

Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования  
«Гомельский государственный технический университет  
имени П.О. Сухого»

Кафедра «Электроснабжение»

Зализный Д. И.

**ОСНОВЫ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И  
ИННОВАЦИОННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ**

Курс лекций  
для студентов специальностей  
1-43 01 02 «Электроэнергетические системы и сети» и  
1-43 01 03 «Электроснабжение (по отраслям)»

Гомель 2018

## Содержание

Введение.....	3
Модуль 1 Основы теории моделирования и эксперименталь- ных исследований для задач энергетики.....	4
1 Термины и определения в сфере научных исследований.....	5
2 Методы научного моделирования в энергетике.....	9
3 Идентификация характеристик объектов энергетики в стати- ке.....	16
3.1 Метод наименьших квадратов.....	16
3.2 Полный факторный эксперимент.....	19
3.3 Дисперсионный анализ.....	23
3.4 Определение частотных характеристик объектов энергетиче- ски.....	25
3.5 Регрессионный анализ.....	29
4 Идентификация характеристик объектов энергетики в дина- мике.....	31
4.1 Переходные функции объектов энергетики.....	31
4.2 Идентификация параметров объекта, имеющего апериоди- ческую переходную функцию.....	34
4.3 Идентификация параметров объекта, имеющего периоди- ческую переходную функцию.....	37
5 Математическое моделирование тепловых процессов в объ- ектах энергетики.....	40
5.1 Метод термоэлектрических аналогий.....	40
5.2 Математическое моделирование тепловых процессов в си- ловых кабелях.....	42
5.3 Математическое моделирование тепловых процессов в си- ловых трансформаторах.....	50
Модуль 2 Инновационная деятельность в Республике Беларусь по вопросам энергетики.....	55
6 Инновационные процессы.....	56
7 Инновационная деятельность.....	59
Список литературы.....	62

## Введение

Для совершенствования систем электроснабжения необходимо внедрять новое оборудование и новые методики эксплуатации. Этого невозможно достичь без проведения научных исследований и осуществления инновационного процесса.

Цель изучения дисциплины – в процессе проектирования и эксплуатации систем электроснабжения выполнять научные исследования и осуществлять инновационную деятельность.

Задачами дисциплины являются:

- изучение принципов и видов научных исследований в энергетике;
- изучение основных научных методов, применяющихся в энергетике;
- изучение методов и техники научного эксперимента для задач энергетики;
- изучение принципов инновационного процесса и инновационной деятельности в области энергетики.

Учебная дисциплина «Основы научных исследований и инновационной деятельности» взаимосвязана с такими учебными дисциплинами как «Высшая математика», «Физика», «Теоретические основы электротехники», «Метрология и стандартизация», «Электроснабжение промышленных предприятий».

В результате изучения дисциплины студент будет знать:

- цели и задачи фундаментальных и прикладных научных исследований;
- методологические основы экспериментальной работы;
- основные этапы и методы обработки результатов исследований;
- инновационные законы и цели инновационной деятельности;
- содержание, методы инновационной деятельности и основы её организации;

Студент будет уметь:

- проводить исследования новых технологий, оборудования, проектов и решений с целью оценки их инновационного потенциала;
- применять методы анализа и организации внедрения инноваций.

**МОДУЛЬ 1**  
**ОСНОВЫ ТЕОРИИ МОДЕЛИРОВАНИЯ И**  
**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ДЛЯ ЗАДАЧ**  
**ЭНЕРГЕТИКИ**

## 1 ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ В СФЕРЕ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

**Наука** – это сфера исследовательской деятельности, направленная на получение новых знаний.

Главная цель научных исследований в области энергетики – символическое описание явлений, обуславливающих производство, передачу и распределение электрической и тепловой энергии, а также применение этого описания для создания новых методов и средств, позволяющих повысить общую эффективность систем энергоснабжения.

Все науки можно разбить на три основные категории: естественные, технические и гуманитарные. Энергетика относится к сфере технических наук.

В Республике Беларусь научная деятельность включает три основных направления:

- научные исследования;
- научные разработки;
- научное обслуживание.

**Научные исследования** проводятся, как правило, в рамках НИР – научно-исследовательских работ, результатами которых являются научные публикации, диссертации, научные отчёты, отраслевые и лабораторные методики, проекты и другие виды документации.

**Научные разработки** выполняют в рамках НИОКР – научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ. В результате проведения НИОКР получают опытные образцы или макеты требуемых составляющих нового оборудования.

**Научное обслуживание** – это предоставление услуг как информационного, так и материального характера организациями, уполномоченными на проведение соответствующих научных исследований.

Научные исследования бывают фундаментальные и прикладные.

**Фундаментальные научные исследования** в области энергетики направлены на получение новых знаний об перспективных направлениях, которые в ближайшие десятилетия позволят повысить общую эффективность энергоснабжения потребителей.

**Прикладные научные исследования** – исследования, направленные на применение результатов фундаментальных научных исследований для достижения конкретных практических целей.

Фундаментальные и прикладные исследования делят, в свою очередь, на теоретические и экспериментальные.

**Теоретические исследования** проводят с использованием символического аппарата математических формул, условных графических обозначений, структурно-лингвистических элементов, и других.

**Экспериментальные исследования** осуществляют с использованием конкретных значений параметров исследуемых объектов или непосредственно на этих объектах. Экспериментальные исследования бывают вычислительными и натурными.

**Вычислительный эксперимент** проводят, как правило, с помощью специализированных компьютерных программ, позволяющих реализовывать требуемые алгоритмы. В энергетике наибольшее распространение получили научные математические пакеты MathCAD, MatLAB и ANSYS.

**Натурный эксперимент** выполняют непосредственно на исследуемых объектах (трансформаторах, электродвигателях, кабелях и др.) или их физических моделях с измерением необходимых физических величин и их последующей обработкой.

Если в научных исследованиях вначале ведут теоретические разработки, а затем проверяют полученные результаты экспериментальным путём, то такой вид исследований называют теоретическим. Если же вначале результаты получают экспериментальным путём, а затем разрабатывают соответствующую научную теорию, то такой путь называют эмпирическим.

В Республике Беларусь высшей государственной научной организацией является Национальная Академия Наук (НАНБ). Главные задачи НАНБ – координация и управление научной деятельностью в стране. Главные руководящие работники в сфере научных исследований – академики НАНБ.

Научные исследования проводят в подразделениях НАНБ, университетах и промышленных предприятиях.

К подразделениям НАНБ относят:

- научные институты и центры;
- конструкторские организации;
- производственные организации;
- опытные станции и базы.

В университетах научными исследованиями обязаны заниматься все преподаватели, аспиранты и магистранты, а также студенты-отличники. В университетах всегда имеются научные лаборатории по

специализированным тематикам, а также студенческие научно-исследовательские лаборатории. Так в ГГТУ им. П.О. Сухого есть следующие научные лаборатории:

- «Техническая керамика и наноматериалы»;
- «Лаборатория физических исследований»;
- «Энергоаудит»;
- «Экология»;
- «Международный центр перспективных исследований».

