4,66	4,21
$\Delta \bar{W}_{\text{отч}}$, МВт	0,27	0,27	0,271	0,27	0,27	0,27
$\Delta \tilde{W}_{\text{отч}} = \Delta W_{\text{отч}} - \Delta \bar{W}_{\text{отч}}$, МВт	2,305	2,298	2,303	2,285	2,285	2,286
$R_9^{\text{ср}}$, мОм	19,527	19,579	19,523	19,672	19,721	19,770
$\Delta \bar{W}$ при $R_9^{\text{ср}} = \text{const}$, МВт	2,575	2,561	2,574	2,536	2,536	2,538
Повышение $\Delta \bar{W}$ по годам	-	0,176	-0,188	0,493	0	-0,027
Коэффициент увеличения $R_9^{\text{ср}}$ по годам C	-	1,003	0,997	1,008	1,002	1,002
Средний коэффициент увеличения $R_9^{\text{ср}}$ по годам $C_{\text{ср}}$	-	-	-	1,0025	-	-

Погрешность расчетного отпуска электроэнергии, найденного по эквивалентному сопротивлению, от реально переданной электроэнергии за 2011-2015 гг. приведена в таблице 3.3.

Таблица 3.3– Расход электроэнергии по годам

Параметр	2011	2012	2013	2014	2015
Отпуск энергии в сеть W , МВтч	95,518	95,308	95,554	94,924	94,924
Расчетный отпуск энергии в сеть W_p , МВтч	95,533	95,273	95,495	94,791	94,791
Расхождение W_p от W , %	0,02	-0,04	-0,06	-0,14	-0,14

В процессе эксплуатации контакты НКА изнашиваются, образуются пленки, в результате чего начальное значение сопротивления контактных соединений НКА(R_0)возрастает[49]до критического значения $R_{кр}$, при котором происходит отказ НКА.В связи с тем, что в процессе работы наблюдаются как полные, так и кратковременные отказы контактов на время только лишь одного переключения [18], под отказом контакта понимается превышение контактным сопротивлением порогового значения. При этом по результатам экспериментальных исследований для автоматических выключателей, магнитных пускателей и контакторов в качестве критического значения сопротивления аппарата в среднем принимается трехкратное увеличение значения начального сопротивления контактных соединений[16]:

$$R_{кр} = a \cdot R_0, \quad (3.8)$$

где a – коэффициент, определяемый типом аппарата [110];

R_0 –начальное значение сопротивления контактных соединений коммутационного аппарата [69; 88].

Фактическое ежегодное повышение потерь ΔW , например за 2012 г. определяется по формуле:

$$\Delta \bar{W}_{12} = (R_{912}^{cp} - R_{911}^{cp}) \sum P_{cp12}^2 = (19,579 - 19,527) \cdot 3,328 = 0,173 \text{ МВтч.}$$

Данные по остальным годам приведены в таблице 3.2.

Располагая значениями R_3^{cp} за 4 предыдущих года, можно с достаточной для практики точностью определить ожидаемые значения этой величины на ближайшие последующие годы с помощью коэффициента среднего увеличения C_{cp} этой величины за предыдущие годы.

Например, ожидаемые значения эквивалентного сопротивления на 2016 и 2017 гг. будут:

$$R_{2016}^{cp} = R_{2015отч}^{cp} C_{cp} = 19,770 \cdot 1,0025 = 19,819 \text{ мОм};$$

$$R_{2017}^{cp} = R_{2016}^{cp} C_{cp} = 19,819 \cdot 1,0025 = 19,869 \text{ мОм}.$$

Эти значения могут использоваться для разработки планов электропотребления при определении потерь электроэнергии по формуле (3.6) и при найденном соотношении постоянных потерь от переданной электроэнергии для определения расчетного электропотребления.

Отметим, что коэффициент увеличения эквивалентного сопротивления данной сети в последующие годы может отличаться от среднего значения за прошлые годы. Отчетное же значение $R_{3отч}^{cp}$ за данный год следует использовать для корректировки прогнозируемых R_3^{cp} на последующие годы.

Уменьшение R_3^{cp} происходит благодаря развитию электрических сетей [70], т.е. замене отработавших свой ресурс коммутационных аппаратов и внедрению мероприятий, направленных на снижение потерь.

3.2 Разработка мероприятий по экономии электроэнергии на промышленных предприятиях

Недофинансирование электросетевого комплекса России с начала девяностых годов прошлого века привело к критической изношенности основных фондов. Проведенный анализ возрастной структуры оборудования показал, что более 54 % оборудования выработало нормативный срок эксплуатации (25 лет), более 22 % оборудования выработало сверхнормативный срок

эксплуатации (35 лет и выше). Кроме того, в следующие 10 лет ожидается значительный рост доли оборудования со сверхнормативным сроком эксплуатации. Физический и моральный износ оборудования может стать причиной возникновения технологических нарушений, несчастных случаев, а также роста эксплуатационных затрат. Изношенные элементы внутрицеховых линий электропередачи могут быть повреждены при внешнем воздействии или стать причиной роста потерь электроэнергии ввиду увеличения нагрузок [12; 100].

Таким образом, представляет интерес возможный экономический эффект от замены коммутационного оборудования внутрицеховых сетей до его отказа [99]. Для реализации поставленных целей исследована силовая цепь участка механического цеха, представленная на рисунке 2.15, которая включает в себя 16 электроприемников мощностью 0,5 – 5,5 кВт. Данная цеховая сеть питается от распределительного пункта СП-1. Параметры сети следующие: средняя длина линий $l = 16,5$ м, количество отходящих линий от СП-1 $n = 16$, средний допустимый длительный ток кабельной линии марки ВВГнг-LS $I_{\text{доп ср}} = 20,4$ А, среднеквадратичный коэффициент загрузки линий $k_3 = 0,46$, температура окружающей среды $\theta_0 = 20^\circ\text{C}$, напряжение сети $U_{\text{ср}} = 380$ В, средний коэффициент мощности приемника электроэнергии $\cos \varphi = 0,59$.

В результате проведенных исследований получены зависимости сопротивления контактов коммутационного аппарата от количества циклов срабатывания с режимом работы АС-3 для автоматических выключателей (АВ) $I_{\text{ном}} = 50$ А (рисунок 3.3) и для магнитных пускателей (МП) $I_{\text{ном}} = 100$ А (рисунок 3.4).

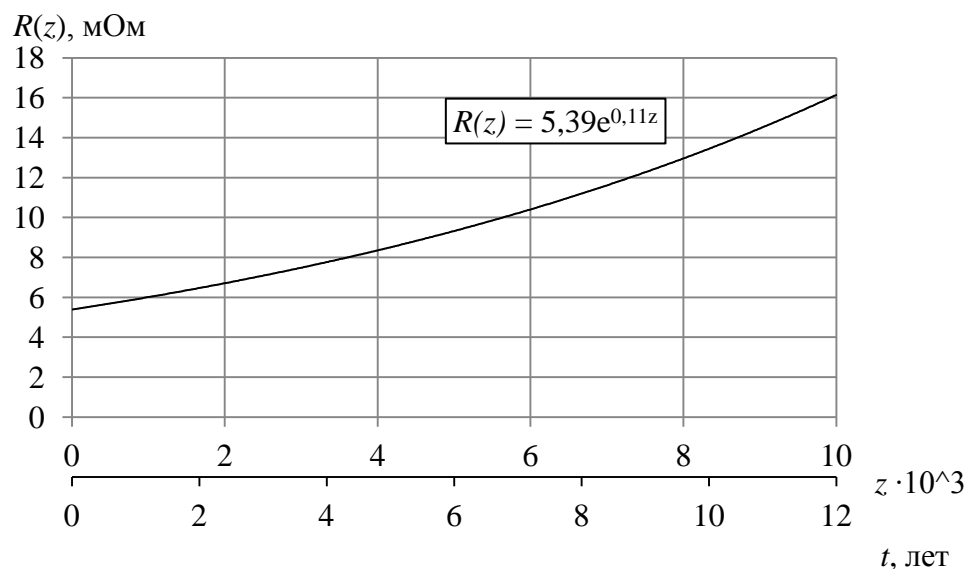


Рисунок 3.3– Зависимость изменения сопротивления контактов автоматических выключателей марки ВА-47 от количества циклов

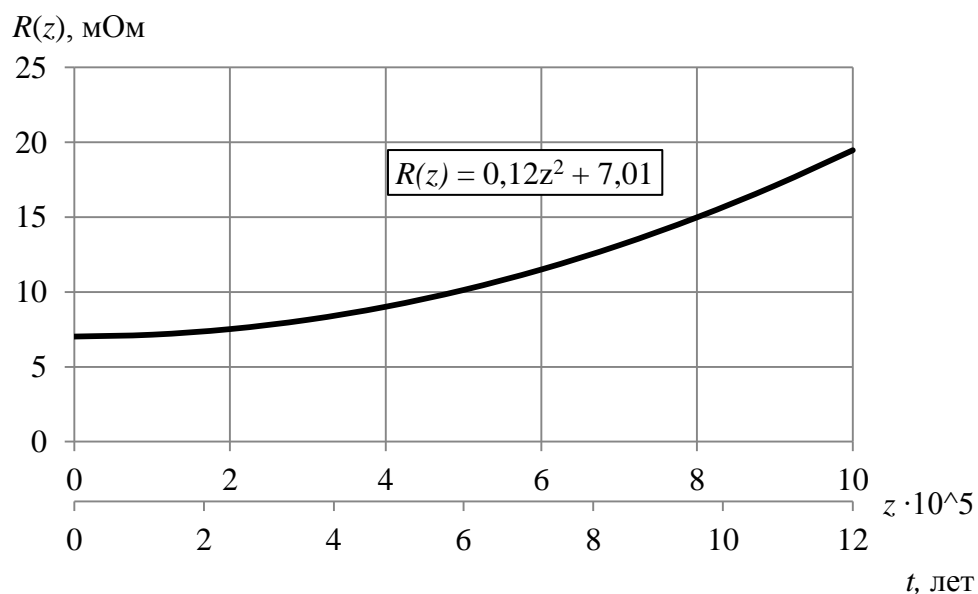


Рисунок 3.4– Зависимость изменения сопротивления контактов магнитных пускателей марки ПМЛ от количества циклов

Учитывая увеличение сопротивления контактных соединений автоматических выключателей и магнитных пускателей в процессе эксплуатации динамика изменения эквивалентного сопротивления схемы, представленной на рисунке 2.15, по годам приведена в таблице 3.4.

Таблица 3.4– Динамика увеличения эквивалентного сопротивления участка цеховой сети в зависимости от срока эксплуатации

t , лет	0	2	4	6	8	10	12
$R_{\text{ЭКВ сети}}$, МОм	19,85	20,44	21,95	24,66	28,63	33,94	40,69
Потери ΔW , МВтч	2,62	2,68	2,89	3,20	3,72	4,41	5,29
Расчетный отпуск энергии в сеть W_p , МВтч	97,12	99,46	107,37	118,83	137,96	163,68	196,23

По результатам исследований предполагаются 4 варианта режимов замены коммутационных аппаратов цеховой сети 0,4 кВ в процессе эксплуатации:

1) замена каждого из автоматических выключателей (16 штук) и магнитных пускателей (16 штук) по истечении паспортного срока службы. Автоматические выключатели в режиме редких коммутаций при 1-2 коммутации в сутки, отработают свой срок службы в 6.000 коммутаций в среднем за 10 лет. Магнитные пускатели в режиме работы АС-3 (12-14 коммутаций в час) электрическую износостойкость в 300.000 коммутаций исчерпают за 10 лет. Таким образом, замена всех аппаратов по истечении ресурса должна быть проведена через 10 лет в соответствии с паспортными данными.

2) замена каждого коммутационного аппарата (32 штуки) через 80% отработанного временного ресурса;

3) замена только автоматических выключателей (16 штук) по достижении 80 % отработанного ресурса;

4) замена только магнитных пускателей (16 штук) по достижении 80 % отработанного ресурса.

Динамика изменения эквивалентного сопротивления участка сети для рассмотренных выше вариантов замены аппаратов представлена на рисунке 3.5.

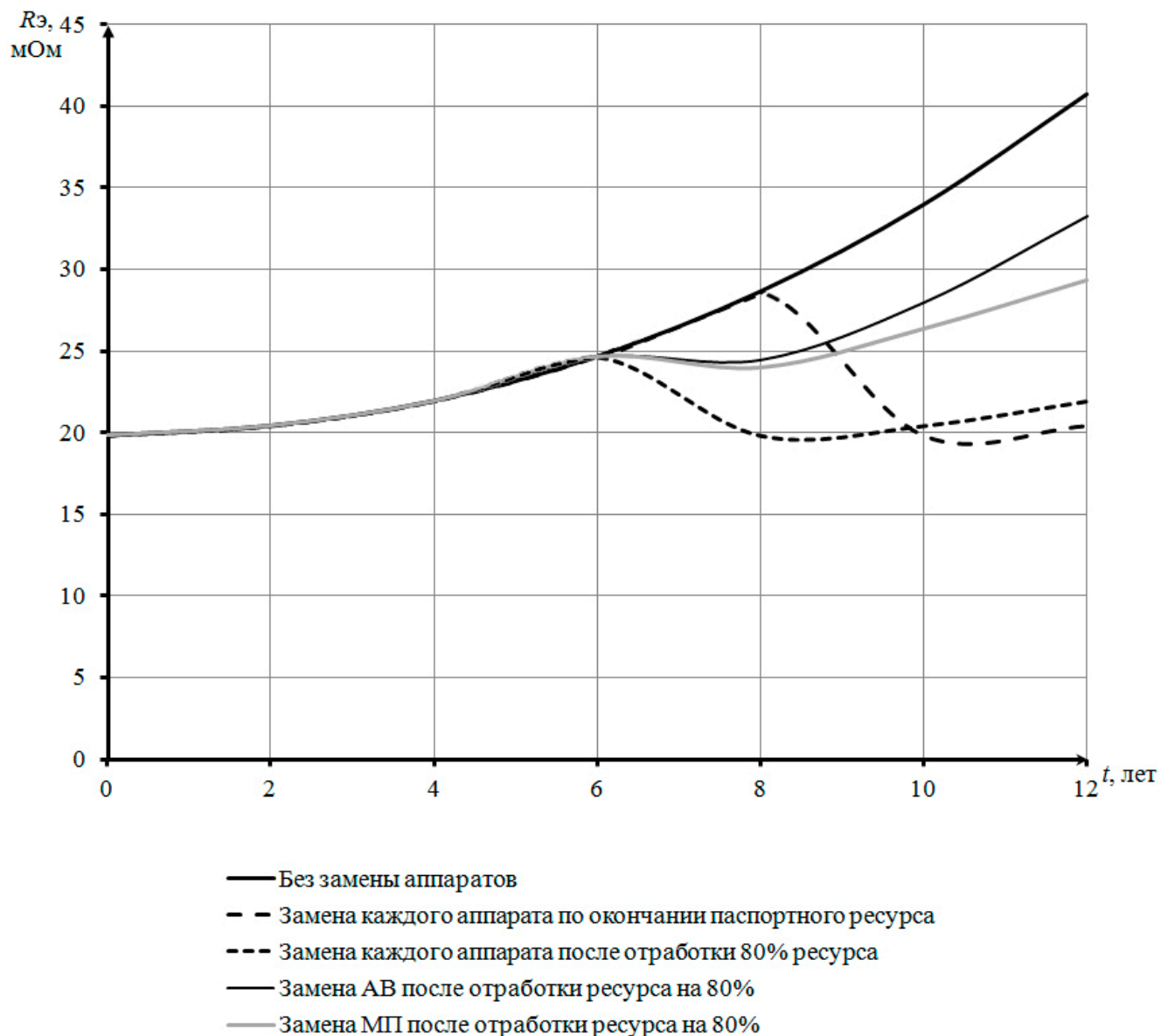


Рисунок 3.5– Динамика изменения эквивалентного сопротивления участка внутрицеховой сети в зависимости от срока эксплуатации и режимов замены низковольтных аппаратов

В рассмотренном регламенте приводятся как малозатратные мероприятия, такие как замена только автоматических выключателей, так и нововведения, требующие более значительных инвестиций (замена всех аппаратов). Часть мероприятий может быть реализована за счёт устранения явных перерасходов электропотребления и потерь электроэнергии.

Изменение расхода электропотребления и потерь электроэнергии для различных вариантов замены аппаратов представлены в таблице 3.5.

Потери электроэнергии, представленные в таблице 3.5, определяются по величине среднеквадратичного тока [11;55]:

$$\Delta W = 3R \int_0^T I^2(t) dt = 3RI_{\text{СК}}^2 T, \quad (3.9)$$

где $I_{\text{СК}}$ – среднеквадратичный ток за время T .

T – среднее число часов за смену.

Таблица 3.5– Динамика изменения потерь электроэнергии во внутрицеховой сети в зависимости от срока эксплуатации и режимов замены аппаратов

	t , лет	0	2	4	6	8	10	12
	Без замены аппаратов	4,3	4,42	4,75	5,34	6,2	7,34	8,81
		159,53	163,982	176,225	198,114	230,02	272,314	326,851
ΔW , МВтч	Замена каждого аппарата при 100% ресурса	4,3	4,42	4,75	5,34	6,2	4,3	4,42
		159,53	163,982	176,225	198,114	230,02	159,53	163,982
W , МВтч	Замена каждого аппарата при 80% ресурса	4,3	4,42	4,75	5,34	4,3	4,42	4,75
		159,53	163,982	176,225	198,114	159,53	163,982	176,225
	Замена АВ при 80% ресурса	4,3	4,42	4,75	5,34	5,3	6,06	7,2
		159,53	163,982	176,225	198,114	196,63	224,826	267,12
	Замена МП при 80% ресурса	4,3	4,42	4,75	5,34	5,19	5,71	6,35
		159,53	163,982	176,225	198,114	192,549	211,841	235,585

На рисунке 3.6 представлена диаграмма снижения расхода электроэнергии (W) от проводимых мероприятий.

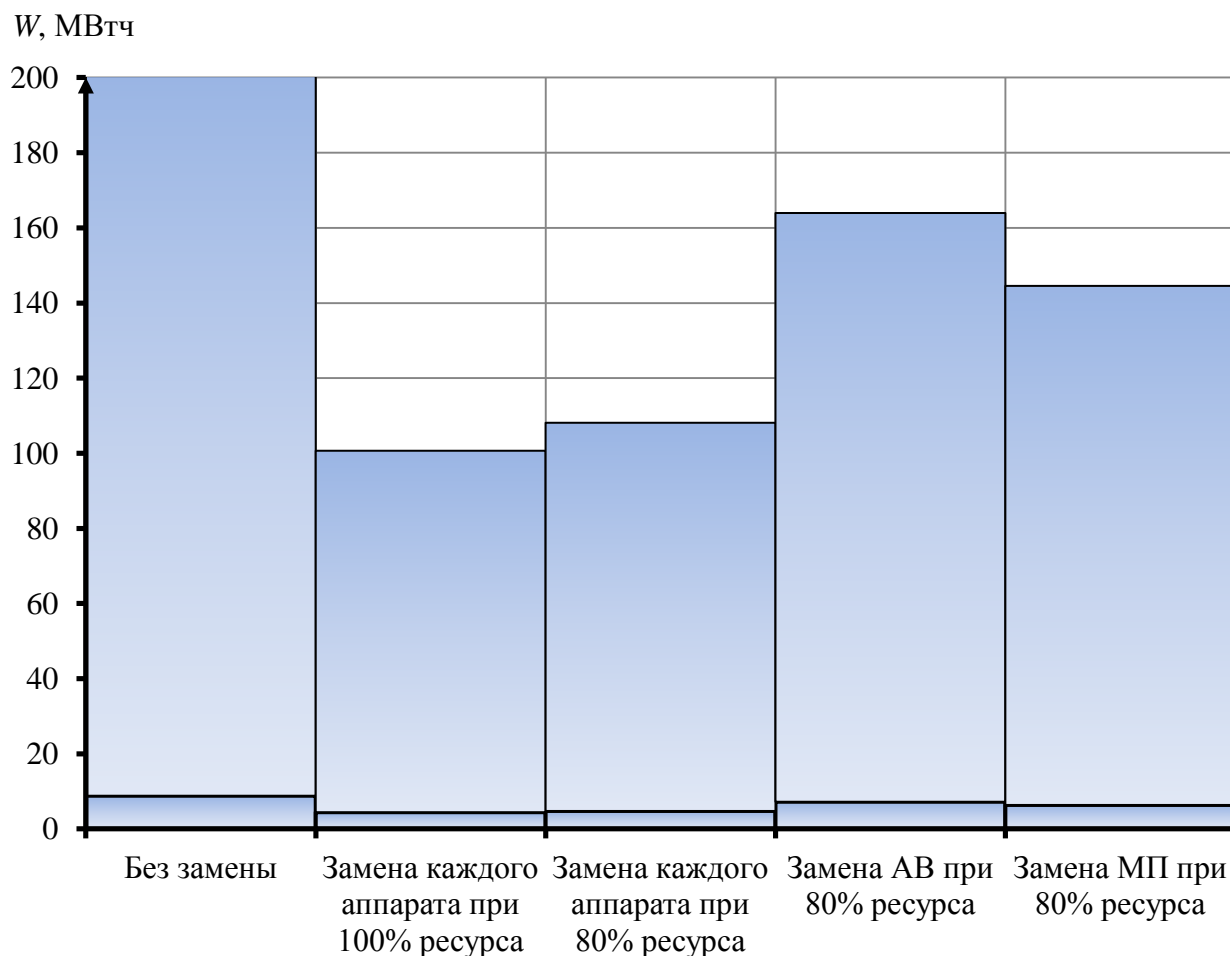


Рисунок 3.6– Изменение потерь электроэнергии в цеховой сети при проведении мероприятий по экономии электроэнергии за период 12 лет

Таким образом, замена каждого (32 штук) коммутационного аппарата по истечении паспортного срока службы приводит к 50% экономии электроэнергии в линиях цеховой сети в сравнении, с продолжающими работать автоматическими выключателями и магнитными пускателями. Замена каждого (32 штук) коммутационного аппарата при 80% отработанного ресурса позволяет снизить расход электроэнергии на 46%, замена автоматических выключателей и магнитных пускателей по отдельности – на 18% и 28% соответственно.

3.3 Оценка экономического эффекта от замены низковольтных коммутационных аппаратов в зависимости от срока эксплуатации

С экономической точки зрения целесообразно оценить срок окупаемости замены коммутационных аппаратов за счет снижения расхода электроэнергии.

При стоимости электроэнергии 4 руб./кВт стоимости автоматических выключателей 77 руб./шт., магнитных пускателей 616 руб./шт.[82] получены следующие результаты:

- стоимость замены всех аппаратов составляет 11090 руб.;
- стоимость замены автоматических выключателей составляет 1234 руб.
- стоимость замены магнитных пускателей составляет 9856 руб.

При стоимости автоматических выключателей ВА-47 в 2011 году – 53 руб., 2012 году – 60 руб., 2013 году – 68 руб., 2014 году – 77 руб.[82], ожидаемый рост цен представлен на рисунке 3.7.

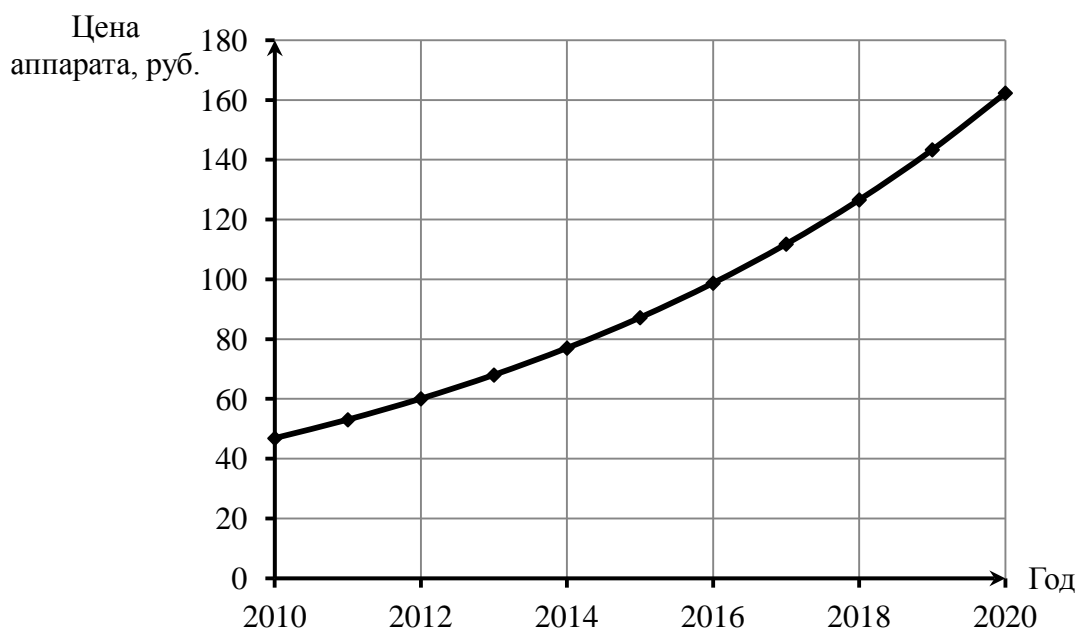


Рисунок 3.7– Ожидаемый рост цен на автоматические выключатели ВА-47

С учетом повышения стоимости оборудования, предполагаемая цена на низковольтные аппараты, установленные на участке механического цеха (рисунок 2.15), в ближайшие 10 лет представлена на рисунке 3.8.

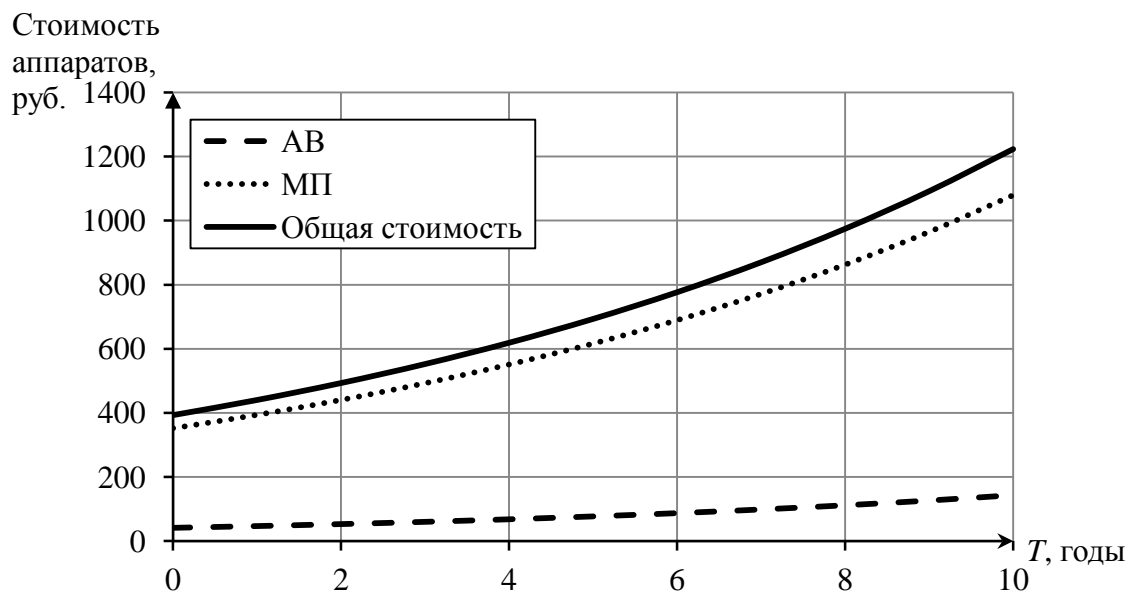


Рисунок 3.8– Прогноз изменения стоимости коммутационных аппаратов на ближайшие 10 лет (2015-2025 гг.)

Оценка стоимости замены аппаратов при 80% отработанного ресурса показала, что более ранняя замена по сравнению с паспортным сроком дает свой экономический эффект (таблица 3.6). Целесообразно определить временной интервал эксплуатации, где замена автоматических выключателей и магнитных пускателей становится нерентабельной.

Таблица 3.6– Динамика изменения стоимости потерь электроэнергии во внутрицеховой сети в зависимости от срока эксплуатации и режимов замены аппаратов

Режим эксплуатации	Стоимость потерь электроэнергии, тыс. руб.		
	6	8	10
Период работы до замены, лет			
Без замены аппаратов	21,36	24,8	29,36
Замена каждого аппарата при 100% ресурса	21,36	24,8	17,2
Замена каждого аппарата при 80% ресурса	21,36	17,2	17,68
Замена АВ при 80% ресурса	21,36	21,2	24,24
Замена МП при 80% ресурса	21,36	20,76	22,84

Замена аппаратов на более раннем сроке эксплуатации (80% отработанного ресурса) показал, что более ранняя замена части аппаратов дает свой экономический эффект. Целесообразно оценить, на каком этапе эксплуатации замена автоматических выключателей и магнитных пускателей не выгодна экономически.

Таким образом, замена каждого из 32 коммутационных аппаратов по истечении паспортного срока службы приводит к 50% экономии электроэнергии в линиях цеховой сети в сравнении, с продолжающими работать автоматическими выключателями и магнитными пускателями. Замена каждого из 32 коммутационных аппаратов при 80% отработанного ресурса позволяет снизить расход электроэнергии на 46%, замена автоматических выключателей и магнитных пускателей по отдельности – на 18% и 28% соответственно.

При цене автоматического выключателя 77 руб. и магнитного пускателя 616 руб., общая стоимость установленных аппаратов составляет 11,09 тыс. руб. Замена по истечении паспортного срока службы каждого из 32 коммутационных аппаратов, с учетом снижения расхода электроэнергии при стоимости электроэнергии 4 руб./кВтч, позволит сэкономить за 2 года 6,44 тыс. руб., учитывая стоимость монтажных работ. Экономия при замене каждого из 32 коммутационных аппаратов при 80% отработанного ресурса с учетом снижения расхода электроэнергии составляет 5,13 тыс. руб. Экономия при замене автоматических выключателей (16 штук) при 80% отработанного ресурса составит 5,17 тыс. руб. за счет снижения расхода электроэнергии. Данные приведены в таблице 3.7.

Таблица 3.7– Показатели оценки экономии затрат при проведении различных мероприятий

Мероприятие	Стоимость аппаратов, тыс. руб.	Снижение электропотребления, ΔW , МВт·ч	Стоимость снижения расхода электроэнергии, тыс. руб.	Экономия от мероприятия, тыс. руб.
Без замены	11,09	0	0	0
Замена каждого аппарата при 100% ресурса	11,09	4,38	17,53	6,44
Замена каждого аппарата при 80% ресурса	11,09	4,06	16,22	5,13
Замена АВ при 80% ресурса	1,23	1,60	6,40	5,17
Замена МП при 80% ресурса	9,86	2,45	9,82	-0,04
Замена АВ при 60% ресурса	1,23	0,50	2,0	0,77
Замена МП при 60% ресурса	9,86	1,25	5,0	-4,86
Замена АВ при 40% ресурса	1,23	0,04	0,16	-1,07
Замена МП при 40% ресурса	9,86	0,12	0,48	-9,38

Замена коммутационных аппаратов при отработке ресурса на 80% является эффективным мероприятием, позволяя достичь экономии от замены 32-х автоматических выключателей и магнитных пускателей 5,13 тыс. руб. для участка механического цеха с суммарной мощностью силового пункта 26,9 кВт. Замена на

60% «ресурса» позволяет окупить аппараты и повысить надежность [89], но особого экономического эффекта это мероприятие не приносит. Замена при 40% отработанного ресурса – является убыточной.

3.4 Разработка методики планирования электропотребления на основе моделирования эквивалентного сопротивления внутрицеховых сетей

Моделирование планирования расхода электроэнергии на ее передачу и распределение осуществляется по эквивалентному сопротивлению исследуемой цеховой сети.

Для разработки математической модели эквивалентного сопротивления использован дробный факторный эксперимент (ДФЭ) типа 2^{5-1} с генерирующим соотношением $f_5 = f_1 \cdot f_2 \cdot f_3 \cdot f_4$ [29], который представлен матрицей в таблице 3.8. Данный план позволяет оценить линейные эффекты отдельно от парных взаимодействий. Тройными взаимодействиями и выше пренебрегаем. Значения функции цели при изменении величины факторов в диапазонах их варьирования находятся по выражению (2.8) для радиальных сетей.

Эквивалентное сопротивление радиальных сетей определяем по выражению:

$$R'_9 = \frac{1469,3 \cdot I_{\text{доп ср}}^{-1,625} \cdot l_{\text{ср}} \left[1 + 0,00428 \cdot \left(k_3^2 (70 - \theta_0) + \theta_0 - 20 \right) \right]}{\sum_{i=1}^N r_{i, \text{ап}} + \frac{n}{n^2}}, \quad (3.10)$$

где: $l_{\text{ср}}$ – средняя длина линий в цеховой сети, м;

70 – допустимая заданная температура нагрева жилы кабеля;

θ_0 – температура среды θ_0 , °С,

N – количество аппаратов;

$\sum_{i=1}^N r_{i, \text{ап}}$ – сумма сопротивлений коммутационных аппаратов, установленных

на линиях.

Для многофакторной взаимосвязанной модели рассматривается следующая форма связи результативного с факториальными показателями [20; 21]:

$$\begin{aligned}
 Y = & b_0 + b_1 f_1 + b_2 f_2 + b_3 f_3 + b_4 f_4 + b_5 f_5 + b_{12} f_1 f_2 + \\
 & + b_{13} f_1 f_3 + b_{14} f_1 f_4 + b_{15} f_1 f_5 + b_{23} f_2 f_3 + b_{24} f_2 f_4 + \\
 & + b_{25} f_2 f_5 + b_{34} f_3 f_4 + b_{35} f_3 f_5 + b_{45} f_4 f_5,
 \end{aligned} \tag{3.11}$$

где: $b_0 \dots b_{45}$ – коэффициенты уравнения регрессии, находятся методом наименьших квадратов [32] по выражениям:

$$b_i = \frac{\sum_{u=1}^N y_u \cdot f_{iu}}{N}; \quad b_{ij} = \frac{\sum_{u=1}^N y_u \cdot f_{iu} \cdot f_{ju}}{N}, \tag{3.12}$$

где: y_u – значение выходной величины (эквивалентное сопротивление);

f_i, f_j – кодированные значения факторов (+1 или -1);

i, j – номера факторов;

N – число опытов (в нашем случае $N = 16$);

u – номер опыта.