В лаборатории «Энергоаудит» проводят энергетическое обследование предприятий, заключающееся в анализе потребления электрической и тепловой энергии и выдаче рекомендаций по энергосберегающим мероприятиям.

Крупные промышленные предприятия всегда имеют в своём составе конструкторские бюро и иногда специализированные научно-исследовательские институты. В предприятиях электрических сетей также есть различные лаборатории, где проводятся испытания оборудования.

К категории **научных работников** относят всех специалистов, занимающихся научной деятельностью.

**Работниками высшей научной квалификации** называют специалистов, имеющих учёные степени кандидата наук или доктора наук.

**Кандидат наук** – это дипломированный специалист, подтвердивший научную квалификацию успешной защитой кандидатской диссертации.

Для получения возможности защиты **кандидатской диссертации** необходимо окончить **магистратуру**, где сдают экзамены так называемого «кандидатского минимума», а затем **аспирантуру**, срок обучения в которой составляет 3 года. Перед подачей диссертации в специализированный диссертационный совет необходимо иметь минимум 3 публикации в научных журналах, где статьи проходят рецензирование, а также пройти несколько предзащит. Перед защитой публикуют **автореферат** – небольшую брошюру, содержащую краткое описание результатов исследований и рассылают его по почте специалистам, от которых необходимо получить 3 и более положительных отзывов. После успешной защиты диссертацию отправляют в НАНБ, где имеется Высшая аттестационная комиссия (ВАК). На заседаниях ВАК принимается окончательное решение о присуждении учёной степени.

Учёная степень кандидата наук расшифровывается более подробно с учётом отрасли, к которой относится защищённая диссертация. Например: кандидат технических наук, кандидат физико-математических наук, кандидат лингвистических наук и так далее.

**Доктор наук** – это дипломированный специалист, подтвердивший научную квалификацию успешной защитой докторской диссертации.

Учёную степень доктора наук, как правило, получают специалисты, имеющие учёную степень кандидата наук, чьи научные результаты оказали значительное влияние на научный уровень знаний в конкретной области исследований, как в Республике Беларусь, так и за рубежом. Однако за особые достижения учёная степень доктора наук может быть присвоена сразу, минуя присвоение степени кандидата наук.

Процедура защиты докторской диссертации аналогична процедуре для кандидатской диссертации, но требования при этом выше. Так требуется опубликовать не менее 18 статей в научных журналах и **научную монографию** – книгу, содержащую основные материалы исследований.

Учёная степень доктора наук также расшифровывается более подробно с учётом отрасли. Например: доктор технических наук, доктор физико-математических наук, доктор лингвистических наук и так далее.

Главная цель научных исследований – достижение результатов для последующей инновационной деятельности.

**Инновационная деятельность** – освоение результатов научных исследований и разработок, повышающих эффективность способов и средств осуществления конкретных процессов, в том числе освоение в производстве новой продукции и технологий.

Инновационными в энергетике могут быть названы как конкретные новые изделия, так и различные новые методы и методики, обеспечивающие повышение энергоэффективности в самом широком понимании этого слова. Однако необходимым условием для использования термина «инновационный» являются предварительно проведенные научные исследования.

## 2 МЕТОДЫ НАУЧНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В ЭНЕРГЕТИКЕ

Все современные научные исследования в области энергетики предполагают использование в той или иной мере научного моделирования.

**Научное моделирование** – это отображение или воспроизведение действительности для изучения имеющихся в ней объективных закономерностей.

Любая научная модель является упрощённым аналогом реального объекта, учитывающим только необходимые параметры и свойства этого объекта с необходимой точностью.

В научном моделировании решают задачи анализа и задачи синтеза.

**Анализ** – это изучение уже имеющейся структуры некоторой системы с целью выявления особенностей её функционирования при различных внешних условиях. Так задачи, относящиеся к теоретическим основам электротехники – это в подавляющем большинстве случаев задачи анализа. В таких задачах количество уравнений соответствует количеству неизвестных.

**Синтез** – это процесс создания новой структуры или доработки имеющейся структуры изучаемой системы. Например, если для задачи анализа схема замещения электродвигателя должна быть известна из литературы, то для задачи синтеза эту схему нужно разработать, создать. Поэтому синтез – значительно более сложный путь научного моделирования, чем анализ, подразумевающий наличие у исследователя, как знаний методов анализа, так и ряда дополнительных знаний. Наличие задач синтеза в научных исследованиях, как правило, свидетельствует об их более высокой значимости по сравнению с наличием только задач анализа.

Бывает материальное и мысленное научное моделирование.

**Материальное моделирование** оперирует реальными физическими объектами и бывает наглядным, натурным и физическим.

При **наглядном моделировании** создают различные макеты, представляющие собой уменьшенные копии изучаемых объектов. Это могут быть макеты крупных электростанций или подстанций, позволяющие более наглядно представить влияние различных факторов на элементы исследуемых объектов. Например, влияние ветровой нагрузки на провода, возможные последствия при падении опоры линии электропередачи, и так далее.

**Натурное моделирование** осуществляют непосредственно на изучаемых объектах. Так можно изучить работу конкретного силового трансформатора в режиме холостого хода или в режиме короткого замыкания, подключив этот трансформатор к электрической сети с требуемым номинальным напряжением.

**Физическое моделирование** – это имитация процессов в исследуемом объекте с помощью подобных процессов, но в другом масштабе, удобном для исследований в лабораторных условиях. Для задач энергетики наиболее яркий пример физического моделирования – это лабораторные стенды, на которых представлены электротехнические элементы, имитирующие реальные элементы системы электроснабжения и использующие эффект масштабирования по токам и напряжениям в соответствии с формулами:

$$U_{\text{мод}} = \alpha \cdot U_{\text{сети}}; I_{\text{мод}} = \beta \cdot I_{\text{сети}}, \quad (2.1)$$

где:  $U_{\text{мод}}$ ,  $I_{\text{мод}}$  – соответственно напряжение и ток, присутствующие на клеммах лабораторного стенда;  $\alpha$ ,  $\beta$  – масштабирующие коэффициенты;  $U_{\text{сети}}$ ,  $I_{\text{сети}}$  – реальные напряжения и токи электрической сети.

Из формул (2.1) следует, что для сопротивлений лабораторного стенда не требуются дополнительные масштабирующие коэффициенты, так как масштаб может быть рассчитан на основе уже имеющихся коэффициентов:

$$R_{\text{мод}} = \frac{\alpha \cdot U_{\text{сети}}}{\beta \cdot I_{\text{сети}}} = \frac{\alpha}{\beta} \cdot R_{\text{сети}}. \quad (2.2)$$

Для моделирования реактивных элементов можно установить масштаб для частоты. Так для имитации большой индуктивности повышение частоты будет эквивалентно росту индуктивного сопротивления:

$$X_{\text{мод}} = 2 \cdot \pi \cdot \gamma \cdot f \cdot L_{\text{сети}} = 2 \cdot \pi \cdot f_{\text{мод}} \cdot L_{\text{сети}}, \quad (2.3)$$

где:  $X_{\text{мод}}$  – моделируемое индуктивное сопротивление;  $\gamma$  – масштабирующий коэффициент;  $f$  – реальная частота сети;  $f_{\text{мод}}$  – частота

напряжения на лабораторном стенде;  $L_{\text{сети}}$  – реальная индуктивность изучаемого участка электрической сети.

**Мысленное моделирование** оперирует абстрактными понятиями и бывает символическим и математическим. Результаты мысленного научного моделирования представляют собой описание на лингвистических языках (русский, английский и т.д.), наборы символов или схем, алгоритмы, математические формулы, описание на языках программирования. Главным инструментом мысленного моделирования являются математические формулы.

При **символическом моделировании** используют систему символов, иногда придуманных специально для рассматриваемой задачи, позволяющих наглядно отобразить графически изучаемую структуру. Так для задач электротехники и энергетики часто применяют графоаналитический метод или теорию графов, где изучаемая схема представляется в виде набора кривых стрелок (графов), соединённых между собой (рис. 2.1).

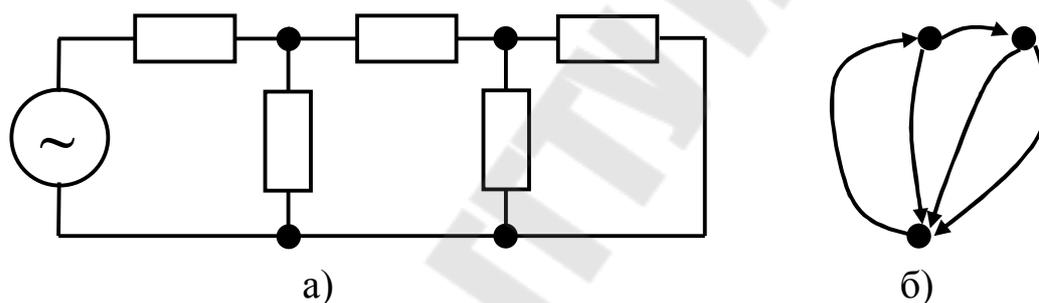


Рис. 2.1 Символическая модель электрической схемы (а) в виде направленного графа (б)

Символическое моделирование обычно используют как начальный этап для математического моделирования.

**Математическое моделирование** – это мысленное описание процессов изучаемого объекта преимущественно с помощью математических формул.

Кроме формул для математического моделирования в энергетике применяют схемы замещения, алгоритмы и компьютерные программы.

**Схема замещения** – это электротехническая схема, состоящая из идеальных электротехнических элементов и предназначенная для описания процессов в исследуемом объекте с некоторыми допущениями и упрощениями. Такие схемы могут моделировать как элек-

трические, так и неэлектрические процессы (тепловые, гидравлические, механические и другие). Например, для силового трансформатора можно рассматривать как электрическую, так и тепловую схемы замещения. Преимущество использования схем замещения при математическом моделировании над использованием только уравнений заключается в наглядности представления изучаемых процессов, а также в применении таких удобных для расчётов методов, как метод наложения.

**Алгоритм** – это описание последовательности операций. Для задач математического моделирования алгоритмы представляют либо в виде уравнений с дискретно изменяющимися величинами, либо в виде логических схем для последующего написания компьютерных программ.

**Компьютерные программы** при математическом моделировании применяются как удобные инструменты для проведения вычислительных или натурных экспериментов.

Математические модели бывают линейными и нелинейными, непрерывными и дискретными, стационарными и нестационарными, детерминированными и стохастическими.

**Линейная математическая модель** работает с уравнениями, значения коэффициентов в которых не зависят от моделируемых параметров.

**Нелинейная математическая модель** работает с уравнениями, значения коэффициентов в которых зависят от моделируемых параметров.

**Непрерывная математическая модель** работает с уравнениями, не имеющими разрывов (точек, где производная обращается в бесконечность).

**Дискретная математическая модель** работает с уравнениями со ступенчато изменяющимися величинами. Так, например, в алгоритмах необходимо использовать только дискретные модели, так как компьютер не способен работать с непрерывными величинами.

**Стационарная математическая модель** описывает объекты в установившихся режимах.

**Нестационарная математическая модель** описывает переходные процессы изучаемых объектов.

**Детерминированная математическая модель** работает с уравнениями на основе известных законов физики.

**Стохастическая математическая модель** работает с уравнениями, использующими теорию вероятностей и математическую статистику.

Рассмотрим общий подход к математическому моделированию процессов в объектах энергетики с помощью структурной схемы, приведенной на рис. 2.2.

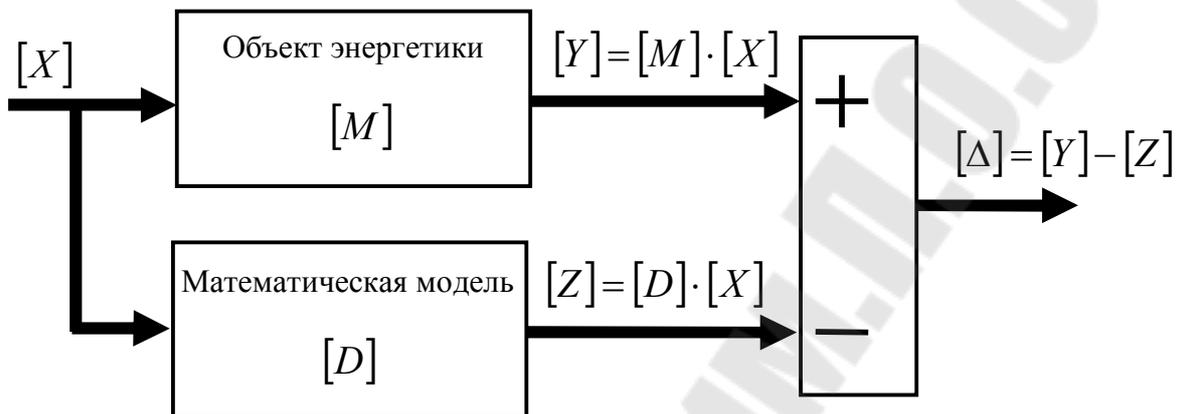


Рис. 2.2 Структурная схема, иллюстрирующая математическое моделирование

Пусть изучается некоторый объект энергетики, описываемый набором неизвестных параметров, записанных в квадратной матрице  $[M]$ . Тогда в соответствие к этому объекту необходимо поставить математическую модель с эквивалентными параметрами в матрице  $[D]$ .

На изучаемый объект воздействуют параметры, записанные в матрицу-столбец  $[X]$ . Эти же параметры воздействуют и на математическую модель.

На выходах объекта формируются параметры матрицы-столбца  $[Y]$  в соответствии с выражением:

$$[Y] = [M] \cdot [X]. \quad (2.4)$$

На аналогичных выходах математической модели формируются параметры матрицы-столбца  $[Z]$ :

$$[Z] = [D] \cdot [X]. \quad (2.5)$$

Параметры матриц  $[X]$  и  $[Y]$ , как правило, функционально связаны с величинами, измеряемыми на объекте с помощью различных датчиков, либо имитируются в вычислительном эксперименте:

$$[X] = f([x]), [Y] = \varphi([y]), \quad (2.6)$$

где:  $[x]$ ,  $[y]$  – матрицы непосредственно измеренных величин;  $f$ ,  $\varphi$  – функции преобразования.