После нахождения значений коэффициентов b_i и b_{ij} полином (3.11) принимает вид регрессионной зависимости Y – эквивалентного сопротивления цеховой сети [13; 26]:

$$\begin{aligned}
 Y = & 17,94 - 6,68 f_1 + 9,73 f_2 - 4,06 f_3 - 1,29 f_4 + 0,33 f_5 - \\
 & - 4,10 f_1 f_2 + 1,35 f_1 f_3 + 0,16 f_1 f_4 - 0,29 f_1 f_5 - 2,14 f_2 f_3 + 0,83 f_2 f_4 + \\
 & + 0,16 f_2 f_5 + 0,21 f_3 f_4 - 0,40 f_3 f_5 + 0,71 f_4 f_5.
 \end{aligned} \tag{3.13}$$

Таблица 3.8– Матрица планирования дробного факторного эксперимента типа 2^{5-1}

<i>i/u</i>	<i>f</i> ₀	<i>f</i> ₁	<i>f</i> ₂	<i>f</i> ₃	<i>f</i> ₄	<i>f</i> ₅	<i>f</i> _{1f} ₂	<i>f</i> _{1f} ₃	<i>f</i> _{1f} ₄	<i>f</i> _{1f} ₅	<i>f</i> _{2f} ₃	<i>f</i> _{2f} ₄	<i>f</i> _{2f} ₅	<i>f</i> _{3f} ₄	<i>f</i> _{3f} ₅	<i>f</i> _{4f} ₅	<i>Y</i>
1	+	-	-	-	-	+	+	+	+	-	+	+	-	+	-	-	16,70
2	+	-	+	+	+	-	-	-	-	+	+	+	-	+	-	-	29,41
3	+	-	+	-	-	-	-	+	+	+	-	-	-	+	+	+	46,36
4	+	+	-	+	+	-	-	+	+	-	-	-	+	+	-	-	3,13
5	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	+	-	-	-	-	+	5,01
6	+	-	-	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	+	+	+	6,24
7	+	-	-	-	+	-	+	+	-	+	+	-	+	-	+	-	9,99
8	+	+	+	-	+	-	+	-	+	-	-	+	-	-	+	-	19,93
9	+	-	+	+	-	+	-	-	+	-	+	-	+	-	+	-	31,00
10	+	-	-	+	-	-	+	-	+	+	-	+	+	-	-	+	10,24
11	+	-	+	-	-	-	-	+	+	+	-	-	-	+	+	+	46,36
12	+	+	+	+	-	-	+	+	-	-	+	-	-	-	-	+	13,04
13	+	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	-	+	-	5,58
14	+	+	+	-	-	+	+	-	-	+	-	-	+	+	-	-	22,16
15	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	8,79
16	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	12,45
<i>b_j</i>	17,944	-6,682	9,734	-4,057	-1,290	0,333	-4,101	1,345	0,159	-0,293	-2,144	0,827	0,160	0,214	-0,400	0,706	

Получив значения коэффициентов для кодированных факторов \tilde{f}_i , полиномы преобразуются в натуральные величины по выражению:

$$\tilde{f}_i = \frac{f_i - f_{i0}}{\Delta f_i}, \quad (3.14)$$

где: f_i – действительное значение фактора;

Δf_i – шаг варьирования фактора;

f_{i0} – нулевой уровень фактора.

Ниже приведены значения кодированных факторов:

$$f_1 = \frac{I_{\text{доп ср}} - 27,5}{7,5} = \frac{I_{\text{доп ср}}}{7,5} - 3,67; \quad (3.15)$$

$$f_2 = \frac{l_{\text{ср}} - 16,5}{13,5} = \frac{l_{\text{ср}}}{13,5} - 1,22; \quad (3.16)$$

$$f_3 = \frac{n - 13}{3} = \frac{n}{3} - 4,33; \quad (3.17)$$

$$f_4 = \frac{k_3 - 0,725}{0,275} = \frac{k_3}{0,275} - 2,64; \quad (3.18)$$

$$f_5 = \frac{\theta_0 - 16}{14} = \frac{\theta_0}{14} - 1,14. \quad (3.19)$$

Подставив указанные значения кодированных факторов в уравнение регрессии, после преобразований [85] получаем полином в натуральном масштабе, который будет иметь вид

$$\begin{aligned} R_3 = & 48,55 - 1,01 \cdot I_{\text{доп ср}} + 2,34 \cdot l_{\text{ср}} - 2,15 \cdot n - 16,74 \cdot k_3 + 0,08 \cdot \theta_0 - \\ & - 0,04 \cdot I_{\text{доп ср}} \cdot l_{\text{ср}} + 0,06 \cdot I_{\text{доп ср}} \cdot n + 0,08 \cdot I_{\text{доп ср}} \cdot k_3 + 0,22 \cdot l_{\text{ср}} \cdot k_3 - \\ & - 0,05 \cdot l_{\text{ср}} \cdot n + 0,18 \cdot k_3 \cdot \theta_0 + 0,25 \cdot n \cdot k_3, \end{aligned} \quad (3.20)$$

где величины, входящие в полином, принадлежат следующим диапазонам изменения: R_3 – мОм; $I_{\text{доп ср}} \in [20 \div 35]$ А; $l_{\text{ср}} \in [3 \div 30]$ м; $n \in [10 \div 16]$; $k_3 \in [0,45 \div 1]$;

$\theta_0 \in [2 \div 30]^\circ\text{C}$. Данное уравнение регрессии используется при моделировании расчетного отпуска электроэнергии.

Блок-схема определения эквивалентного сопротивления и расчетного отпуска электроэнергии для радиальных схем, реализованная в программной среде MATLAB, представлена на рисунке 3.9.

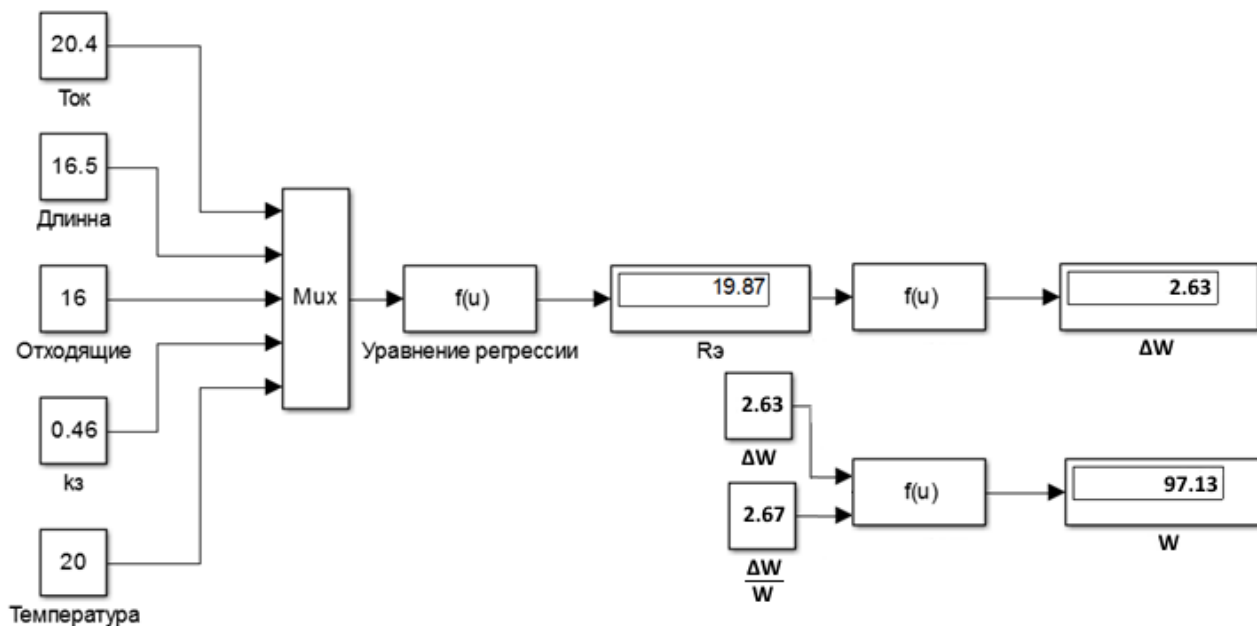


Рисунок 3.9–Блок-схема определения эквивалентного сопротивления и расчетного отпуска электроэнергии для радиальных схем в программной среде MATLAB

Таким образом, для определения электропотребления приемников электроэнергии цеховой сети целесообразно составлять математические модели, параметры которых определяются, используя регрессионный анализ, в функции параметров сети.

3.5 Выводы

1. Установлено, что эквивалентное сопротивление цеховой сети целесообразно рекомендовать к использованию для решения задач определения, планирования электропотребления в системах промышленного электроснабжения.
2. Разработан алгоритм использования среднего (за год) эквивалентного сопротивления сети как годового планового показателя для осуществления оперативного контроля за ходом выполнения плана электропотребления и потерь. Возможно также вскрывать ошибки планирования как по текущему, так и по предыдущим годам.
3. По результатам исследований показана возможность объективной сравнительной оценки уровня потерь на промышленных предприятиях (что невозможно сделать путем сравнения традиционных процентов потерь) и определять фактическое снижение потерь от совокупного действия мероприятий, внедренных как в текущем, так и в предыдущие годы.
4. В результате экспериментальных и теоретических исследований получены аналитические и графические зависимости изменения сопротивлений контактных соединений НКА в зависимости от сроков и режимов эксплуатации.
5. В качестве мероприятий по энергосбережению предложена замена НКА в зависимости от срока отработанного ресурса.
6. Проведена технико-экономическая оценка замены НКА в зависимости от срока эксплуатации. Экономия от проводимых мероприятий по энергосбережению может составлять от 5,13 тыс.руб. до 6,44 тыс.руб. для участка цеха с суммарной мощностью силового пункта 26,9 кВт (в ценах на НКА 2016 г.).
7. Разработаны регрессионные модели определения эквивалентного сопротивления сети с учетом основных параметров оборудования.
8. Разработан алгоритм и модели для определения расчетного отпуска электроэнергии для радиальных схем в программной среде MATLAB(рис. 3.9).

ГЛАВА 4. ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДИКИ ПЛАНИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭКВИВАЛЕНТНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ЦЕХОВЫХ СЕТЕЙ НА ПРИМЕРЕ ЦЕХОВОЙ СЕТИ ПАО «КАЗАНЬОРГСИНТЕЗ»

4.1. Планирование расхода электроэнергии по величине эквивалентного сопротивления цеховой сети

Потери активной мощности в трехфазной сети в любом элементе с сопротивлением элемента R и током в фазе I определяются по выражению

$$\Delta P_{\text{пот}} = 3I^2 \cdot R. \quad (4.1)$$

Потери электроэнергии ΔW при этом определяются методом времени потерь [74] по выражению

$$\Delta W = \Delta P_{\text{пот}} \cdot T, \quad (4.2)$$

где T – время рассматриваемого периода.

Из выражений (4.1) и (4.2) следует, что чем точнее определены величины тока в фазе (I) и сопротивления элемента (R) [26], тем точнее можно определить потери мощности ($\Delta P_{\text{пот}}$) и следовательно потери электроэнергии (ΔW) [16; 25].

Эквивалентное сопротивление линии $R_{\text{эк}}(t)$ складывается из сопротивления линии ($r_{20} \cdot l$) и суммы сопротивлений контактных систем аппаратов

$$R_{\text{эк}}(t) = r_{20} \cdot l \left[1 + \alpha (\theta_{\text{пр}} - 20^\circ) \right] + \sum_{i=1}^k r_{i,\text{ап}}, \quad (4.3)$$

где $r_{i,\text{ап}}$ – сопротивления контактных соединений установленных на линии НКА; α – температурный коэффициент увеличения сопротивления; $\theta_{\text{пр}}$ – температура проводника.

Распределение по элементам сети потерь электроэнергии определяется соотношениями между сопротивлениями элементов и токами в сети [52].

Для апробации разработанной методики проведена оценка планирования электропотребления цеховой сети предприятия ПАО «Казаньоргсинтез». Для участка низковольтной сети, со схемой, изображенной на рисунке 4.1, по имеющейся информации об установленной мощности приемников электроэнергии и их режимах работы (загрузка электрооборудования), а также количестве, марках и типах установленных аппаратов, сечении и длинах линий цеховой сети (таблица 4.1) определены потери мощности, в соответствии с выражением (4.1).

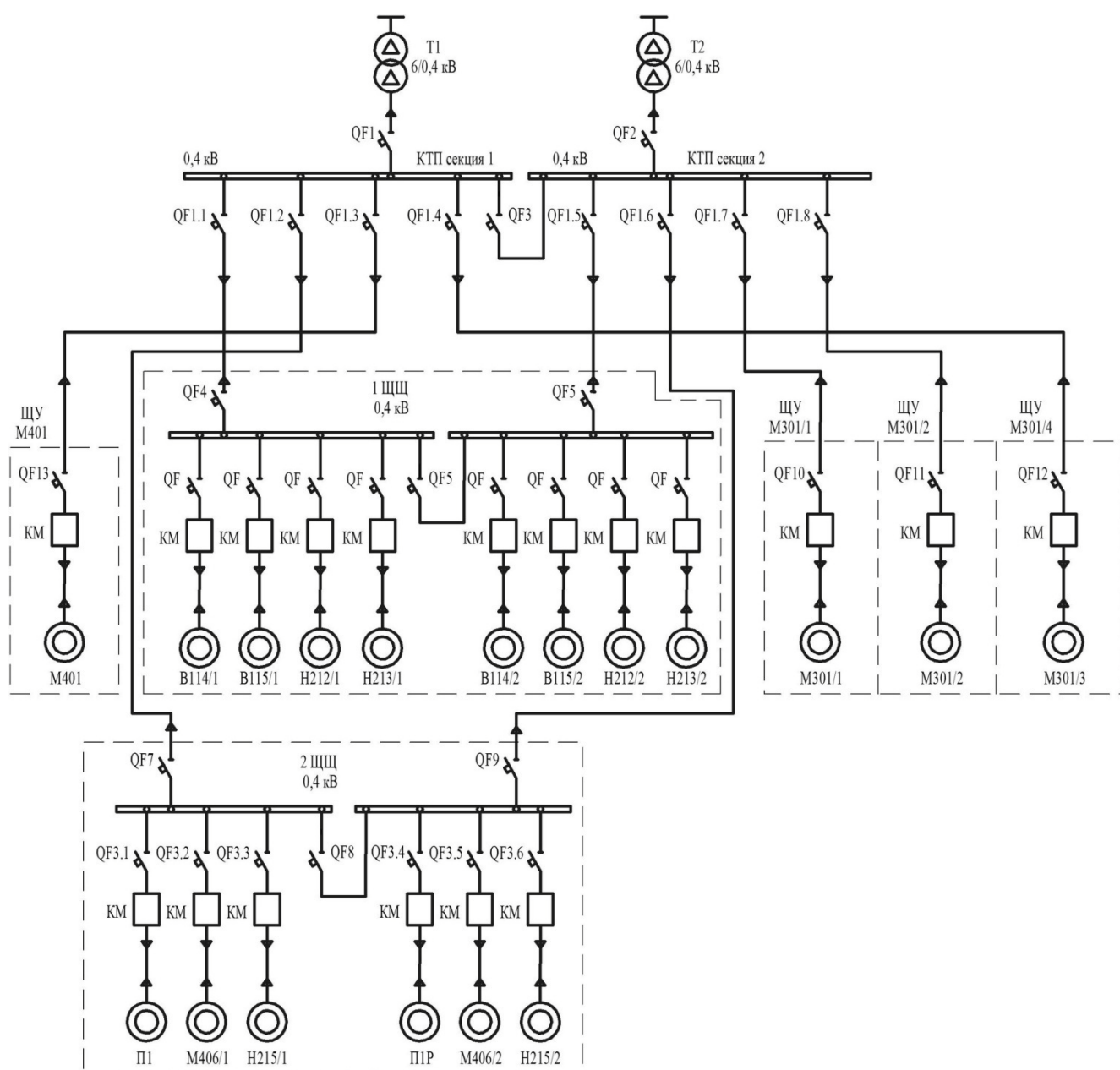


Рисунок 4.1– Схема распределительной сети 0,4кВ

Таблица 4.1– Данные по кабелям и НКА распределительной сети

№ п/п	Назначение линии		Характеристика приемника эл.эн.		Кабель			Установленный на линии НКА ($I_{ном}$)	
	Начало	Конец	Ном. мощность, кВт	Коэф-т загрузки	Марка	Кол-во, сечение	Длина, м	Автоматический выключатель	Магнитный пускатель
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	КТП (секция 1)	1ШЩ (секция 1)	345	0,61	ВВГнг	3, 4x150	19	Masterpact NT10N1(1000A), Compact NS630 (630A)	–
2	КТП (секция 2)	1ШЩ (секция 2)	350	0,58	ВВГнг	3, 4x150	23	Masterpact NT10N1(1000A), Compact NS630 (630A)	–
3	КТП (секция 1)	2ШЩ (секция 1)	100	0,70	ВВГнг	1, 4x120	166	Compact NS250 (250A), Compact NS250 (200A)	–
4	КТП (секция 2)	2ШЩ(секция 2)	120	0,60	ВВГнг	1, 4x120	159	Compact NS250 (250A), Compact NS250 (200A)	–
5	КТП (секция 2)	м-301\1(ШУ)	300	0,80	ВВГнг	2, 4x70	79	Compact NS630 (630A)	–
6	КТП(секция 2)	м-301\2(ШУ)	340	0,60	ВВГнг	2, 4x70	90	Compact NS630 (630A)	–
7	КТП(секция 1)	м-301\3(ШУ)	300	0,65	ВВГнг	2, 4x70	98	Compact NS630 (630A)	–

Продолжение таблицы 4.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
8	КТП(секция1)	м-401(ШУ)	330	0,72	ВВГнг	3, 4x150	159	Compact NS630 (630A)	–
9	м-301\1(ШУ)	м301\1(М)	220	0,85	ВВГнг	1, 4x150	10	BA51-39-340015- 20УХЛ3 (400A)	LC1-F4004P7 (400A)
10	м-301\1(ШУ)	м301\1(М)	180	0,84	ВВГнг	1, 4x120	10	BA51-39-340015- 20УХЛ3 (400A)	LC1-F4004P7 (400A)
11	м-301\2(ШУ)	м301\2(М)	218	0,85	ВВГнг	1, 4x150	10	BA51-39-340015- 20УХЛ3 (400A)	LC1-F4004P7 (400A)
12	м-301\2(ШУ)	м301\2(М)	215	0,75	ВВГнг	1, 4x120	10	BA51-39-340015- 20УХЛ3 (400A)	LC1-F4004P7 (400A)
13	м-301\3(ШУ)	м301\3(М)	190	0,71	ВВГнг	1, 4x150	10	BA51-39-340015- 20УХЛ3 (400A)	LC1-F4004P7 (400A)
14	м-301\3(ШУ)	м301\3(М)	185	0,82	ВВГнг	1, 4x120	10	BA51-39-340015- 20УХЛ3 (400A)	LC1-F4004P7 (400A)
15	м-401(ШУ)	м-401(М)	300	0,55	ВВГнг	6, 1x185	15	Compact NS630 (630A)	LC-F630P7 (630A), LC1- F500P7 (500A)
16	1ШЩ(секция1)	В114/1(М)	40	0,85	ВВГ	1, 4x25	28	GV3ME 08 (80A)	LC-D80P7 (80A)
17	1ШЩ (секция1)	Н212/1(М)	80	0,81	ВВГнг	1, 4x50	79	Compact NS160N(160A)	LC-F150P7 (150A)
18	1ШЩ(секция1)	Н213/1(М)	75	0,78	ВВГнг	1, 4x50	102	Compact NS160N(160A)	LC-F150P7 (150A)
19	1ШЩ(секция1)	В115/1(М)	120	0,82	ВВГ	1, 4x70	30	Compact NS250N(250A)	LC-F150P7 (150A)

Окончание таблицы 4.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
20	1ШЩ (секция 2)	В114/2(М)	40	0,81	ВВГ	1, 4x25	35	GV3ME80 (80A)	LC1-D80P7 (80A)
21	1ШЩ (секция 2)	В115/2(М)	130	0,72	ВВГ	1, 4x70	50	Compact NS250N(250A)	LC-F150P7 (150A)
22	2ШЩ (секция1)	П1(М)	20	0,88	КГ	1, 4x10	30	GV3ME63 (40A)	LC1-D40P7 (40A)
23	2ШЩ (секция1)	Н215/1(М)	15	0,85	ВВГнг	1, 4x4	66	GV2ME 32 (32A)	LC1-D32P7 (32A)
24	2ШЩ (секция1)	Н406/1(М)	12	0,75	ВВГнг	1, 4x4	25	GV2ME22 (25A)	LC1-D32P7 (32A)
25	2ШЩ(секция 2)	П1р(М)	20	0,75	КГ	1, 4x10	20	GV3ME63 (40A)	LC1-D32P7 (32A)
26	2ШЩ (секция 2)	Н215/2(М)	12	0,80	ВВГнг	1, 4x4	66	GV2ME32 (32A)	LC1-D32P7 (32A)
27	2ШЩ (секция 2)	Н406/2(М)	2	0,92	ВВГнг	1, 4x4	25	GV2ME 10 (10A)	LC1-D32P7 (32A)

Данные по потерям мощности в контактных системах автоматических выключателей, определенные по каталожным данным и по выражению (4.1) представлены в таблице 4.2, по магнитным пускателям и контакторам в таблицах 4.3 и 4.4 соответственно.