Параметры матрицы  $[M]$  остаются неизвестными даже после окончания моделирования.

**Основная задача математического моделирования** – это расчёт параметров математической модели  $[D]$  таким образом, чтобы добиться минимума **ошибки моделирования**, рассчитываемой по формуле:

$$\begin{cases} [\Delta] = [Y] - [Z]; \\ [\Delta] \rightarrow \min. \end{cases} \quad (2.7)$$

В результате выполнения условия (2.6) параметры математической модели  $[D]$  будут максимально близки к соответствующим параметрам объекта  $[M]$ . Идеальной близости достичь невозможно, поскольку на каждый реальный объект воздействует бесконечное множество факторов, а также потому, что размерность матрицы  $[M]$  априори искусственно ограничивается. Таким образом, любое математическое моделирование выполняется лишь с некоторой точностью. Оценка погрешности моделирования – одна из важнейших составляющих научных исследований.

Процесс определения параметров матрицы  $[D]$  называют **параметрической идентификацией**. Различают активные и пассивные методы идентификации.

При **активной идентификации** на входы объекта подают заранее сформированные воздействия. Это позволяет провести исследования во всех необходимых диапазонах входных величин. Однако для многих объектов энергетики, прежде всего, высоковольтного мощного оборудования такой метод будет связан со значительными финансовыми затратами.

При **пассивной идентификации** исследуемый объект находится в нормальных условиях эксплуатации, что значительно удешевляет и упрощает постановку эксперимента, но при этом диапазон изменения входных величин ограничивается текущими условиями в течение эксперимента.

Параметрическую идентификацию осуществляют **в статике** и **в динамике**. В первом случае рассматривают установившийся режим исследуемого объекта, а во втором случае – переходные процессы.

### 3 ИДЕНТИФИКАЦИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ОБЪЕКТОВ ЭНЕРГЕТИКИ В СТАТИКЕ

В статике, то есть в установившемся режиме, для задач энергетики применяют следующие основные методы параметрической идентификации:

- метод наименьших квадратов;
- полный факторный эксперимент;
- дисперсионный анализ;
- частотный анализ;
- регрессионный анализ.

#### 3.1 Метод наименьших квадратов

Метод наименьших квадратов является одним из самых распространённых и универсальных в научных исследованиях. Он может применяться не только для задач параметрической идентификации в статике, но и для идентификации в динамике. Рассмотрим последовательность операций этого метода.

Вначале необходимо записать выражения для ошибки моделирования  $\Delta$  в соответствии с формулами (2.5)-(2.7), а потом возвести их в квадрат (в матричной форме набор выражений записывается в одну строку):

$$[\Delta]^2 = ([Y] - [D] \cdot [X])^2. \quad (3.1)$$

Затем записывают выражения для суммы квадратов ошибок моделирования в серии экспериментов:

$$[E] = \sum_{j=1}^m [\Delta]_j^2, \quad (3.2)$$

где:  $j$  – номер эксперимента;  $m$  – количество экспериментов.

Далее записывают выражения, представляющие собой частные производные от матрицы  $[E]$  по всем искомым параметрам матрицы  $[D]$ , и приравнивают эти выражения к нулю, то есть формируют систему уравнений (в матричной форме система уравнений записывается в одну строку):

$$\frac{\partial[E]}{\partial[D]} = 0. \quad (3.3)$$

Решая систему (3.3), находят требуемые параметры матрицы  $[D]$ .

Рассмотрим частный случай решения. Пусть статические характеристики некоторого объекта энергетики описываются зависимостями вида:

$$Y = d_0 X_0 + d_1 X_1 + d_2 X_2 + \dots + d_n X_n = \sum_{i=0}^n a_i X_i, \quad (3.4)$$

где:  $X_i$  – входные величины;  $d_i$  – параметры математической модели;  $Y$  – единственная выходная величина.

Тогда в соответствии с (3.1) для  $j$ -го эксперимента квадрат ошибки моделирования будет равен:

$$\Delta_j^2 = \left( Y_j - \sum_{i=0}^n a_i X_{i,j} \right)^2. \quad (3.5)$$

Далее по формуле (3.2) записываем сумму квадратов ошибок моделирования:

$$E = \sum_{j=1}^m \left( Y_j - \sum_{i=0}^n a_i X_{i,j} \right)^2. \quad (3.6)$$

Затем можно составить систему уравнений на основе выражений для частных производных (3.3), учитывая, что производные необходимо брать от сложных (вложенных) функций:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial E}{\partial d_0} = \sum_{j=1}^m 2 \cdot \left( Y_j - \sum_{i=0}^n d_i X_{i,j} \right) \cdot (-X_{0,j}) = 0; \\ \frac{\partial E}{\partial d_1} = \sum_{j=1}^m 2 \cdot \left( Y_j - \sum_{i=0}^n d_i X_{i,j} \right) \cdot (-X_{1,j}) = 0; \\ \vdots \\ \frac{\partial E}{\partial d_n} = \sum_{j=1}^m 2 \cdot \left( Y_j - \sum_{i=0}^n d_i X_{i,j} \right) \cdot (-X_{n,j}) = 0. \end{array} \right. \quad (3.7)$$

Разделив все уравнения (3.7) на 2, и раскрывая скобки, получим:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{j=1}^m \left( -Y_j X_{0,j} + X_{0,j} \cdot \sum_{i=0}^n d_i X_{i,j} \right) = 0; \\ \sum_{j=1}^m \left( -Y_j X_{1,j} + X_{1,j} \cdot \sum_{i=0}^n d_i X_{i,j} \right) = 0; \\ \vdots \\ \sum_{j=1}^m \left( -Y_j X_{n,j} + X_{n,j} \cdot \sum_{i=0}^n d_i X_{i,j} \right) = 0. \end{array} \right. \quad (3.8)$$

Решая систему (3.8), находим неизвестные параметры  $d_i$ .

После этого для каждого  $j$ -го эксперимента подставляют параметры  $d_i$  в исходную математическую модель (3.4) вместе с величинами  $X_{i,j}$  и рассчитывают значения  $Y_{\text{расч.}j}$ . Затем определяют относительные погрешности моделирования:

$$\delta_j = \frac{Y_{\text{расч.}j} - Y_j}{Y_j}. \quad (3.9)$$

Если какие-либо из значений  $\delta_j$  превышают допустимые значения, то делают вывод о некорректной записи исходной математической модели или о необходимости применения другого метода для идентификации искомых параметров.

Рассмотрим пример.

Пусть в результате экспериментов в установившемся режиме измерены значения суммарного тока нагрузки  $I$  силового трансформатора, температуры окружающего воздуха  $\theta_B$  и температуры масла  $\theta_M$  этого трансформатора.

Необходимо найти параметры математической модели вида:

$$d_1 \cdot I^2 + d_2 \cdot \theta_B = \theta_M. \quad (3.10)$$

Исходя из записи выражения (3.10) в соответствии с рис. 2.2 можно составить структурную схему моделирования (рис. 3.1).

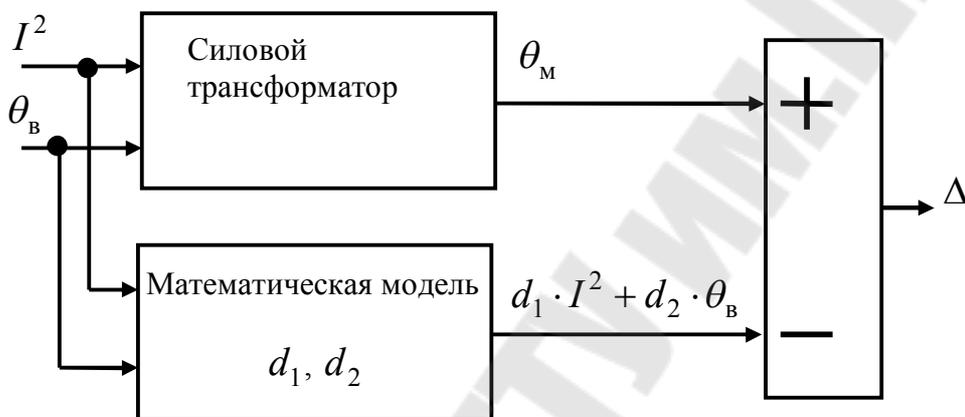


Рис. 3.1 Структурная схема моделирования тепловых процессов в силовом трансформаторе

Как видно из схемы на рис. 3.1, входными параметрами для математической модели являются квадрат тока нагрузки и температура воздуха.

Для расчёта неизвестных параметров  $d_1$ ,  $d_2$  на силовом трансформаторе необходимо провести несколько экспериментов в требуемых условиях. Для каждого  $j$ -го эксперимента нужно получить значения  $I_j^2$ ,  $\theta_{B,j}$  и  $\theta_{M,j}$ , а затем воспользоваться методом наименьших квадратов в соответствии с формулами (3.8).

### 3.2 Полный факторный эксперимент

При выполнении экспериментальных научных исследований иногда требуется изучить взаимное влияние различных факторов на объекты энергетики. В особенности такая задача актуальна, когда объект имеет нелинейные характеристики, и разные сочетания внеш-

них воздействий вызывают разные изменения исследуемой физической величины. Так, например, у силового трансформатора характеристика намагничивания является нелинейной, а ёмкость воздушной линии электропередачи зависит от напряжения.

При небольшом количестве входных величин  $[X]$  математической модели неизвестные параметры матрицы  $[D]$  можно определить, рассматривая все возможные комбинации значений величин  $[X]$ .

В процессе проведения эксперимента каждое внешнее воздействие в установившемся режиме может принимать одно из заранее определённых фиксированных значений, которые называются **уровнями**.

Эксперимент, в котором реализуются все возможные сочетания уровней, называется **полным факторным экспериментом**.

Наиболее распространённой методикой проведения полного факторного эксперимента является метод « $2^k$ », в котором каждое из  $k$  входных воздействий  $X$  принимает всего два значения, и, следовательно, общее число опытов равно  $2^k$ .

План проведения эксперимента описывают с помощью специальной таблицы, которая называется **матрицей планирования**. В ней каждая строка соответствует условиям одного опыта, а столбцы – значениям входных воздействий.

Математическую модель объекта с  $k$  входными воздействиями задают в виде:

$$Y = d_0 + \sum_{j=1}^k d_j X_j + \sum_{\substack{u=1 \\ j=2 \\ u < j}}^k d_{u,j} X_u X_j + \sum_{\substack{u=1 \\ j=2 \\ l=3 \\ u < j < l}}^k d_{u,j,l} X_u X_j X_l + \dots \quad (3.11)$$

Так, например, для объекта с тремя входными воздействиями выражение (3.11) запишется в виде:

$$Y = d_0 + d_1 X_1 + d_2 X_2 + d_3 X_3 + d_{1,2} X_1 X_2 + d_{1,3} X_1 X_3 + d_{2,3} X_2 X_3 + d_{1,2,3} X_1 X_2 X_3. \quad (3.12)$$

Матрица планирования для такого случая будет выглядеть, как показано в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Матрица планирования при  $k = 3$ 

№ эксперимента	$X_1$	$X_2$	$X_3$
1	-	-	-
2	-	-	+
3	-	+	-
4	-	+	+
5	+	-	-
6	+	-	+
7	+	+	-
8	+	+	+
9	-	-	-
10	-	-	+
11	-	+	-
12	-	+	+
13	+	-	-
14	+	-	+
15	+	+	-
16	+	+	+

Символ «-» в табл. 3.1 обозначает первое значение входной величины  $X$ , а символ «+» – второе значение.

Для объектов энергетики значение одного из уровней входных воздействий удобно задавать равным нулю. Тогда параметры математической модели можно постепенно определять по соответствующим экспериментам.

Например, когда в эксперименте №1  $X_{1,1}$ ,  $X_{2,1}$ ,  $X_{3,1}$  равны нулю (табл. 3.1), то в соответствии с (3.12)  $d_0 = Y_1$ . Когда в эксперименте №5  $X_2$ ,  $X_3$  равны нулю, то  $d_1 = \frac{Y_5 - d_0}{X_{1,5}}$ . Таким образом можно по-

шагово определять все параметры модели, как показано ниже в алгоритме (3.13).

$$\left\{ \begin{array}{l}
 d_0 = Y_1; \\
 d_1 = \frac{Y_5 - d_0}{X_{1,5}}; \\
 d_2 = \frac{Y_3 - d_0}{X_{2,3}}; \\
 d_3 = \frac{Y_2 - d_0}{X_{3,2}}; \\
 d_{1,2} = \frac{Y_7 - d_0 - d_1 \cdot X_{1,7} - d_2 \cdot X_{2,7}}{X_{1,7} \cdot X_{2,7}}; \\
 d_{1,3} = \frac{Y_6 - d_0 - d_1 \cdot X_{1,6} - d_3 \cdot X_{3,6}}{X_{1,6} \cdot X_{3,6}}; \\
 d_{2,3} = \frac{Y_4 - d_0 - d_2 \cdot X_{2,4} - d_3 \cdot X_{3,4}}{X_{2,4} \cdot X_{3,4}}; \\
 d_{1,2,3} = \frac{Y_8 - d_0 - d_1 \cdot X_{1,8} - d_2 \cdot X_{2,8} - d_3 \cdot X_{3,8}}{X_{1,8} \cdot X_{2,8} \cdot X_{3,8}} - \\
 - \frac{d_{1,2} \cdot X_{1,8} \cdot X_{2,8} - d_{1,3} \cdot X_{1,8} \cdot X_{3,8} - d_{2,3} \cdot X_{2,8} \cdot X_{3,8}}{X_{1,8} \cdot X_{2,8} \cdot X_{3,8}};
 \end{array} \right. \quad (3.13)$$

Из (3.13) следует, что когда одно из значений входной величины равно нулю, то требуется провести количество экспериментов, равное количеству параметров математической модели. В рассматриваемом случае с тремя входными воздействиями это 8 экспериментов, то есть первая половина матрицы планирования.