Таблица 4.2– Технические данные автоматических выключателей

Номинальный ток, I_n А	Потери мощности, Вт		Сопротивление, мОм	
	IEK	Schneider Electric	IEK	Schneider Electric
1	1,2	2,1	1200	2076
2	1,3	2,2	325	539
3	1,3	2,2	144,4	249
4	1,4	2,3	87,5	145
6	1,8	2,5	50	68,9
10	1,9	2,8	19	27,9
16	2,7	3,3	10,5	12,8
20	3	3,6	7,5	8,9
25	2,8	4,0	4,5	6,3
32	3,1	4,5	3,03	4,37
40	3,7	5,1	2,31	3,16
50	4,5	5,7	1,80	2,29
63	5,2	6,6	1,31	1,67
80	7,1	7,7	1,11	1,20
100	7,5	8,9	0,75	0,89
125	8,3	10,2	0,53	0,65
160	10	11,8	0,39	0,46
250	16,7	15,0	0,27	0,24
400	20	19,2	0,13	0,12
800	32	32,0	0,04	0,05

Таблица 4.3– Технические данные магнитных пускателей

Номинальный ток, I_H А	Потери мощности, Вт		Сопротивление, мОм	
	КЭАЗ	Schneider Electric	КЭАЗ	Schneider Electric
10	4,16	4,35	41,63	43,49
16	9,45	9,88	36,92	38,58
25	19,27	20,14	30,84	32,22
32	27,45	28,68	26,81	28,01
40	36,55	38,19	22,85	23,87
63	57,24	59,81	14,42	15,07
100	56,86	67,56	5,69	6,76
125	69,19	82,21	4,43	5,26
160	79,89	94,92	3,12	3,71
200	83,67	99,42	2,09	2,49
250	79,29	94,22	1,27	1,51
400	45,29	53,82	0,28	0,34

Таблица 4.4– Технические данные контакторов

Schneider Electric			КЭАЗ		
Номинальный ток, I_H А	Потери мощности, Вт	Сопротивление, мОм	Номинальный ток, I_H А	Потери мощности, Вт	Сопротивление, мОм
9	0,2	2,36	9	0,24	2,96
12	0,36	2,18	12	0,8	2,78
25	1,6	1,59	26	0,6	0,89
32	2	1,49	30	0,9	1,00
40	2,9	1,28	40	1,3	0,81
50	3,7	1,06	50	1,3	0,52
65	4,2	0,80	63	1,5	0,38
80	5,1	0,70	75	2	0,36
95	7,2	0,62	95	2,7	0,30
115	7,9	0,50	110	3,6	0,30
-	-	-	145	5	0,24
-	-	-	185	8	0,23
-	-	-	210	9	0,20
-	-	-	260	14	0,21
-	-	-	300	18	0,20
-	-	-	400	16	0,10

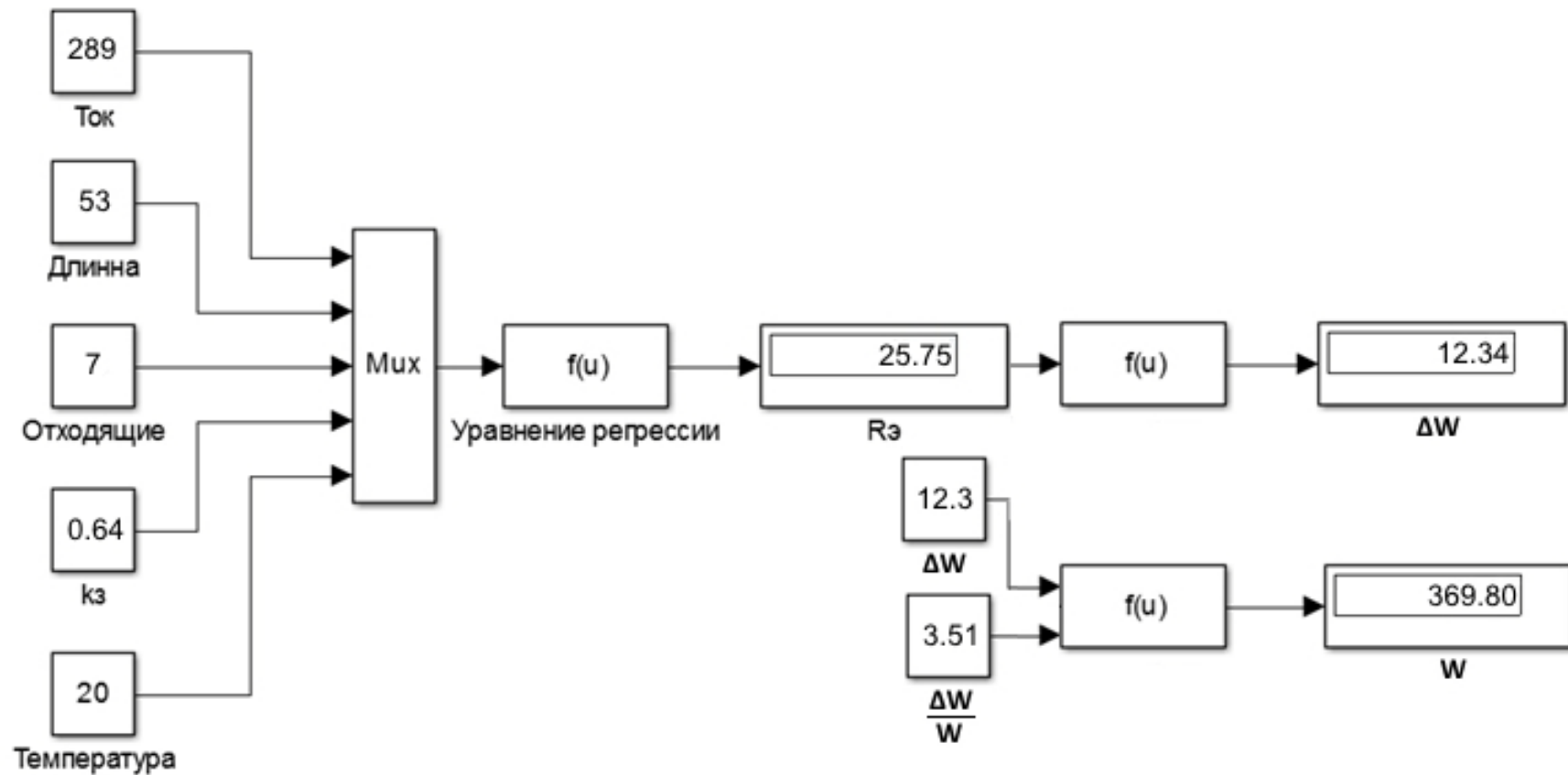


Рисунок 4.2–Блок-схема определения расчетного отпуска электроэнергии для потребителей радиальных схем цехов в программной среде MATLAB

На рисунке 4.2 представлена блок-схема определения эквивалентного сопротивления цеховых радиальных схем и электропотребления цеха, реализованной в программной среде MATLAB, текст программы представлен в приложении Б.

Для рассматриваемого участка сети ПАО «Казаньоргсинтез» сгруппированы линии с учетом номинальных токов аппаратов защиты (автоматических выключателей) по следующим характеристикам:

- автоматические выключатели с $I_{н,} = 25 \div 63$ А, длина линии $l_{ср} = 20 \div 70$ м;
- автоматические выключатели с $I_{н,} = 80 \div 160$ А, длина линии $l_{ср} = 30 \div 100$ м;
- автоматические выключатели с $I_{н,} = 250 \div 400$ А, длина линии $l_{ср} = 10 \div 170$ м;
- автоматические выключатели с $I_{н,} = 630 \div 1000$ А, длина линии $l_{ср} = 5 \div 165$ м.

Группировка осуществляется для снижения погрешности значений эквивалентного сопротивления, рассчитанного по регрессионной модели глава 3, выражение (3.20), от значений, рассчитанных по потерям мощности (2.8). Границы номинальных токов аппаратов и длины линий выбраны с целью уменьшения разброса этих значений, что повышает точность определения эквивалентного сопротивления.

Для определения электропотребления приемников электроэнергии цеховой сети разработаны специализированные модели с использованием аппарата регрессионного анализа, представленного в главе 3 (3.20).

Разработанная модель определения эквивалентного сопротивления рассматриваемого участка цеховой сети ПАО «Казаньоргсинтез» имеет следующий вид:

$$R_3 = 78,06 - 0,11 \cdot I_{\text{доп ср}} + 0,50 \cdot l_{\text{ср}} - 7,95 \cdot n - 9,11 \cdot k_3 + 0,045 \cdot \theta_0 + 0,014 \cdot I_{\text{доп ср}} \cdot n - 0,019 \cdot l_{\text{ср}} \cdot n + 0,036 \cdot l_{\text{ср}} \cdot k_3 + 0,077 \cdot n \cdot k_3 - 0,014 \cdot n \cdot \theta_0 + 0,24 \cdot k_3 \cdot \theta_0, \quad (4.4)$$

где $I_{\text{доп ср}}$ - средний допустимый длительный ток линий, А;

$l_{\text{ср}}$ -средняя длина линий, м;

n – количество линий;

k_3 – средний коэффициент загрузки линии;

θ_0 -температура окружающей среды, °С.

Потери электроэнергии в цеховой сети могут быть определены по эквивалентному сопротивлению по выражению:

$$\Delta W = \frac{R_3^{\text{ср}} P_{\text{ср}}^2 T}{U_{\text{ср}}^2 \cos^2 \varphi_{\text{ср}}} \quad (4.5)$$

С учетом неизменности технологии и количества выпускаемой продукции потери электроэнергии для рассматриваемого участка цеховой сети ПАО «Казаньоргсинтез» составляют 3,51% от беспотерного потребления электроэнергии:

$$\frac{\Delta W_{2014}}{W_{\text{бн}} 2014} \cdot 100\% = \frac{12,52 \text{ MBm}}{356,6 \text{ MBm}} \cdot 100\% = 3,51\% ;$$

$$\frac{\Delta W_{2015}}{W_{\text{бн}} 2015} \cdot 100\% = \frac{12,65 \text{ MBm}}{360,4 \text{ MBm}} \cdot 100\% = 3,51\% ,$$

где ΔW_{2014} , ΔW_{2015} - потери электроэнергии на участке цеховой сети, изображенной на рис. 4.1 за 2014 и 2015 гг. соответственно;

$W_{\text{бн}} 2014$, $W_{\text{бн}} 2015$ - беспотерное потребление электроэнергии (расход электроэнергии на технологию) на том же участке сети за 2014 и 2015 гг.

Потери электроэнергии за 2014 г. определены по выражению (4.5), где $P_{\text{ср}}^2 = 12,34 \text{ МВт}^2 \times 10^{-3}$; $T = 1980$ ч; $U_{\text{ср}} = 0,4$ кВ; $\cos \varphi_{\text{ср}} = 0,59$; $R_3^{\text{ср}} = R_{3,0} = 25,75$ мОм – эквивалентное сопротивление рассматриваемого участка сети с низковольтными коммутационными аппаратами, установленными в данном году.

При неизменности технологического процесса в последующие годы беспотерное потребление электроэнергии ($W_{\text{бн}}$) от начального эквивалентного сопротивления ($R_{3,0}$) цеховой сети будет иметь зависимость:

$$W_{\text{он}} = \frac{100}{3,51} \cdot \frac{R_{\text{э}0} P_{\text{ср}}^2 T}{U_{\text{ср}}^2 \cos^2 \varphi_{\text{ср}}}, \quad (4.6)$$

где 3,51 – процент потерь электроэнергии, определенный ранее.

С учетом выражений (4.5) и (4.6) расчетный отпуск электроэнергии в сеть составит:

$$W_p = \frac{R_{\text{э}}^{\text{ср}} P_{\text{ср}}^2 T}{U_{\text{ср}}^2 \cos^2 \varphi_{\text{ср}}} + \frac{R_{\text{э}0} P_{\text{ср}}^2 T}{U_{\text{ср}}^2 \cos^2 \varphi_{\text{ср}}} \cdot \frac{100}{3,51} \quad (4.7)$$

Погрешность расчетного отпуска электроэнергии, найденного по эквивалентному сопротивлению по (4.7), от фактически потребленной электроэнергии цеховыми потребителями ПАО «Казаньоргсинтез» за 2014-2015 гг. приведена в таблице 4.5.

Таблица 4.5– Расход электроэнергии по годам

Параметр	Год	
	2014	2015
Отпуск энергии в сеть W , МВтч	373,05	374,68
Расчетный отпуск энергии в сеть W_p , МВтч	369,8	370,3
Погрешность W_p от W , %	-1,03	-1,19

В качестве проверки адекватности регрессионной модели (4.4) используется подход Закгейма Д.А., который заключается в том, что задается допустимое отклонение искомой величины в процентах.

Если во всех точках плана отклонение значения, полученного по регрессионной модели от фактического значения не превышает допустимого, то считается, что модель адекватно описывает процесс.

В исследуемой схеме (рисунок 4.1), если задаться допустимой точностью модели определения эквивалентного сопротивления 5%, показано, что отклонения не превышают заданные значения и уравнение адекватно описывает процесс,

погрешность в определении расчетного отпуска электроэнергии составляет менее 2% (таблица 4.6).

Таблица 4.6– Результаты вычислений значений функции цели в дополнительных точках

Год наблюдения	R_3 по уравнению регрессии (4.4)	R'_3 , вычисленное поэлементно по выражению (2.8)	$ R'_3 - R_3 $	Расхождение $(R'_3 - R_3)/R'_3 \cdot 100, \%$	Расчетный отпуск электроэнергии в сеть W_p , МВтч	Фактический отпуск электроэнергии в сеть W , МВтч	Погрешность $(W_p - W)/W \cdot 100, \%$
2014	25,75	24,66	1,09	4,4	369,8	373,1	-1,03
2015	27,23	28,63	1,40	-4,9	370,3	374,7	-1,19

Для оценки точности эксперимента для каждой i -й точки факторного пространства (для каждого сочетания уровней факторов матрицы планирования) проводят K опытов. В результате получают значения $y_{i1}, y_{i2}, \dots, y_{iK}$ исследуемого параметра, для которых находят среднее значение

$$\bar{y}_i = \frac{1}{K} \sum_{t=1}^K y_{it} \quad (4.8)$$

В нашем случае проведение K опытов заключается в расчете эквивалентного сопротивления радиальной сети с увеличением пределов варьирования значимых факторов для различных группировок линий (таблица 4.7).

Таблица 4.7– Пределы варьирования факторов для K опытов

Опыт K	Предел	Фактор						
		I группа		II группа		III группа	IV группа	V группа
		I_H	l_{cp}	I_H	l_{cp}	l_{cp}	l_{cp}	l_{cp}
1	min	80	30	250	5	70	5	15
	max	160	100	400	50	100	20	25
2	min	75	25	240	4	65	4	14
	max	160	100	400	50	100	20	25
3	min	80	30	250	5	70	5	15
	max	165	105	410	51	105	21	26

По каждой строчке плана находится сумма квадратов отклонений

$$\sum_{t=1}^K (y_{it} - \bar{y}_i)^2 = \sum_{t=1}^K \Delta y^2, \quad (4.9)$$

где t – номер повторности опыта;

i – номер строки.

Далее осуществляется проверка воспроизводимости опытов (однородности дисперсий). Опыт считается воспроизводимым, если дисперсия D_{y_i} выходного параметра y_i однородна в каждой точке факторного пространства. Оценка S_{y_i} дисперсии D_{y_i} определяется для каждой точки факторного пространства по формуле

$$S_{y_i}^2 = \frac{1}{(K-1)} \sum_{t=1}^K (y_{it} - \bar{y}_i)^2 \quad (4.10)$$

В таблице 4.8 представлены результаты y_{iK} , полученные для 3-х опытов, значения построчных дисперсий $S_{y_i}^2$ для каждой строки.