Рассмотрим пример полного факторного эксперимента.

Пусть имеется схема эксперимента, приведенная на рис. 3.2. В схеме осуществляется измерение напряжения электрической сети при подключении или отключении нагрузок  $R_1$ ,  $R_2$  с помощью ключей  $SA_1$ ,  $SA_2$ . Очевидно, что всего имеются 4 комбинации положения ключей.

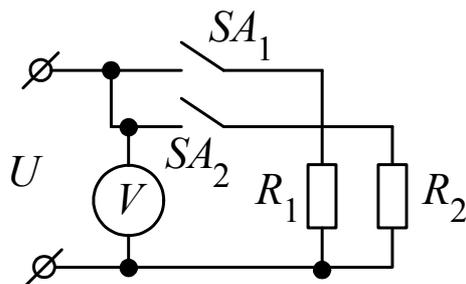


Рис. 3.2 Схема эксперимента

Задача моделирования в данном случае формулируется следующим образом: как зависит напряжение сети от сопротивления нагрузки? То есть необходимо найти параметры математической модели вида:

$$U = d_0 + d_1 R_1 + d_2 R_2 + d_{1,2} R_1 R_2. \quad (3.14)$$

Таким образом, входными параметрами математической модели в этом примере являются сопротивления  $R_1$ ,  $R_2$ , а выходным параметром – напряжение  $U$  как показано на рис. 3.3.

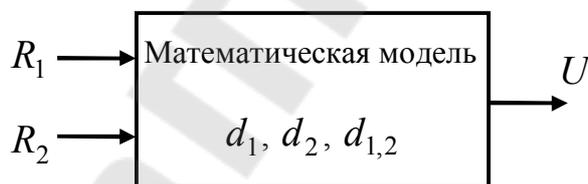


Рис. 3.3 Структурная схема математической модели

Выполнив четыре измерения при различных положениях ключей далее можно рассчитать параметры  $d_1$ ,  $d_2$ ,  $d_{1,2}$  по аналогии с алгоритмом (3.13).

### 3.3 Дисперсионный анализ

**Дисперсионный анализ** – это статистический метод оценивания влияния одного или нескольких факторов на протекание исследуемого процесса.

Если оценивается влияние одного фактора, то дисперсионный анализ называют **однофакторным**.

В результате проведения дисперсионного анализа получают ответ на вопрос: существенно или не существенно влияние рассматри-

ваемого фактора? Например, насколько существенно влияние температуры окружающей среды на результаты измерений.

Рассмотрим порядок операций дисперсионного анализа.

Вначале проводят серии идентичных опытов по измерению некоторой величины  $y$  (электрической или неэлектрической) с разными значениями оцениваемого фактора.

После этого рассчитывают **оценку дисперсии** между сериями опытов:

$$Q_1 = N \cdot \sum_{i=1}^n (\bar{y}_i - \bar{y})^2, \quad (3.15)$$

где:  $N$  – количество опытов внутри серии;  $i$  – номер серии опытов;  $n$  – количество серий опытов;  $\bar{y}_i$  – математическое ожидание (среднее арифметическое значение) измеряемой величины внутри  $i$ -й серии опытов;  $\bar{y}$  – математическое ожидание измеряемой величины по всем опытам.

Затем рассчитывают оценку дисперсии внутри серий опытов:

$$Q_2 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{N_i} (y_{i,j} - \bar{y}_i)^2, \quad (3.16)$$

где:  $j$  – номер опыта внутри серии.

Далее определяют параметр статистического критерия Фишера:

$$F = \frac{\frac{1}{n-1} \cdot Q_1}{\frac{1}{n \cdot (N-1)} \cdot Q_2} = \frac{n \cdot (N-1) \cdot Q_1}{(n-1) \cdot Q_2} = \frac{k_2 \cdot Q_1}{k_1 \cdot Q_2}, \quad (3.17)$$

где:  $k_1, k_2$  – статистические степени свободы.

По таблице распределения Фишера из справочника по математической статистике и значениям  $k_1$  и  $k_2$  находят среднестатистический параметр критерия Фишера  $F_q$ .

После этого сравнивают значения  $F$  и  $F_q$ . Если  $F \leq F_q$ , то влияние рассматриваемого фактора на результаты измерения несущественно. В противном случае влияние этого фактора существенно.

Рассмотрим пример. Пусть поставлена задача оценки влияния фирмы-производителя омметра на результаты измерений сопротивлений. Для этого необходимо иметь несколько омметров с одинаковыми классами точности, но разных фирм-производителей. Для проведения измерений потребуется набор сопротивлений требуемого диапазона, а также помещение с неизменной температурой. Тогда каждая серия экспериментов будет заключаться в измерении всех сопротивлений одним из приборов. После выполнения измерений всеми приборами необходимо воспользоваться описанной выше методикой, используя в качестве величины  $y_{i,j}$  измеренное значение сопротивления.

### 3.4 Определение частотных характеристик объектов энергетики

Напряжения и токи электрической сети имеют, как правило, форму, отличную от синусоидальной, то есть содержат высшие гармонические составляющие, которые влияют на работу всего электротехнического оборудования. Для оценки этого влияния необходимо знать частотные характеристики исследуемых устройств.

В системах электроснабжения применяют высокочастотную связь по силовым линиям. Для расчёта подобных систем также необходимо иметь сведения о частотных характеристиках объектов.

Основной частотной характеристикой электротехнических устройств в установившемся режиме, то есть в статике, является **передаточная функция**, представляющая собой отношение выходной величины  $Y(j\omega)$  (напряжения или тока) ко входной величине  $X(j\omega)$  (напряжению или току):

$$W(j\omega) = \frac{Y(j\omega)}{X(j\omega)}. \quad (3.18)$$

На структурных схемах передаточные функции изображают в виде блоков как показано на рис. 3.4.

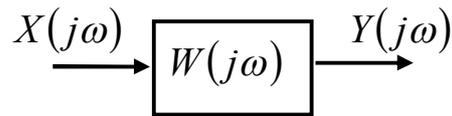


Рис. 3.4 Структурная схема с передаточной функцией

Основные результаты частотного анализа – это амплитудно-частотная (АЧХ) и фазо-частотная (ФЧХ) характеристики объекта.

**АЧХ** объекта энергетики – это зависимость модуля передаточной функции от частоты:

$$A(\omega) = |W(j\omega)| = \sqrt{(\operatorname{Re}W(j\omega))^2 + (\operatorname{Im}W(j\omega))^2}, \quad (3.19)$$

где:  $\operatorname{Re}W(j\omega)$  – вещественная часть комплексной передаточной функции;  $\operatorname{Im}W(j\omega)$  – мнимая часть комплексной передаточной функции.

**ФЧХ** объекта энергетики – это зависимость аргумента передаточной функции от частоты:

$$\varphi(\omega) = \operatorname{Arg}W(j\omega) = \operatorname{arctg} \frac{\operatorname{Im}W(j\omega)}{\operatorname{Re}W(j\omega)}. \quad (3.20)$$

Особенностью объектов энергетики является их работа при высоких напряжениях и токах, поэтому схема эксперимента по определению частотных характеристик состоит из последовательно включенных устройств: генератора измерительных сигналов, входного измерительного преобразователя, исследуемого объекта, выходного измерительного преобразователя и цифрового анализатора (рис. 3.5).

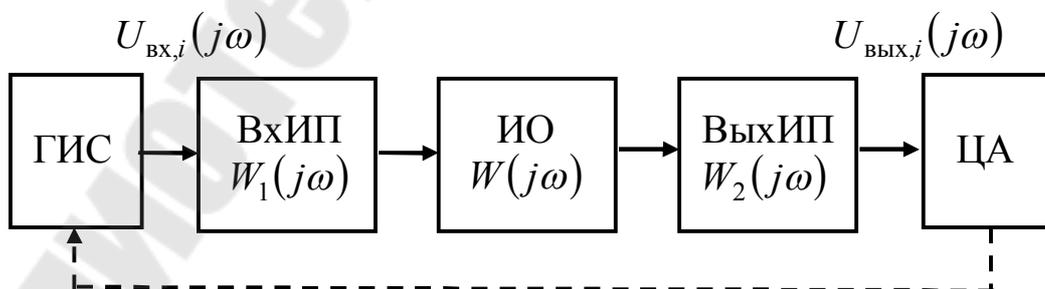


Рис. 3.5 Структурная схема эксперимента:

ГИС – генератор измерительных сигналов; ВхИП – входной измерительный преобразователь; ИО – исследуемый объект; ВыИП – выходной измерительный преобразователь; ЦА – цифровой анализатор

Измерительные преобразователи согласовывают уровни напряжений и токов между цепями исследуемого объекта и измерительными приборами и имеют собственные передаточные функции  $W_1(j\omega)$  и  $W_2(j\omega)$ . Для этих функций должны быть известны либо аналитические выражения, либо экспериментальные значения АЧХ и ФЧХ.

Исследуемый объект имеет передаточную функцию  $W(j\omega)$ .

В процессе активного эксперимента генератор измерительных сигналов выдаёт  $i$ -е напряжение синусоидальной формы  $U_{ВХ,i}$  с частотой  $f_i$ , цифровой анализатор измеряет напряжение  $U_{ВЫХ,i}$ . Значения модуля и аргумента общей экспериментальной передаточной функции  $W_{\Sigma,i}$  на  $i$ -м измерении соответственно равны:

$$W_{\Sigma,i} = \frac{U_{ВЫХ,i}}{U_{ВХ,i}}, \quad (3.21)$$

$$\text{Arg}W_{\Sigma,i} = \varphi_{ВЫХ,i} - \varphi_{ВХ,i}, \quad (3.22)$$

где:  $i$  - номер гармонической составляющей, равный номеру опыта;  $\varphi_{ВЫХ,i}$ ,  $\varphi_{ВХ,i}$  фазовые сдвиги выходного и входного напряжений.

Как правило,  $\varphi_{ВХ,i}$  принимают равным  $0^\circ$ .

Цель эксперимента – получить значения АЧХ и ФЧХ исследуемого объекта, то есть  $|W_i(j\omega)|$  и  $\text{Arg}W_i(j\omega)$ .

Если взаимное влияние устройств экспериментальной установки незначительно, то экспериментальная передаточная функция равна произведению всех передаточных функций последовательно подключенных объектов:

$$W_{\Sigma,i}(j\omega) = W_{1,i}(j\omega) \cdot W_i(j\omega) \cdot W_{2,i}(j\omega). \quad (3.23)$$

Откуда выразим передаточную функцию исследуемого объекта:

$$\begin{aligned}
 W_i(j\omega) &= \frac{W_{3,i}(j\omega)}{W_{1,i}(j\omega) \cdot W_{2,i}(j\omega)} = \\
 &= \frac{|W_{3,i}(j\omega)| \cdot e^{ArgW_{3,i}(j\omega)}}{|W_{1,i}(j\omega)| \cdot e^{ArgW_{1,i}(j\omega)} \cdot |W_{2,i}(j\omega)| \cdot e^{ArgW_{2,i}(j\omega)}} = \\
 &= \frac{|W_{3,i}(j\omega)|}{|W_{1,i}(j\omega)| \cdot |W_{2,i}(j\omega)|} \cdot e^{ArgW_{3,i}(j\omega) - ArgW_{1,i}(j\omega) - ArgW_{2,i}(j\omega)}.
 \end{aligned}
 \tag{3.24}$$

Из (3.24) следует, что модуль и аргумент передаточной функции исследуемого объекта рассчитываются по формулам:

$$|W_i(j\omega)| = \frac{|W_{3,i}(j\omega)|}{|W_{1,i}(j\omega)| \cdot |W_{2,i}(j\omega)|}.
 \tag{3.25}$$

$$ArgW_i(j\omega) = ArgW_{3,i}(j\omega) - ArgW_{1,i}(j\omega) - ArgW_{2,i}(j\omega).
 \tag{3.26}$$

В качестве результата исследований на основе выражений (3.25) и (3.26) необходимо построить графики АЧХ и ФЧХ исследуемого объекта, как показано на рис. 3.6.

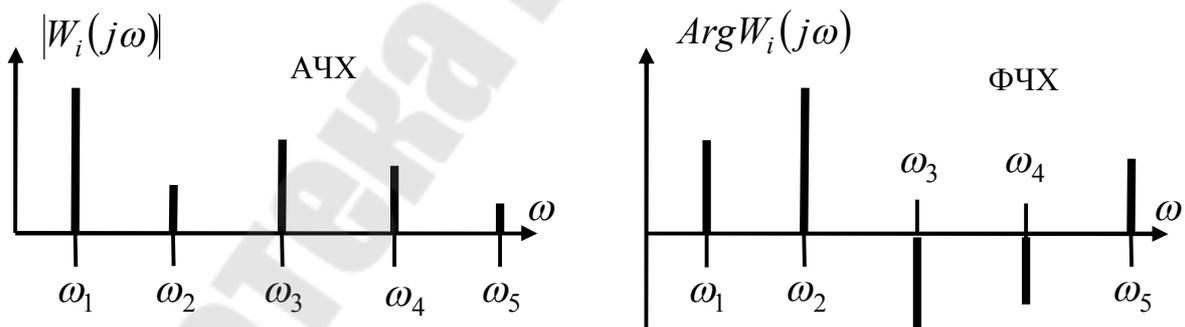


Рис. 3.6 АЧХ и ФЧХ по результатам эксперимента

Необходимо отметить, что для практических задач энергетики во многих случаях достаточно получить только АЧХ. ФЧХ применяется значительно реже.

### 3.5 Регрессионный анализ

Многие процессы в объектах энергетики имеют очень сложный характер, так как зависят от большого количества внешних случайных факторов. Так, например, нагрузка любой системы электроснабжения изменяется случайным образом, поскольку в каждый момент времени может быть включено разное количество электроприёмников. Соответственно, значения напряжений и токов в электрических сетях – это также случайные величины.