Сумма построчных дисперсий, рассчитанных по (4.10) составляет $S_{y_i}^2 = 73,23$.

Таблица 4.8– Матрица планирования для трех серий опытов ДФЭ типа 2^{5-1}

N n/n	x_0	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5		y_1	y_2	y_3	\bar{y}_i	$S_{y_i}^2$	y_{ip}
1	+1	-1	-1	-1	-1	+1		72,86	75,41	71,04	73,10	4,82	73,10
2	+1	+1	-1	-1	-1	-1		20,22	20,93	19,71	20,29	0,37	20,29
3	+1	-1	+1	-1	-1	-1		164,31	170,06	160,21	164,86	24,52	164,86
4	+1	+1	+1	-1	-1	+1		45,50	47,09	44,36	45,65	1,88	45,65
5	+1	-1	-1	+1	-1	-1		33,96	35,14	33,11	34,07	1,05	34,07
6	+1	+1	-1	+1	-1	+1		10,66	11,03	10,39	10,69	0,10	10,69
7	+1	-1	+1	+1	-1	+1		90,82	94,00	88,55	91,12	7,49	91,12
8	+1	+1	+1	+1	-1	-1		20,82	21,55	20,30	20,89	0,39	20,89
9	+1	-1	-1	-1	+1	-1		59,49	61,58	58,01	59,69	3,21	59,69
10	+1	+1	-1	-1	+1	+1		15,27	15,81	14,89	15,32	0,21	15,32
11	+1	-1	+1	-1	+1	+1		178,88	185,14	174,40	179,47	29,06	179,47
12	+1	+1	+1	-1	+1	-1		41,81	43,27	40,77	41,95	1,59	41,95
13	+1	-1	-1	+1	+1	+1		29,75	30,79	29,00	29,85	0,80	29,85
14	+1	+1	-1	+1	+1	-1		7,64	7,90	7,45	7,66	0,05	7,66
15	+1	-1	+1	+1	+1	-1		89,44	92,57	87,20	89,74	7,27	89,74
16	+1	+1	+1	+1	+1	+1		20,91	21,64	20,38	20,98	0,40	20,98

Гипотезу однородности (равенства) дисперсий проверяют с помощью критерия Кохрена. Расчетное значение этого критерия определяют по формуле

$$G_p = \frac{S_{y_i \max}^2}{\sum_{i=1}^N S_{y_i}^2}, \quad (4.11)$$

где $S_{y_i \max}^2$ – наибольшее значение $S_{y_i}^2$ из всех строчек;

$\sum_{i=1}^N S_{y_i}^2$ – сумма построчных дисперсий, найденных по (4.10).

Наибольшее значение приходится на 11-ую строку $S_{y_{11} \max}^2 = 29,06$, тогда расчетное значение Кохрена по (4.11) $G_p = 0,4$.

Полученное значение критерия Кохрена сравнивается с критическим значением. Критическое значение $G_{кр}$ находят из таблицы распределения Кохрена по числу степеней свободы числителя $f_1 = K - 1$, знаменателя $f_2 = N$ и уровню значимости q [87]. Если $G_p < G_{кр}$, гипотеза об однородности дисперсий принимается, в противном случае – отвергается, и тогда эксперимент необходимо повторить, изменив условия его проведения.

Для определения табличного значения критерия Кохрена предварительно находим число степеней свободы $f_1 = K - 1 = 3 - 1 = 2$, а $f_2 = N = 16$. Так как $f_2 = 16$ и такого значения в таблице нет, то приходится применять интерполирование.

В результате $G_{кр} = 0,455$. Поскольку $0,4 < 0,455$, то опыт воспроизводим. Следовательно, можно приступить к обработке опытных данных.

Для проверки гипотезы об адекватности математической модели необходимо сравнить две дисперсии:

1) Дисперсия неадекватности определяется по формуле

$$S_a^2 = \frac{1}{(N - C)} \sum_{i=1}^N (y_{ip} - \bar{y}_i)^2, \quad (4.12)$$

где C – число значимых коэффициентов исследуемого уравнения регрессии (4.4), не считая b_0 .

y_{ip} – теоретическое значение выходной величины, вычисленное по регрессионной модели.

В нашем случае число значимых коэффициентов определяется из уравнения регрессионной модели (4.4) $C = 11$, не считая b_0 , тогда по выражению (4.12) $S_a^2 = 1,41$, где сумма квадратов отклонений определяется суммированием разности значений соответствующих столбцов таблицы 4.8.

2) Дисперсия неоднородности, характеризующая погрешности наблюдений (генеральная дисперсия воспроизводимости эксперимента), найденная по выражению

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^N S_{yi}^2}{N}, \quad (4.13)$$

составляет $S^2 = 2,74$.

Адекватность математической модели проверяется по F – критерию Фишера. Его расчетное значение находят как частное от деления оценки дисперсии неадекватности на оценку дисперсии единичного наблюдения

$$F_p = \frac{S^2}{S_a^2}, \quad (4.14)$$

причем $S^2 > S_a^2$, если это условие не выполняется, их нужно поменять местами.

Критическое значение $F_{кр}$ находят из таблицы распределения Фишера по числу степеней свободы числителя $f_1 = K \cdot (N - C)$, знаменателя $f_2 = N \cdot (K - 1)$ и уровню значимости q [87]. Если $F_p < F_{кр}$ гипотеза об адекватности подтверждается.

Полученное расчетное значение критерия Фишера $F_p = 1,94$ сравнивается с табличным $F_{кр} = 1,99$, для числа степеней свободы $f_1 = 3(16 - 11) = 15$ и

$f_2 = 16(3 - 1) = 32$ [87], подтверждая тем самым адекватность рассматриваемой модели.

Учитывая увеличение сопротивления контактных соединений автоматических выключателей и магнитных пускателей в процессе эксплуатации динамика изменения эквивалентного сопротивления схемы цеховой сети, представленной на рисунке 4.1, по годам приведена в таблице 4.9.

Таблица 4.9– Увеличение эквивалентного сопротивления участка цеховой сети в зависимости от срока эксплуатации

t , лет	0	2	4	6	8	10	12
$R_{\text{ЭКВ}} \text{ сети, мОм}$	25,75	27,23	28,14	32,37	37,23	42,82	49,26
Потери ΔW , МВтч	12,34	13,24	13,68	15,73	18,10	20,81	23,94
Расчетный отпуск электроэнергии в сеть W_p , МВтч	369,1	369,8	370,3	372,3	374,7	377,4	380,5

На рисунках 4.3 и 4.4 представлены зависимости изменения эквивалентного сопротивления ($R_{\text{ЭКВ}}$) цеховой сети, потерь электроэнергии (ΔW) и расчетного отпуска электроэнергии (W_p) от времени эксплуатации.

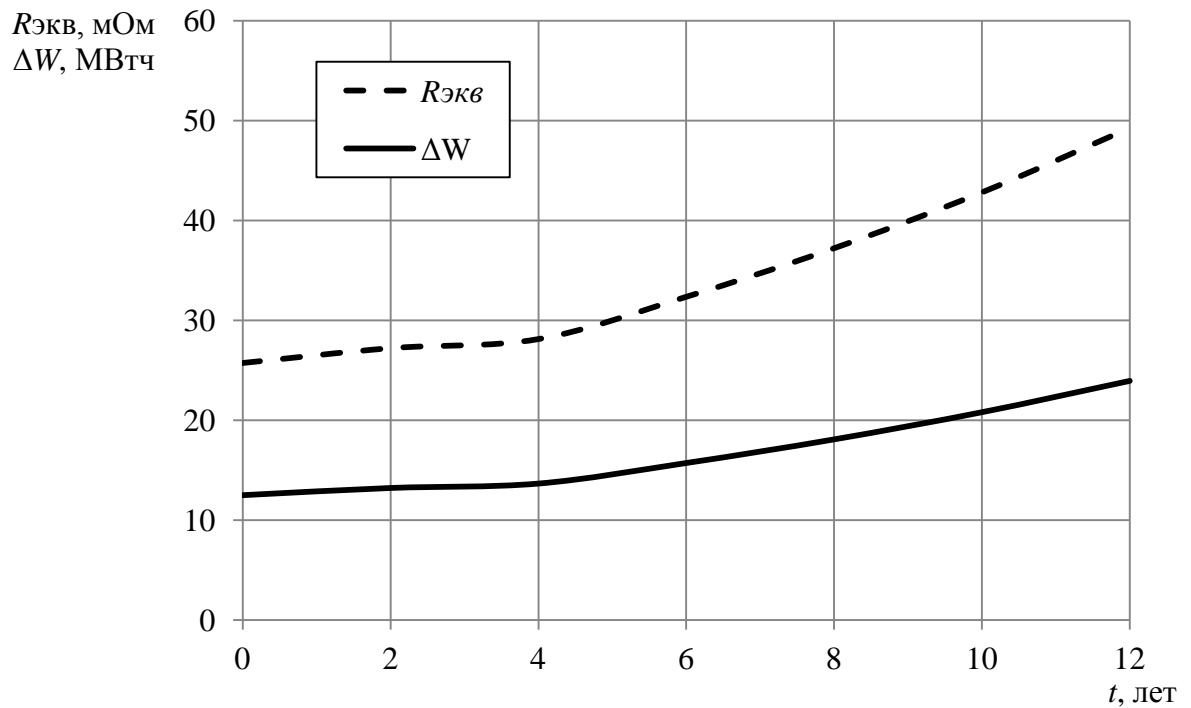


Рисунок 4.3– Зависимости изменения эквивалентного сопротивления ($R_{экв}$) цеховой сети и потерь электроэнергии (ΔW) от времени эксплуатации

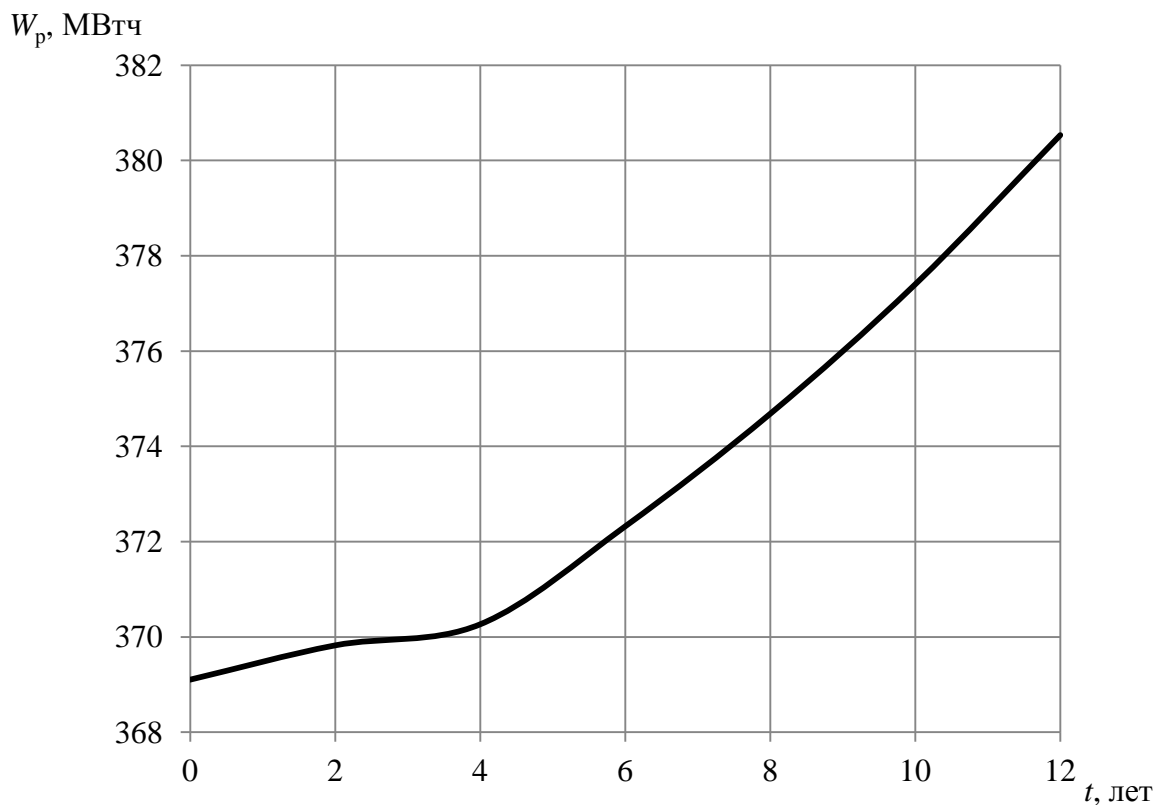


Рисунок 4.4– Зависимость изменения расчетного отпуска электроэнергии (W_p) от времени эксплуатации оборудования

На рисунке 4.5 представлено увеличение относительных потерь электроэнергии ($\Delta W_{\%}$) от времени эксплуатации, где

$$\Delta W_{\%} = \frac{\Delta W}{W_p} \cdot 100\% . \quad (4.8)$$

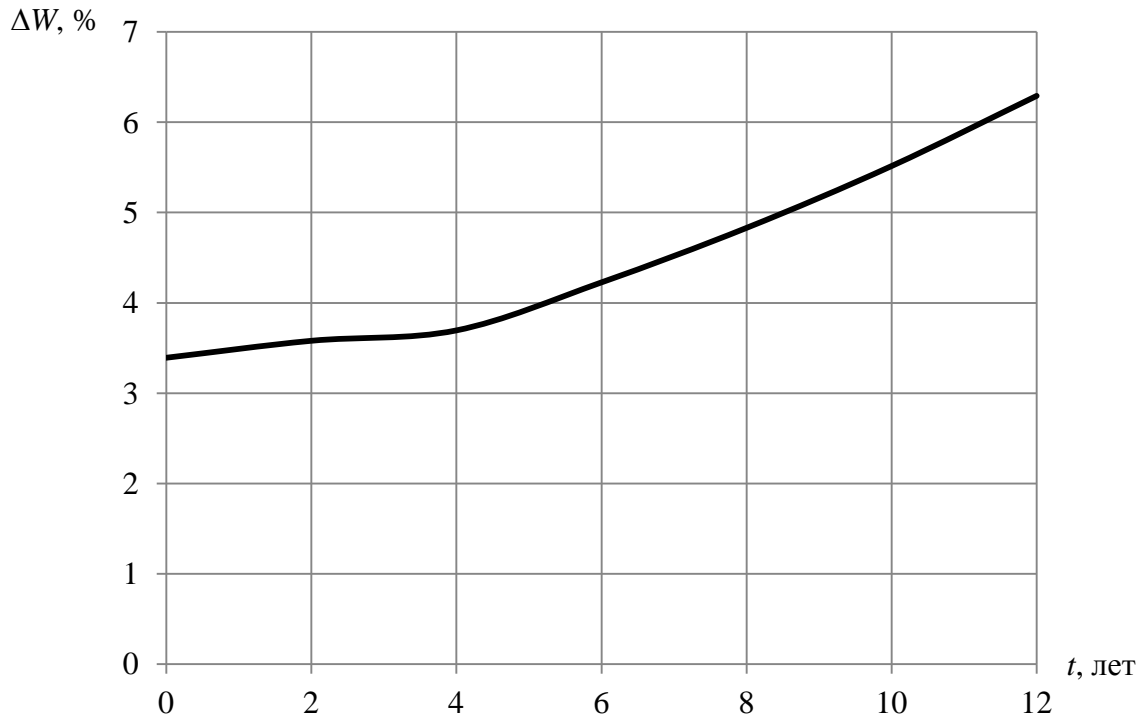


Рисунок 4.5– Зависимость изменения относительных потерь электроэнергии (%) от времени эксплуатации оборудования

Таким образом, по эквивалентному сопротивлению цеховой сети можно прогнозировать расход электроэнергии с учетом динамики увеличения сопротивления установленных низковольтных коммутационных аппаратов.

4.2. Оценка эффективности предлагаемых мероприятий по экономии электроэнергии на промышленном предприятии ПАО «Казаньоргсинтез»

По результатам исследований потерь мощности в контактных соединениях НКА, предлагаются мероприятия по замене аппаратов, имеющие наибольшие потери на аппараты российских заводов-изготовителей с меньшими потерями мощности в аппарате и аналогичными характеристиками защиты.

Для корректирования режима электропотребления [52] в цеховой сети (рисунок 4.1) и снижения потерь активной мощности в контактах и контактных соединениях коммутационных аппаратов предлагается заменить установленные НКА на аналоги, позволяющие снизить потери мощности на величину порядка $5 \div 50 \%$.

При замене 10 автоматических выключателей марки Schneider Electric с $I_n \leq 160$ А, установленных на линиях 1ШЩ – Н212/1, Н213/1, В114/1, В114/2, и 2ШЩ – П1, П1р, Н406/1, Н215/1, Н215/2, Н406/2, при 80% отработанном ресурсе на автоматы фирмы IEK, потери мощности снизятся на 70 %, что приведет к экономии электропотребления 1015,8 кВт•ч в год замены (таблица 4.10).

Таблица 4.10– Варианты замены установленных автоматических выключателей

Обозначение аппарата на схеме	Номинальный ток I_n , А	Производитель (установленные/замена)	Сопротивление, мОм	Потери мощности в 1 аппарате, Вт	Потери электроэнергии, кВт•ч/год
QF 2.1, QF 2.5	80	Schneider Electric	1,20	20,7	331,8
		IEK	1,11	7,1	113,7
QF 2.3, QF 2.4	160	Schneider Electric	0,46	31,8	508,7
		IEK	0,39	10,0	159,7
QF 3.1, QF 3.4	63	Schneider Electric	1,67	17,9	286,3
		IEK	1,31	5,2	83,2
QF 3.2	25	Schneider Electric	6,33	10,7	85,5
		IEK	4,50	2,8	22,5
QF 3.3, QF 3.6	32	Schneider Electric	4,37	12,1	193,3
		IEK	3,03	3,1	49,6
QF 3.5	4	Schneider Electric	145	6,3	50,1
		IEK	87,5	1,4	11,2
				Schneider Electric	1455,7
				IEK	439,9
				Экономия	1015,8

Для эффективного управления режимами эксплуатации и снижения электропотребления целесообразна замена контакторов, установленных в цепях электродвигателей, для аппаратов с $I_n = 26 \div 110$ А (таблица 4.4).

В таблице 4.11 представлены сравнительные характеристики установленных и предлагаемых к замене контакторов.

Таблица 4.11– Варианты замены установленных контакторов

Обозначение аппарата на схеме	Номинальный ток I_n , А	Производитель (установленные/замена)	Сопротивление, мОм	Потери мощности в 1 аппарате, Вт	Потери электроэнергии, кВт•ч/год
1ЩЩ-В114/1, 1ЩЩ-В114/2	80	Schneider Electric	0,70	12,1	193,5
	75	КЭАЗ	0,36	2,0	32,4
2ЩЩ-П1, 2ЩЩ-Пр1	65	Schneider Electric	0,80	9,1	146,0
	63	КЭАЗ	0,38	1,5	24,1
2ЩЩ-Н215/1, 2ЩЩ-Н215/2	32	Schneider Electric	1,49	4,1	65,9
	30	КЭАЗ	1,00	0,9	14,4
2ЩЩ-406/1	25	Schneider Electric	1,59	2,7	21,5
	26	КЭАЗ	0,89	0,6	4,8
				Schneider Electric	426,9
				КЭАЗ	75,7
				Экономия	351,2

При замене только 7 контакторов марки Schneider Electric с $I_n \leq 80$ А, установленных на линиях 1ЩЩ – В114/1, В114/2, и 2ЩЩ – П1, Пр1, Н215/1, Н215/2, Н406/1, на 80% ресурса на контакторы завода КЭАЗ, потери мощности снизились на 82 %, что приведет к годовой экономии электропотребления 351,2 кВт•ч.

С учетом замены приведенных аппаратов на 80% сроке их эксплуатации изменение эквивалентного сопротивления схемы и расчетного отпуска электроэнергии представлено в таблице 4.12.

Таблица 4.12– Изменение расчетного отпуска электроэнергии в сеть на участке цеховой сети при проведении энергоэффективных мероприятий

t , лет		0	2	4	6	8	10	12
$R_{\text{экв сети}}$, МОм	было	25,75	27,23	28,14	32,37	37,23	42,82	49,26
	стало						29,64	32,39
Потери ΔW , МВтч	было	12,34	13,24	13,68	15,73	18,10	20,81	23,94
	стало						14,41	15,74
Расчетный отпуск энергии в сеть W_p , МВтч	было	369,1	369,8	370,3	372,3	374,7	377,4	380,5
	стало						371,0	372,3
Стоимость потерь э/э, тыс. руб.	было	50,07	52,94	54,71	62,94	72,39	83,26	95,78
	стало						57,63	62,97
Экономия от замены аппаратов	тыс. руб.						25,63	32,80
	%						1,70	2,16

На рисунке 4.6 представлено изменение расчетного отпуска электроэнергии с учетом замены низковольтных коммутационных аппаратов.

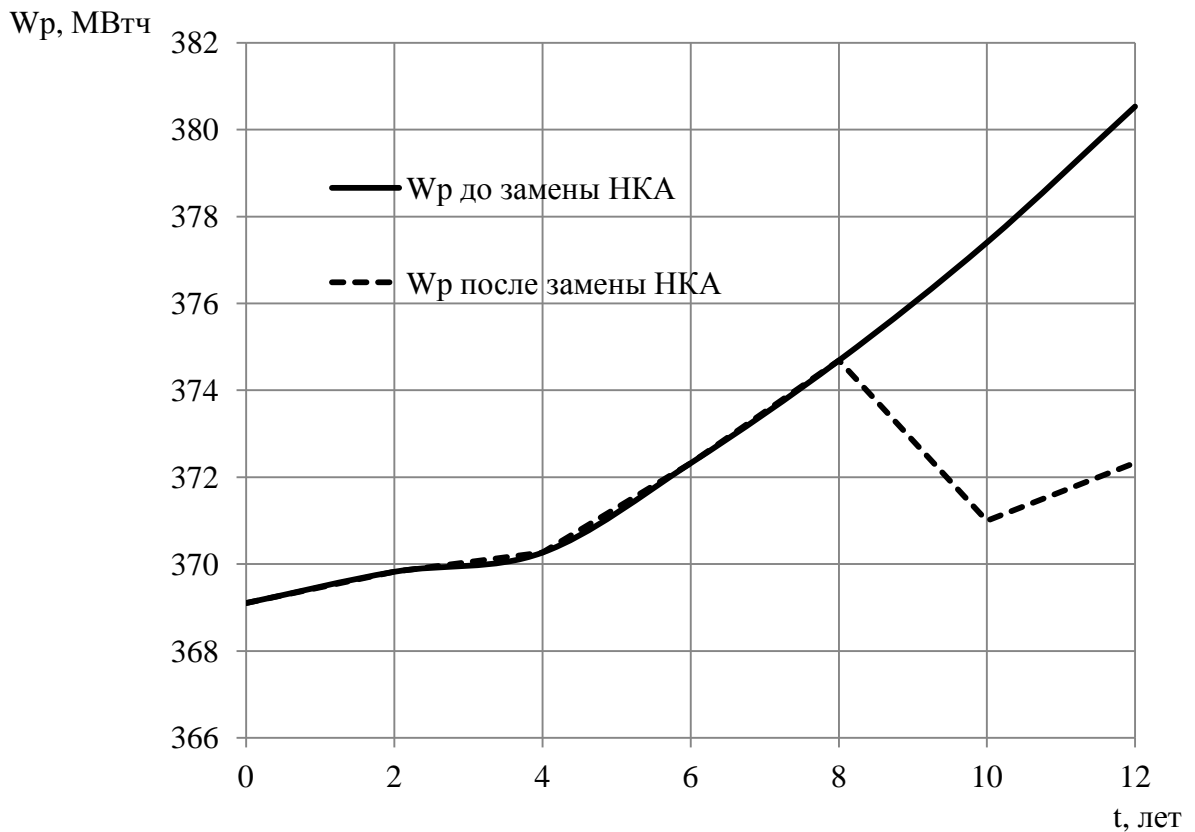


Рисунок 4.6– Зависимости изменения расчетного отпуска электроэнергии (W_p) от времени эксплуатации до и после замены НКА

Замена коммутационных аппаратов при отработке ресурса на 80% является эффективным мероприятием, позволяя снизить расход электроэнергии на 6,4 МВтч в год замены и на 8,2 МВтч в будущем году.

4.3. Выводы

1. По результатам теоретических и экспериментальных исследований установлено, что величину эквивалентного сопротивления цеховой сети, определенную с учетом основных параметров оборудования можно использовать для повышения достоверности определения и планирования электропотребления на промышленных предприятиях.

2. Разработан алгоритм, структурная схема и программа расчета эквивалентного сопротивления радиальных схем и электропотребления цеха ПАО «Казаньоргсинтез» в программной среде MATLAB.
3. Для повышения точности расчетов по регрессионным зависимостям эквивалентного сопротивления показан порядок группирования линий цеховой сети с учетом их длин, сечений и установленных на линиях автоматических выключателей.
4. Определена динамика изменения электропотребления и относительных потерь электроэнергии цеха ПАО «Казаньоргсинтез» с учетом времени эксплуатации оборудования.
5. Проведена технико-экономическая оценка замены НКА на их более энергоэффективные аналоги.
6. Показано, что разработанные специализированные модели определения беспотерного электропотребления (4.6) и расчетного отпуска электроэнергии в промышленную сеть (4.7) могут быть использованы для эффективного планирования мероприятий по энергосбережению. Предлагаемые математические модели позволяют также проводить достоверную технико-экономическую оценку проводимых мероприятий.

Заключение

Результаты теоретических и экспериментальных исследований, приведенные в диссертации, свидетельствуют о решении актуальной научно-технической задачи в области электроснабжения, заключающейся в совершенствовании методов планирования электропотребления промышленными предприятиями, что обеспечивает рациональное внедрение принципов энергосбережения.

Итоги выполненного исследования:

1. В результате аналитического обзора методов планирования электропотребления определены их особенности, основными из которых являются неучет режимов эксплуатации и модернизации оборудования производства. Большинство методов рассматривается колебание электропотребления, как непостоянный процесс, состоящий из двух составляющих: периодической и остаточной, описываемых регрессионными и стохастическими моделями соответственно.

2. Установлены основные виды, показатели и задачи формирования фактических и плановых балансов электроэнергии объектов электроэнергетики и промышленных предприятий, а также определены этапы реализации методики планирования электропотребления, включающие в себя способы обработки данных, методы расчетов, необходимые для осуществления всего цикла планирования расхода электроэнергии.

3. Выявлены особенности технических характеристик низковольтных коммутационных аппаратов отечественных фирм-производителей ИЕК, ЕКФ, КЭАЗ, «Контактор» и «Электроконтактор».

4. Экспериментально установлены соотношения сопротивлений контактов низковольтных коммутационных аппаратов отечественных фирм-производителей в зависимости от номинальных токов аппаратов и выявлены зависимости изменения сопротивления контактов автоматических выключателей от коэффициента загрузки подключенного оборудования.

5. Разработаны методика и математические модели зависимости эквивалентного сопротивления радиальных и магистральных схем сетей в зависимости от таких параметров, как сечение и длина линий сети, количество и тип коммутационных аппаратов, установленных на линии, температура окружающей среды, загрузка оборудования.

6. Разработан алгоритм использования среднего (за год) эквивалентного сопротивления сети как годового планового показателя для осуществления оперативного контроля за ходом выполнения плана электропотребления и потерь электроэнергии, а также показана возможность объективной сравнительной оценки уровня потерь (что невозможно сделать путем сравнения традиционных процентов потерь) и определять фактическое их снижение от совокупного действия мероприятий, внедренных как в текущем, так и в предыдущие годы.

7. Разработан алгоритм, структурная схема и программа расчета электропотребления цеха и сопротивления радиальных схем ПАО «Казаньоргсинтез» в программной среде MATLAB. Для повышения точности расчетов по регрессионной зависимости (4.4) определения эквивалентного сопротивления показан порядок группирования линий цеховой сети с учетом их длин, сечений и установленных на линиях низковольтных коммутационных аппаратов. Определена динамика изменения электропотребления и относительных потерь электроэнергии цеха ПАО «Казаньоргсинтез» с учетом времени эксплуатации оборудования. Проведена технико-экономическая оценка замены низковольтных коммутационных аппаратов на их более энергоэффективные аналоги для цеховой сети ПАО «Казаньоргсинтез».

Рекомендации:

8. Для снижения трудоемкости вычислений и сокращения расчетов эквивалентных сопротивлений цеховых сетей разработан алгоритм и определены зоны учета-неучета сопротивлений контактных соединений НКА, погрешность определения значений эквивалентных сопротивлений составила при этом менее 5%.

9. В качестве мероприятия по энергосбережению предложена замена низковольтных коммутационных аппаратов в зависимости от срока отработанного ресурса и проведена технико-экономическая оценка данного мероприятия.

10. Разработанные специализированные модели определения беспотерного электропотребления (4.6) и расчетного отпуска электроэнергии в промышленную сеть (4.7) могут быть использованы для эффективного планирования мероприятий по энергосбережению. Предлагаемые математические модели позволяют также проводить достоверную технико-экономическую оценку проводимых мероприятий.

Перспективы дальнейшей разработки темы исследования:

11. Проведение исследований, направленных на разработку методики планирования расхода электроэнергии, с учетом разработанных рекомендаций и выявления факторов, определяющих изменение технологических режимов производства, как в цеховых сетях 0,4 кВ, так и 6 (10) кВ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Адонц, Г.Т. Методы расчета узловых сопротивлений электрической системы без процедуры обращения матрицы проводимостей / Г.Т. Адонц // *Электричество*. – 1973. – №11. – С. 29-33.
2. Акимов, Е.Г. Силовые автоматические выключатели: обзор рынка и перспективы развития / Е.Г. Акимов // *Новое в российской электроэнергетике*. – 2013. – № 4. – С. 33-50.
3. Анисимов, Л.П. Методика расчёта нагрузочных потерь энергии в распределительных сетях / Л.П. Анисимов, В.Г. Пекелис // *Электричество*. – 1975. – №7. – С. 51-54.
4. Анчарова, Т.В. Развитие электропотребления на промышленных предприятиях в условиях неопределенности исходной информации / Анчарова Т.В., Бодрухина С.С., Матюнина Ю.В. // *Промышленная энергетика*. – 1995. – №9. – С. 21-22.
5. Арзамасцев, Д.А. Оценки потерь электроэнергии в сети энергосистемы / Д.А. Арзамасцев. – Свердловск.: Уральский политехнический институт им. С.М. Кирова, 1968. – 55 с.
6. Бажинов, А.Н. Адаптивные системы прогнозирования электропотребления в металлургическом производстве / А.Н. Бажинов, Е.В. Ершов // *Электromеталлургия*. – 2011. – № 12. – С. 29-33.
7. Белашов, В.Ю. Составление и анализ балансов потребления электрической энергии промышленными предприятиями: Учебное пособие / В.Ю. Белашов, В.Ю. Иванов, Е.И. Грачева. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2003. – 148 с.
8. Бляхер, Р.М. Прогнозирование суточных графиков потребления электроэнергии в крупных энергообъединениях / Р.М. Бляхер, Ю.А. Львов, В.С. Шаханов // *Применение вычислительной техники в электроэнергетике*. – 1972. – №1. – С. 33-39.

9. Богданов, В.А. Математическая модель оперативного прогнозирования активных нагрузок энергосистем / В.А. Богданов, В.И. Кочкарев // Электрические станции. – 1974, №4. – С.22-24.
10. Бэни, Д.В. Сравнительные модели прогнозирования электрической нагрузки / Д.В. Бэни, Е.Д. Фармер (пер. с англ.)– М.: Энергоатомиздат, 1987. – 200 с.
11. Воротницкий, В.Э. Потери электроэнергии в электрических сетях энергосистем / В.Э. Воротницкий, Ю.С. Железко, В.Н. Казанцев, В.Г. Пекелис, Д.Л. Файбисович; под ред. В.Н. Казанцева – М: Энергоатомиздат, 1983. – 368 с.
12. Воротницкий, В.Э. Опыт и направления совершенствования расчетов балансов и локализации коммерческих потерь электроэнергии в электрических сетях 0,38 кВ / В.Э. Воротницкий, С.В. Заслонов, С.С. Лысюк // Электрические станции. – 2006. – №9. – С.51-61.
13. Воротницкий, В.Э., Расчет, нормирование и снижение потерь электроэнергии в электрических сетях. Учебно-методическое пособие / В.Э. Воротницкий, М.А. Калинкина. – М.: ИПКГосслужбы, 2003. –64 с.
14. Герман, И.М. Методика прогнозирования суточного потребления электрической энергии в энергообъединениях и энергосистемах / И.М. Герман, В.С. Шаханов // Проблемы прогнозирования электропотребления по предприятиям и энергосистемам. – М.: МДНТП, 1970. – С. 18-23.
15. Головкин, П.И. Режимы электроснабжения потребителей / П.И. Головкин. – М.: Энергия, 1971.–112 с.
16. Грачева, Е.И. Потери электроэнергии в низковольтных сетях: монография / Е.И. Грачева. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2004. – 128 с.
17. Гусейнов, Ф.Г. Оценка параметров и характеристик энергосистем / Ф.Г. Гусейнов, Н.Р. Рахманов. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 224 с.
18. Егоров, Е.Г. Испытания и исследования низковольтных коммутационных электрических аппаратов / Е.Г. Егоров. — Чебоксары.: Чуваш. ун-т, 2000. – 448 с.

19. Ежилов, В.Х. Интервальный однофакторный метод заблаговременного расчета суточных реализаций режимов электропотребления энергосистем / В.Х. Ежилов // Труды ВНИИЭ. – 1979. – Вып.57. – С.111-122.
20. Жежеленко, И.В. Методы вероятностного моделирования в расчетах электрических нагрузок потребителей / И.В. Жежеленко, Ю.П. Саенко, В.П. Степанов. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 128 с.
21. Жежеленко, И.В. Показатели качества электроэнергии и их контроль на промышленных предприятиях / И.В. Жежеленко. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 168 с.
22. Железко, Ю.С. Выбор мероприятий по снижению потерь электроэнергии в электрических сетях: руководство для практических расчетов / Ю.С. Железко. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 172 с.
23. Железко, Ю.С. Погрешности определения потерь энергии в электрических сетях / Ю.С. Железко // Электричество. – 1975. – № 2. – С. 19–24.
24. Железко, Ю.С. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии: Руководство для практических расчетов / Ю.С. Железко. – М.: ЭНАС, 2009. – 456 с.
25. 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.
26. Железко, Ю.С. Систематические и случайные погрешности методов расчёта нагрузочных потерь электроэнергии / Ю.С. Железко // Электрические станции. – 2001. – № 12. – С. 19–27.
27. Зекцер, Д.М. Маркетинг низковольтных электрических аппаратов в промышленной энергетике / Д.М. Зекцер // Промышленная энергетика.-2008.- № 10. - С. 8-10.
28. Иванов, И.М. Электротехника / И.М. Иванов, Я.Д. Мац, М.М. Могилевский, Ю.Б. Россов. – М.: Воениздат, 1966. – 614 с.
29. Ивоботенко, Б.А. Планирование эксперимента в электромеханике / Б.А. Ивоботенко, Н. Ф. Ильинский, И. П. Копылов. – М: Энергия, 1975. – 184 с.

30. Идельчик, В.И. Расчеты и оптимизация режимов электрических сетей и систем / В.И. Идельчик. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 288 с.
31. Казанцев, В.Н. Расчет и анализ потерь энергии в электрических сетях / В.Н. Казанцев, А.С. Бердин, И.С. Щербаков, И.С. Юсина // Электрические станции. – 1981. – № 7. – С. 45–46.
32. Калинина, В.Н. Математическая статистика / В.Н. Калинина, В.Ф. Панкин. М.: Высш. школа, 1998.-336 с.
33. Кароль, Н.Б. Исследование точности прогноза графика суммарной нагрузки электропотребления в минутных интервалах / Н.Б. Кароль, А.Н. Ставровский // Труды ВНИИЭ. – 1978. -Вып.54. -С.141-146.
34. Карпюк, Б.В. Планирование и организация измерительного эксперимента. Учебное пособие / Б.В. Карпюк, А.Г. Козачок. - Новосибирск: НЭТИ,1980. – 116с.
35. Автоматические выключатели. OptiMat D: каталог: КЭАЗ Optima. – Курск, 2016. – Издание 1. – 46 с.
36. Автоматические выключатели. OptiMat E: каталог: КЭАЗ Optima. – Курск, 2016. – Издание 1. – 26 с.
37. Выключатели автоматические ВА88: каталог: ИЕК. – М., 2013. – 60 с.
38. Коммутационное оборудование: каталог: ИЕК. – М., 2013. – 72 с.
39. Модульное оборудование: каталог: ИЕК. – М., 2013. – 81 с.
40. Контактторы: каталог: ЧЭАЗ. – Чебоксары, 2011.- 60 с.
41. Каталог продукции. Завод Электроконтактор [Электронный ресурс] // Завод Электроконтактор: автоматические выключатели, трансформаторы, контроллеры, электрооборудование. – Режим доступа: http://www.elektrokontaktor.ru/catalog_produkcii/(дата обращения: 08.02.2016).
42. Кпро: каталог: Контакттор. – Ульяновск, 2015. – 144 с.
43. Устройства на DIN-рейку. OptiDin: каталог: КЭАЗ OptimaOptiDin. – Курск, 2016. – Издание 1. – 134 с.
44. Каталог электротехнической продукции: каталог: КЭАЗ. – Курск, 2015. – Издание 5. – 205 с.

45. Каялов, Г.М. О зависимостях показателей упорядоченных диаграмм нагрузки отдельных цехов и предприятий в целом / Г.М. Каялов, И.И. Надтока // Промышленная энергетика. – 1980. – № 4. – С. 39–40.
46. 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.
47. 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.
48. Клебанов, Л.Д. Вопросы методики определения и снижения потерь электроэнергии в сетях/ Л.Д. Клебанов. – Л.: ЛГУ, 1973. - 73 с.
49. Кобленц, М.Г. Исследование электрической износостойкости силовых контактов / М.Г. Кобленц // Электрические контакты. – М.: Наука, 1967. – С. 608-624.
50. Коновалов, Ю.С. Прогнозирование суточных графиков активной мощности нагрузок энергосистем с применением ЭВМ / Ю.С. Коновалов, И.Б. Кугелевичус //Электрические станции. – 1966. - № 5. -С.52-54.
51. Коновалова, Л.Л. Электроснабжение промышленных предприятий и установок / Л.Л. Коновалова, Л.Д. Рожкова. – М.: Высшая школа, 1980. – 540 с.
52. Копейкин, В.В. Эффективность энергоснабжения / В.В. Копейкин, Е.А. Смирнов, Г.Л. Багиев. – Л.: Энергоатомиздат, 1985. – 112 с.
53. Красновский, А.З. Нормативное планирование снижения расхода электроэнергии на ее передачу и распределение / А.З.Красновский // Электрические станции. –1991. -№8. - С. 13-19.
54. Крумм, Л.А. Применимость вероятностных методов в энергетических расчетах / Л.А. Крумм, Л.С. Беляев // Изв. АН СССР Энергетика и транспорт. – 1983. – №2. -С.3-11.
55. Кужеков, С.Л. Городские электрические сети. Учебное пособие / С.Л. Кужеков, С.В. Гончаров. -Ростов-на-Дону: Издательский центр Март, 2001.- 256 с.

56. Кузнецов, Г.Г. Определение информативности и краткосрочное прогнозирование периодически нестационарных случайных процессов в электроэнергетических системах / Г.Г. Кузнецов, П.А. Черненко.– К.: Ин-т электродинамики АН УССР, Препринт, 1977. - № 157. –38 с.

57. 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.

58. Куренный, Э.Г. Расчеты электрических нагрузок систем электроснабжения промышленных предприятий / Э.Г. Куренный, Г.Я. Вагин, А.К. Шидловский. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 224 с.

59. Левин, М.С. Определение потерь электроэнергии в сельских сетях 0,38 кВ / М.С. Левин, Т.Б. Лещинская, Е.В. Евстигнеев // Техника в сельском хозяйстве. – 1994. – № 3. – С. 17–18.

60. Лившиц, Н.А. Вероятностный анализ систем автоматического управления / Н.А. Лившиц, В.Н. Пугачев. – М.: Советское радио, 1963. – 359 с.

61. Макоклюев, Б.И. Анализ и планирование электропотребления / Б.И. Макоклюев. – М.: Энергоатомиздат, 2008. – 296с.

62. Макоклюев, Б.И. Методология и система моделей прогноза электропотребления / Б.И. Макоклюев // Электрические станции. – 2007. – № 3.– С. 10-15.

63. Макоклюев, Б.И. Информационные системы для решения технологических задач на энергообъектах / Б.И. Макоклюев, А.С. Полижаров // Энергетик. – 2007. - № 8. - С. 35-36.

64. Маледханов, В.А. Предсказание графиков нагрузки энергосистемы методом экспоненциального сглаживания / В.А. Маледханов, О.С. Мамедяров // Труды АзНИИЭнергетики, 1973. –120 с.

65. Мамедяров, О.С. Оптимизация выбора и места установки регулирующих и компенсирующих устройств в электрических сетях методом экспертных оценок и факторного планирования эксперимента / О.С. Мамедяров // Изв. вузов СССР. Энергетика. –1983. – № 3. – С. 3-7.

66. Манусов, В.З. Математическое моделирование режимов ЭЭС в условиях неопределенности / В.З. Манусов, Л.Л. Богатырев, Д. Содномдорж – Улан-Батор: Изд-во типографии МГТУ, 1999. – 348 с.
67. Мастер-каталог. Электротехническая продукция: каталог: ЕКФ. – М., 2015. – № 22. – 259 с.
68. Надтока, И.И. Системы контроля, распознавания и прогнозирования электропотребления / И.И. Надтока, А.В. Седов.- Ростов-на-Дону: Издательство Ростовского университета, 2002. – 318 с.
69. Омельченко, В.Т. Теория процессов на контактах / В.Т. Омельченко. – Харьков: Вища школа, 1979. – 128 с.
70. Орлов, В.С. Снижение потребления энергии при компенсации реактивной мощности в промышленных сетях / В.С. Орлов // Промышленная энергетика. – 1989. – № 4. – С. 49–50.
71. Орнов, В.Г. Оперативный прогноз мощности потребления энергообъединения / В.Г. Орнов, М.А. Рабинович. - Иркутск: СЭИ СО АН СССР, 1982.-С.112-119.
72. Папьян, С.К. Статистический метод прогнозирования суточных графиков нагрузки энергосистемы / С.К. Папьян // Применение математических методов и вычислительных машин в энергетике. - Кишинев, 1968. -Вып. 1. – С. 34-38.
73. Пospelов, Г.Е. Влияние температуры проводников на потери электроэнергии в активных сопротивлениях проводов воздушных линий электропередачи / Г.Е. Пospelов, В.В. Ершевич // Электричество. – 1973. – №10. – С. 81-83.
74. Пospelов, Г.Е. Потери мощности и энергии в электрических сетях/ Г.Е. Пospelов, Н.М. Сыч. Пор ред. Г.Е. Пospelова. -М.: Энергоиздат, 1981. -216 с.
75. Правила устройства электроустановок. – 7-е изд. – М.: НЦ ЭНАС, 2003. – 184 с.
76. Автоматические выключатели Дагэлектромат: прайс, продажа, купить по выгодным ценам в каталоге "Комплект Сервис" [Электронный ресурс]

//Магазин электротехники "Комплект Сервис". – Режим доступа: <http://www.complect-service.ru/74-va-dagelektroavtomat.php>(дата обращения: 08.02.2016).

77. Прайс лист производителя Контактор 2016 [Электронный ресурс] // Интернет-магазин "Электрик", ООО "СветЭлектро". – Режим доступа: <http://svetelektro.net/prajs-list/price/kontaktor/>(дата обращения: 08.02.2016).

78. Прайс-листы — О продукции — КЭАЗ [Электронный ресурс] //Курский электроаппаратный завод - официальный сайт. -Режим доступа: <https://keaz.ru/how-to-buy/pricelist/>(дата обращения: 08.02.2016).

79. Прайс лист производителя ЧЭАЗ 2016 [Электронный ресурс] // Интернет-магазин "Электрик", ООО "СветЭлектро". – Режим доступа:<http://svetelektro.net/prajs-list/price/cheaz/>(дата обращения: 08.02.2016).

80. Прайс-лист | Завод Электроконтактор [Электронный ресурс] // Завод Электроконтактор: автоматические выключатели, трансформаторы, контроллеры, электрооборудование. – Режим доступа: <http://www.elektrokontaktor.ru/page/prajs-list/>(дата обращения: 08.02.2016).

81. Прайс-лист ЕКФ максимально эффективный инструмент! [Электронный ресурс] // ЕКФ. – Режим доступа: <http://ekfgroup.com/produktsiya/price/>(дата обращения: 08.02.2016).

82. Прайс-лист Группа компаний ИЕК [Электронный ресурс]// Группа компаний ИЕК. – Режим доступа: <https://www.iek.ru/products/price/>(дата обращения: 08.02.2016).

83. 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

84. Резников, В.П. Детерминированно-вероятностная обучающаяся интегральная система (ДВОИС) / В.П. Резников // Известия АН СССР. «Энергетика и транспорт». – 1969. - №3. -С.20- 30.

85. Ристхейн, Э.М. Электроснабжение промышленных установок / Э.М. Ристхейн. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 424 с.

86. Румшинский, Л.З. Математическая обработка результатов эксперимента / Л.З. Румшинский. – М.: Наука, 1971. – 192 с.
87. Рыбалко, А.Ф. Теория вероятностей и математическая статистика: Конспект лекций / А.Ф. Рыбалко, А.Б. Соболев. - Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2005. – 183 с.
88. Сибикин, Ю.Д. Электроснабжение промышленных и гражданских зданий: учебник для студ. сред. проф. образования / Ю.Д. Сибикин. – М.: Издательский центр «Академия», 2006. – 368 с.
89. Смирнов, Н.В. Курс теории вероятности и математической статистики / Н.В. Смирнов. – М.: Наука, 1970. – 289 с.
90. Справочник по проектированию электрических сетей / Под ред. Д.Л. Файбисовича. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2005. – 320 с.
91. Справочник по электроснабжению и электрооборудованию. В 2 т. Т. 1. Электроснабжение / Под общ. ред. Ю.Г. Барыбина и др. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 464 с.
92. Ставровский, А.Н. Повышение точности оперативного прогноза графиков суммарной нагрузки электропотребления энергообъединений и энергосистем/ А.Н. Ставровский // Электричество. - 1975. -№11.- С.55- 57.
93. Сыч, Н.М. Снижение потерь мощности и энергии в электрических системах / Н.М. Сыч. – Минск: БПИ, 1977. – 76 с.
94. Таев, И.С. Электрические аппараты / И.С. Таев. – М.: Энергия, 1977. – 277 с.
95. Технический каталог. Низковольтные автоматические выключатели. Электроаппаратура специального назначения: каталог: Контакттор. – Ульяновск, 2014. – 348 с.
96. Об электроэнергетике №35-ФЗ (ред. от 30.03.2016): федеральный закон: принят Гос. Думой 21 февраля 2003 г.: одобр. Советом Федерации 12 марта 2003 г.
97. Федоров, А.А. Основы электроснабжения промышленных предприятий / А.А. Федоров, В.В. Каменева. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 472 с.

98. Федоров, О.В. Некоторые особенности структуры систем внутрицехового электроснабжения / О.В. Федоров // Надежность и безопасность энергетики. - 2015. - № 3 (30). - С. 30-33.

99. Федоров, О.В. Оценка ресурсосбережения электрооборудования / М.Ю. Петушков, А.С. Сарваров, О.В. Федоров // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. -2015. -№ 3. -С. 24-28.

100. Федоров, О.В. Проблема эффективности использования энергоресурсов / Н.В. Голубцов, Л.Г. Ефремов, О.В. Федоров // Вестник Чувашского университета. -2014. -№ 2. -С. 18-22.

101. Федоров, О.В. Совершенствование методов определения экономической эффективности электрооборудования / О.В. Федоров // Проблемы совершенствования планирования машиностроительным производством. Республиканская научно-техническая конференция. -Ворошиловград: ВМИ, 1983. – С. 50-53.

102. 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.

103. Хольм, Р. Электрические контакты: пер. с англ. / Р. Хольм. Под ред. Д.Э. Брускина. – М.: Энергия, 1978. – 456 с.

104. Шагидуллин, А.В. Моделирование законов изменения потерь мощности в автоматических выключателях / А.В. Шагидуллин, Е.И. Грачева; И.В. Ившин; Ю.И. Солуянов; А.В. Рыбакова // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2012. - №3-4. - С. 66-74.

105. Шагидуллин, А.В. Расчетно-экспериментальное исследование сопротивлений контактных систем автоматических выключателей / А.В. Шагидуллин, Е.И. Грачева; А.В. Рыбакова // Электрика. – 2013. - №3. – С. 20-25.

106. Шагидуллин, А.В. Определение сопротивления контактных соединений и температуры контактных площадок низковольтных аппаратов различными методами / А.В. Шагидуллин, Е.И. Грачева; А.Н. Хаерова //

Оперативное управление в электроэнергетике: подготовка персонала и поддержание его квалификации. – 2014. - №3. – С. 46-51.

107. Шагидуллин, А.В. Применение методики оценки эффективности функционирования низковольтных аппаратов и цеховых сетей / А.В. Шагидуллин, Е.И. Грачева; А.В. Рыбакова; А.Н. Хаерова // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2013. - №11. – С. 23-28.

108. Шагидуллин, А.В. Расчет эквивалентного сопротивления радиальных схем при вычислении потерь электроэнергии / А.В. Шагидуллин, Е.И. Грачева; А.Н. Хаерова // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2014. - №9. – С. 10-16.

109. Шагидуллин, А.В. Энергоэффективность мероприятий по экономии электроэнергии в низковольтных цеховых сетях/ А.В. Шагидуллин, Е.И. Грачева // Надежность и безопасность энергетики. – 2016. - №1(32). – С. 64-67.

110. Шевченко, В.В. Определение сопротивления контактных соединений низковольтных коммутационных аппаратов / В.В. Шевченко, Е.И. Грачева // Промышленная энергетика. – 2002. - №1. - С. 42-43.

111. 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.

112. Щербина, Ю.В. Снижение технологического расхода энергии в электрических сетях./ Ю.В. Щербина, Н.Д. Бойко, А.Н. Бутенко — К.: Техшка, 1981.-103 с.

113. Aggoune, M. Preliminary Results on Using Artificial Neural Networks for Security Assessment / M. Aggoune, M.A. Sharkawi, D.C. Park, M.J. Damborg, I.I. Marks // IEE Transactions on Power Systems. - 1991. - Vol.6, No.2. -P.890-896.

114. Akbar, E. Holidays short-term load forecasting using fuzzy improved similar day method / E. Akbar, M. Amir // International Transactions on Electrical Energy Systems. - 2013. -Vol. 23, Issue 8. -P. 1254–1271.

115. Amjady, N. Short-term hourly load forecasting using time-series modeling with peak load estimation capability / N. Amjady// IEEE Transactions on Power Systems. - 2001. -№ 16(3). -P. 498–505.

116. Hyde, O. An adaptable automated procedure for short-term electricity load forecasting / O. Hyde, P.F. Hodnett // IEEE Transactions on Power Systems. - 1997. -№ 12. -P. 84–93.

117. Irisarri, G.B. Online load forecasting for energy control center application / G.B. Irisarri, S.T. Widergren, P.D. Yehsakul // IEEE Transactions of PAS. - 1982. -Vol. 101, № 1.-P. 71-78.

Приложение А

Учет сопротивления коммутационных аппаратов

В эквивалентном сопротивлении (4 радиальные линии)

Таблица П.А.1 – 1 автоматический выключатель

Сечение	Длина				
	0-50 м	51-100 м	101-150 м	151-200 м	> 200 м
2,5 – 95 мм ²	+	+	+	+	+
120 мм ²	+	+	+	+	-
150 мм ²	+	+	+	-	-
185 мм ²	+	+	-	-	-
240 мм ²	+	-	-	-	-

Таблица П.А.2 – 1 автоматический выключатель, 1 магнитный пускатель

Сечение	Длина			
	0-100 м	101-150 м	151-200 м	> 200 м
2,5 – 120 мм ²	+	+	+	+
150 мм ²	+	+	+	-
185 мм ²	+	+	-	-
240 мм ²	+	-	-	-

Таблица П.А.3 – 2 автоматических выключателя, 1 магнитный пускатель

Сечение	Длина		
	0-150 м	151-200 м	> 200 м
2,5 - 150 мм ²	+	+	+
185 мм ²	+	+	-
240 мм ²	+	-	-

В эквивалентном сопротивлении (6 радиальных линий)

Таблица П.А.4 – 1 автоматический выключатель

Сечение	Длина			
	0-100 м	101-150 м	151-200 м	> 200 м
2,5 - 120 мм ²	+	+	+	+
150 мм ²	+	+	-	-
185 мм ²	+	-	-	-
240 мм ²	+	-	-	-

Таблица П.А.5 – 1 автоматический выключатель, 1 магнитный пускатель

Сечение	Длина		
	0-150 м	151-200 м	> 200 м
2,5-150 мм ²	+	+	+
185 мм ²	+	-	-
240 мм ²	+	-	-

Таблица П.А.6 – 2 автоматических выключателя, 1 магнитный пускатель

Сечение	Длина		
	0-150 м	151-200 м	> 200 м
2,5-185 мм ²	+	+	+
240 мм ²	+	-	-

В эквивалентном сопротивлении (8 радиальных линий)

Таблица П.А.7 – 1 автоматический выключатель

Сечение	Длина				
	0-50 м	51-100 м	101-150 м	151-200 м	> 200 м
2,5-120 мм ²	+	+	+	+	+
150 мм ²	+	+	+	+	-
185 мм ²	+	+	-	-	-
240 мм ²	+	-	-	-	-

Таблица П.А.8 – 1 автоматический выключатель, 1 магнитный пускатель

Сечение	Длина			
	0-100 м	101-150 м	151-200 м	> 200 м
2,5-150 мм ²	+	+	+	+
185 мм ²	+	+	-	-
240 мм ²	+	-	-	-

Таблица П.А.9 – 2 автоматических выключателя, 1 магнитный пускатель

Сечение	Длина		
	0-150 м	151-200 м	> 200 м
2,5-185 мм ²	+	+	+
240 мм ²	+	-	-

В эквивалентном сопротивлении (10 радиальных линий)

Таблица П.А.10 – 1 автоматический выключатель

Сечение	Длина			
	0-100 м	101-150 м	151-200 м	> 200 м
2,5-150 мм ²	+	+	+	+
185 мм ²	+	+	-	-
240 мм ²	+	-	-	-

Таблица П.А.11 – 1 автоматический выключатель, 1 магнитный пускатель

Сечение	Длина		
	0-150 м	151-200 м	> 200 м
2,5-150 мм ²	+	+	+
185 мм ²	+	+	-
240 мм ²	+	-	-

Таблица П.А.12 – 2 автоматических выключателя, 1 магнитный пускатель

Сечение	Длина		
	0-150 м	151-200 м	> 200 м
2,5-185 мм ²	+	+	+
240 мм ²	+	-	-

В эквивалентном сопротивлении (12 радиальных линий)

Таблица П.А.13 – 1 автоматический выключатель

Сечение	Длина	
	0-200 м	> 200 м
2,5-240 мм ²	+	+

Таблица П.А.14 – 1 автоматический выключатель, 1 магнитный пускатель

Сечение	Длина	
	0-200 м	> 200 м
2,5-240 мм ²	+	+

Таблица П.А.15 – 2 автоматических выключателя, 1 магнитный пускатель

Сечение	Длина	
	0-200 м	> 200 м
2,5-240 мм ²	+	+

Приложение Б

Текст программы прогнозирования расхода электроэнергии

```

%исходные границы влияющих факторов
lsrmin=10; lsrmax=100; nmin=10; nmax=20; Smin=16; Smax=120; kzagrmin=0.3; kzagrmax=1;
tempermin=5; tempermax=35;
rmax=31.3/Smax; rmin=31.3/Smin; N=16; Ndop=10;
%приращение факторов
deltalsr=(lsrmax-lsrmin)/2; deltan=(nmax-nmin)/2; deltar=(rmax-rmin)/2; deltakzagr=(kzagrmax-
kzagrmin)/2; deltatemper=(tempermax-tempermin)/2;
%среднее значение факторов
lsr=lsrmin+deltalsr; nsr=nmin+deltan; rsr=rmin+deltar;
kzagrsrc=kzagrmin+deltakzagr; tempersr=tempermin+deltatemper;
for i=1:N
    p(i)=1;
end
% x0
X0=p';
r=[ -1 1 1 -1 1 -1 1 -1 1 -1 1 -1 1 -1 1];
% x1
X1=r';
t=[ -1 -1 1 1 -1 -1 1 1 -1 -1 1 1 -1 -1 1 1];
% x2
X2=t';
y=[ -1 -1 -1 -1 1 1 1 1 -1 -1 -1 -1 1 1 1 1];
% x3
X3=y';
u=[ -1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 1 1 1 1 1 1 1 1];
% x4
X4=u';
o=[ 1 -1 -1 1 -1 1 1 -1 -1 1 1 -1 1 -1 -1 1];
% x5
X5=o';
%матрица планирования эксперимента (ДФЭ 2^(5-1))
matricaDFE=[ 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];
for i=1:N
    l(i)=X1(i).*deltalsr+lsr;
    n(i)=X2(i).*deltan+nsr;
    r(i)=X3(i).*deltar+rsr;
    S(i)=31.3/r(i);
    kzagr(i)=X4(i).*deltakzagr+kzagrsrc;
    temper(i)=X5(i).*deltatemper+tempersr;
end
%матрица средней длины линий
l;
%матрица количества линий
n;
%матрица сопротивлений линий
r;

```

```

%матрица квадрата коэффициента загрузки
kzagr;
%матрица температуры
temper;
S04=[S<3];
for i=1:N
if S04(i)==1
    S040(i)=2.5;
elseif S04(i)==0
    S040(i)=0;
end
end
S040;
S03=[3<S S<5];
for i=1:N
if S03(i)==S03(i+N)
    S030(i)=4;
elseif S03(i)~=S03(i+N)
    S030(i)=0;
end
end
S030;
S02=[5<S S<8];
for i=1:N
if S02(i)==S02(i+N)
    S020(i)=6;
elseif S02(i)~=S02(i+N)
    S020(i)=0;
end
end
S020;
S01=[8<S S<12];
for i=1:N
if S01(i)==S01(i+N)
    S010(i)=10;
elseif S01(i)~=S01(i+N)
    S010(i)=0;
end
end
S010;
S1=[12<S S<20];
for i=1:N
if S1(i)==S1(i+N)
    S10(i)=16;
elseif S1(i)~=S1(i+N)
    S10(i)=0;
end
end
S10;
S2=[20<S S<30];
for i=1:N
if S2(i)==S2(i+N)

```

```

    S20(i)=25;
elseif S2(i)~=S2(i+N)
    S20(i)=0;
end
end
S20;
S3=[30<S S<40];
for i=1:N
if S3(i)==S3(i+N)
    S30(i)=35;
elseif S3(i)~=S3(i+N)
    S30(i)=0;
end
end
S30;
S4=[40<S S<55];
for i=1:N
if S4(i)==S4(i+N)
    S40(i)=50;
elseif S4(i)~=S4(i+N)
    S40(i)=0;
end
end
S40;
S5=[55<S S<85];
for i=1:N
if S5(i)==S5(i+N)
    S50(i)=70;
elseif S5(i)~=S5(i+N)
    S50(i)=0;
end
end
S50;
S6=[85<S S<100];
for i=1:N
if S6(i)==S6(i+N)
    S60(i)=95;
elseif S6(i)~=S6(i+N)
    S60(i)=0;
end
end
S60;
S7=[100<S S<135];
for i=1:N
if S7(i)==S7(i+N)
    S70(i)=120;
elseif S7(i)~=S7(i+N)
    S70(i)=0;
end
end
S70;
S8=[135<S S<175];

```



```

for i=1:N
if S8(i)==S8(i+N)
    S80(i)=150;
elseif S8(i)~=S8(i+N)
    S80(i)=0;
end
end
S80;
S9=[175<S S<220];
for i=1:N
if S9(i)==S9(i+N)
    S90(i)=185;
elseif S9(i)~=S9(i+N)
    S90(i)=0;
end
end
S90;
S11=[S>220];
for i=1:N
if S11(i)==1
    S110(i)=240;
elseif S11(i)==0
    S110(i)=0;
end
end
S110;
%матрица средних сечений
Ssr=S040+S030+S020+S010+S10+S20+S30+S40+S50+S60+S70+S80+S90+S110;
for i=1:N
if Ssr(i)==2.5
    I(i)=31;
elseif Ssr(i)==4
    I(i)=38;
elseif Ssr(i)==6
    I(i)=46;
elseif Ssr(i)==10
    I(i)=65;
elseif Ssr(i)==16
    I(i)=90;
elseif Ssr(i)==25
    I(i)=115;
elseif Ssr(i)==35
    I(i)=135;
elseif Ssr(i)==50
    I(i)=165;
elseif Ssr(i)==70
    I(i)=200;
elseif Ssr(i)==95
    I(i)=240;
elseif Ssr(i)==120
    I(i)=270;
elseif Ssr(i)==150

```

```

    I(i)=305;
elseif Ssr(i)==185
    I(i)=345;
elseif Ssr(i)==240
    I(i)=355;
end
end
%матрица номинальных токов линий
I;
for i=1:N
    rk(i)=307/I(i);
end
%матрица сопротивлений коммутационного аппарата на линии
rk;
%матрицы значений эквивалентного сопротивления и потерь мощности
%количество коммутационных аппаратов на линии - 2
%мощность измеряется в кВт
for i=1:N
    Iekv(i)=kzagr(i)^(1/2)*I(i);
    temperjily(i)=kzagr(i)*(80-temper(i))+temper(i);
    Rekv(i)=(r(i)*I(i)*(1+0.004*(temperjily(i)-20))+2*rk(i))/n(i);
    deltaP(i)=3*Rekv(i)*Iekv(i)^2/1000;
end
Re=Rekv';
dP=deltaP';
matricavyvoda=[ matricaDFE Re dP]
%расчет коэффициентов полинома
for i=1:N
for j=1:N
    B(j,i)=matricaDFE(j,i)*Re(j);
    D(j,i)=matricaDFE(j,i)*dP(j);
end
end
SummaRe=sum(B);SummadP=sum(D);
for i=1:N
    bRe(i)=SummaRe(i)/N;
    bdP(i)=SummadP(i)/N;
end
%матрица коэффициентов полинома эквивалентного сопротивления
bRe
%матрица коэффициентов полинома потерь мощности
bdP

%расчет для отбрасывания незначимых членов полинома
%матрица дополнительных точек
fori=1:Ndop
pdop(i)=1;
end
%матрица фактора x0
X0dop=pdop';

```

```

rdop=[ 0 0 1 -1 1 -1 0 1 0 0];
%матрица фактора x1
X1dop=rdop';
tdop=[ 0 -1 0 -1 1 -1 0 0 0 1];
%матрица фактора x2
X2dop=tdop';
ydop=[ 0 -1 1 0 1 -1 1 0 0 -1];
%матрица фактора x3
X3dop=ydop';
udop=[ 0 -1 1 -1 0 -1 1 1 1 1];
%матрица фактора x4
X4dop=udop';
odop=[ 0 -1 1 -1 1 0 1 1 1 0];
%матрица фактора x5
X5dop=odop';
%матрица планирования эксперимента (ДФЭ 2^(5-1))
matricaDFEdop=[
X0dopX1dopX2dopX3dopX4dopX5dopX1dop.*X2dopX1dop.*X3dopX1dop.*X4dopX1dop.*X5dop
X2dop.*X3dopX2dop.*X4dopX2dop.*X5dop...
X3dop.*X4dop X3dop.*X5dop X4dop.*X5dop];
for i=1:Ndop
    ldop(i)=X1dop(i).*deltalsr+lrs;
    ndop(i)=X2dop(i).*deltan+nsr;
    rdop(i)=X3dop(i).*deltar+rsr;
    Sdop(i)=31.3/rdop(i);
    kzagrdop(i)=X4dop(i).*deltakzagr+kzagr;
    temperdop(i)=X5dop(i).*deltatemper+tempers;
end
%матрица средней длины линий
ldop;
%матрица количества линий
ndop;
%матрица сопротивлений линий
rdop;
%матрица квадрата коэффициента загрузки
kzagrdop;
%матрица температуры
temperdop;
S04dop=[Sdop<3];
for i=1:Ndop
    if S04dop(i)==1
        S040dop(i)=2.5;
    elseif S04dop(i)==0
        S040dop(i)=0;
    end
end
S040dop;
S03dop=[3<Sdop Sdop<5];
for i=1:Ndop
    if S03dop(i)==S03dop(i+Ndop)
        S030dop(i)=4;
    elseif S03dop(i)~=S03dop(i+Ndop)

```

```

    S030dop(i)=0;
end
end
S030dop;
S02dop=[5<Sdop Sdop<8];
for i=1:Ndop
if S02dop(i)==S02dop(i+Ndop)
    S020dop(i)=6;
elseif S02dop(i)~=S02dop(i+Ndop)
    S020dop(i)=0;
end
end
S020dop;
S01dop=[8<Sdop Sdop<12];
for i=1:Ndop
if S01dop(i)==S01dop(i+Ndop)
    S010dop(i)=10;
elseif S01dop(i)~=S01dop(i+Ndop)
    S010dop(i)=0;
end
end
S010dop;
S1dop=[12<Sdop Sdop<20];
for i=1:Ndop
if S1dop(i)==S1dop(i+Ndop)
    S10dop(i)=16;
elseif S1dop(i)~=S1dop(i+Ndop)
    S10dop(i)=0;
end
end
S10dop;
S2dop=[20<Sdop Sdop<30];
for i=1:Ndop
if S2dop(i)==S2dop(i+Ndop)
    S20dop(i)=25;
elseif S2dop(i)~=S2dop(i+Ndop)
    S20dop(i)=0;
end
end
S20dop;
S3dop=[30<Sdop Sdop<40];
for i=1:Ndop
if S3dop(i)==S3dop(i+Ndop)
    S30dop(i)=35;
elseif S3dop(i)~=S3dop(i+Ndop)
    S30dop(i)=0;
end
end
S30dop;
S4dop=[40<Sdop Sdop<55];
for i=1:Ndop
if S4dop(i)==S4dop(i+Ndop)

```

```

    S40dop(i)=50;
elseif S4dop(i)~=S4dop(i+Ndop)
    S40dop(i)=0;
end
end
S40dop;
S5dop=[55<Sdop Sdop<85];
for i=1:Ndop
if S5dop(i)==S5dop(i+Ndop)
    S50dop(i)=70;
elseif S5dop(i)~=S5dop(i+Ndop)
    S50dop(i)=0;
end
end
S50dop;
S6dop=[85<Sdop Sdop<100];
for i=1:Ndop
if S6dop(i)==S6dop(i+Ndop)
    S60dop(i)=95;
elseif S6dop(i)~=S6dop(i+Ndop)
    S60dop(i)=0;
end
end
S60dop;
S7dop=[100<Sdop Sdop<135];
for i=1:Ndop
if S7dop(i)==S7dop(i+Ndop)
    S70dop(i)=120;
elseif S7dop(i)~=S7dop(i+Ndop)
    S70dop(i)=0;
end
end
S70dop;
S8dop=[135<Sdop Sdop<175];
for i=1:Ndop
if S8dop(i)==S8dop(i+Ndop)
    S80dop(i)=150;
elseif S8dop(i)~=S8dop(i+Ndop)
    S80dop(i)=0;
end
end
S80dop;
S9dop=[175<Sdop Sdop<220];
for i=1:Ndop
if S9dop(i)==S9dop(i+Ndop)
    S90dop(i)=185;
elseif S9dop(i)~=S9dop(i+Ndop)
    S90dop(i)=0;
end
end
S90dop;
S11dop=[Sdop>220];

```

```

for i=1:Ndop
if S11dop(i)==1
    S110dop(i)=240;
elseif S11dop(i)==0
    S110dop(i)=0;
end
end
S110dop;
%матрица средних сечений
Ssrdop=S040dop+S030dop+S020dop+S010dop+S10dop+S20dop+S30dop+S40dop+S50dop+S60dop
+S70dop+S80dop+S90dop+S110dop;
for i=1:Ndop
if Ssrdop(i)==2.5
    Idop(i)=31;
elseif Ssrdop(i)==4
    Idop(i)=38;
elseif Ssrdop(i)==6
    Idop(i)=46;
elseif Ssrdop(i)==10
    Idop(i)=65;
elseif Ssrdop(i)==16
    Idop(i)=90;
elseif Ssrdop(i)==25
    Idop(i)=115;
elseif Ssrdop(i)==35
    Idop(i)=135;
elseif Ssrdop(i)==50
    Idop(i)=165;
elseif Ssrdop(i)==70
    Idop(i)=200;
elseif Ssrdop(i)==95
    Idop(i)=240;
elseif Ssrdop(i)==120
    Idop(i)=270;
elseif Ssrdop(i)==150
    Idop(i)=305;
elseif Ssrdop(i)==185
    Idop(i)=345;
elseif Ssrdop(i)==240
    Idop(i)=355;
end
end
%матрица номинальных токов линий
Idop;
for i=1:Ndop
    rkdop(i)=307/Idop(i);
end
%матрица сопротивлений коммутационного аппарата на линии
rkdop;
%матрицы значений эквивалентного сопротивления и потерь мощности
%количество коммутационных аппаратов на линии - 2
%мощность измеряется в кВт

```

```

for i=1:Ndop
Iekvdop(i)=kzagrdop(i)^(1/2)*Idop(i);
    temperjilydop(i)=kzagrdop(i)*(80-temperdop(i))+temperdop(i);
    Rekvdop(i)=(rdop(i)*Idop(i)*(1+0.004*(temperjilydop(i)-20))+2*rkdop(i))/ndop(i);
    deltaPdop(i)=3*Rekvdop(i)*Iekvdop(i)^2/1000;
end
Redop=Rekvdop';
dPdop=deltaPdop';
F3=[bRe; bRe; bRe; bRe; bRe; bRe; bRe; bRe; bRe];
F4=[bdP; bdP; bdP; bdP; bdP; bdP; bdP; bdP; bdP];
Bdop=matricaDFEdop.*F3;
Ddop=matricaDFEdop.*F4;
F5=Bdop';
F6=Ddop';
SummaRedop=sum(F5);
SummadPdop=sum(F6);
F1=SummaRedop';
F2=SummadPdop';
matricavyvoda1dop=[ X0dop X1dop X2dop X3dop X4dop X5dop Redop F1 dPdop F2];
deltaRe1=Redop-F1;
deltadP1=dPdop-F2;
deltaRe2=deltaRe1./Redop;
deltadP2=deltadP1./dPdop;
deltaRe3=deltaRe2*100;
deltadP3=deltadP2*100;
matricavyvoda2dop=[ X0dop X1dop X2dop X3dop X4dop X5dop Redop F1 dPdop F2 deltaRe3
deltadP3 deltaRe1 deltadP1]

```