Для анализа объектов с вероятностными событиями проводят экспериментальные исследования с многократными измерениями выходной величины  $Y$  математических моделей при одних и тех же или близких значениях входной величины  $X$ . После этого строят **корреляционное поле** (рис. 3.7).

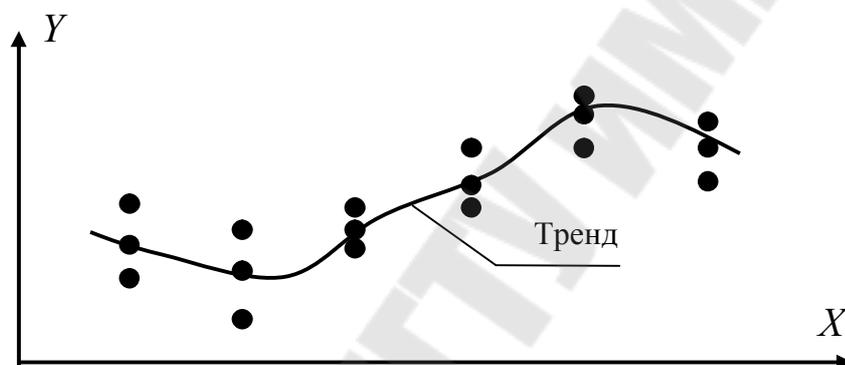


Рис. 3.7 Корреляционное поле и тренд

После статистической обработки корреляционного поля строят **тренд** – характерную зависимость, с некоторой точностью описывающую исследуемую закономерность. Простейший способ построения тренда – получение средних арифметических значений выходных величин математической модели при соответствующих значениях входных величин.

Далее кривую тренда аппроксимируют математической зависимостью, в качестве которой обычно используют полином:

$$\bar{Y}(X) = b_0 + b_1 \cdot X + b_2 \cdot X^2 + \dots + b_n \cdot X^n = \sum_{i=0}^n b_i \cdot X^i, \quad (3.27)$$

где:  $b_i$  – аппроксимирующие коэффициенты.

При возрастании степени  $X^i$  в полиноме значения аппроксимирующих коэффициентов уменьшаются, то есть эти коэффициенты представляют собой арифметическую регрессию – отсюда и название метода – регрессионный анализ.

Коэффициенты регрессии наиболее удобно определять методом наименьших квадратов в соответствии с п. 3.1.

Полученную зависимость (3.27) можно использовать для прогнозирования изменения исследуемой величины.

## 4 ИДЕНТИФИКАЦИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ОБЪЕКТОВ ЭНЕРГЕТИКИ В ДИНАМИКЕ

Статика, то есть установившийся режим – это условное понятие для процессов в энергетических системах, применяемое с некоторыми допущениями для упрощения их анализа. Установившийся режим в принципе никогда не может быть достигнут, так как все влияющие величины всегда изменяются. Нагрузка, температура, напряжение электрической сети, электромагнитные переходные процессы – всё это изменяющиеся во времени величины.

### 4.1 Переходные функции объектов энергетики

Один из наиболее простых способов оценки параметров объектов энергетики в динамике – анализ их переходных функций.

**Переходная функция** – это реакция объекта на скачкообразное внешнее воздействие.

Форма переходной функции объекта полностью определяется его передаточной функцией, записанной в форме операторного преобразования Лапласа:

$$W(p) = \frac{Y(p)}{X(p)}, \quad (4.1)$$

где:  $p$  – оператор преобразования Лапласа.

Частотная передаточная функция  $W(j\omega)$ , рассмотренная в п.3.4., является частным случаем передаточной функции, записанной по формуле (4.1) для установившегося режима. Соответственно, обозначения на структурной схеме также аналогичны (рис. 4.1).

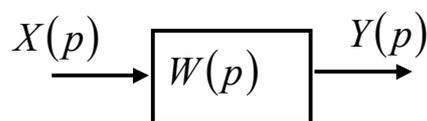


Рис. 4.1 Структурная схема с передаточной функцией

Величины  $X(p)$  и  $Y(p)$  могут быть как электрическими, так и неэлектрическими. Например, это могут быть температура или уровень вибраций.

По правилам преобразования Лапласа скачкообразное входное воздействие (функция Хевисайда) со значением  $X$  будет иметь следующее операторное изображение:

$$X(p) = \frac{X}{p}. \quad (4.2)$$

Тогда выражение (4.1) запишется в виде:

$$W(p) = \frac{Y(p) \cdot p}{X}. \quad (4.3)$$

Передаточные функции всех объектов энергетики могут быть представлены в виде отношения полиномов:

$$\begin{aligned} W(p) &= \frac{b_m \cdot p^m + b_{m-1} \cdot p^{m-1} + \dots + b_1 \cdot p + b_0}{a_n \cdot p^n + a_{n-1} \cdot p^{n-1} + \dots + a_1 \cdot p + a_0} = \\ &= \frac{\sum_{i=0}^m b_i \cdot p^i}{\sum_{j=0}^n a_j \cdot p^j} = \frac{B(p)}{A(p)}; n \geq m. \end{aligned} \quad (4.4)$$

Знаменатель в выражении (4.4)  $A(p)$  называется **характеристическим уравнением**, а параметр  $n$  – **порядком системы**. Например, говорят: «Система третьего порядка».

Выразив из (4.3)  $Y(p)$  и подставив его в (4.4), получим формулу операторного изображения переходной функции:

$$Y(p) = \frac{B(p) \cdot X}{p \cdot A(p)} = \frac{B(p) \cdot X}{H(p)}, \quad (4.5)$$

где:  $H(p)$  – характеристическое уравнение переходной функции.

Корни характеристического уравнения  $H(p)$  находят, решив уравнение:

$$H(p) = 0. \quad (4.6)$$

Количество корней характеристического уравнения равно порядку системы плюс один ( $n + 1$ ) из-за дополнительного умножения знаменателя передаточной функции на оператор  $p$  в выражении (4.5).

Чтобы получить непосредственно саму переходную функцию во времени  $Y(t)$ , необходимо от операторного изображения (4.5) перейти к операторному оригиналу в соответствии с правилами обратного преобразования Лапласа:

$$Y(t) = \sum_{k=1}^{n+1} \frac{B(p_k) \cdot X \cdot e^{p_k \cdot t}}{H'(p_k)}, \quad H' = \frac{dH(p)}{dp}, \quad (4.7)$$

где:  $p_k$  – корни характеристического уравнения  $H(p)$ , найденные из уравнения (4.6).

Для объектов энергетики характерны два вида переходных функций: чисто апериодические и периодические с апериодической составляющей.

**Апериодическая переходная функция** имеет место, когда корни характеристического уравнения исследуемого объекта являются вещественными отрицательными. Из (4.7) следует, что форма такой функции представляет собой сумму экспонент, количество которых равно порядку системы. Пример для системы второго порядка показан на рис. 4.2.

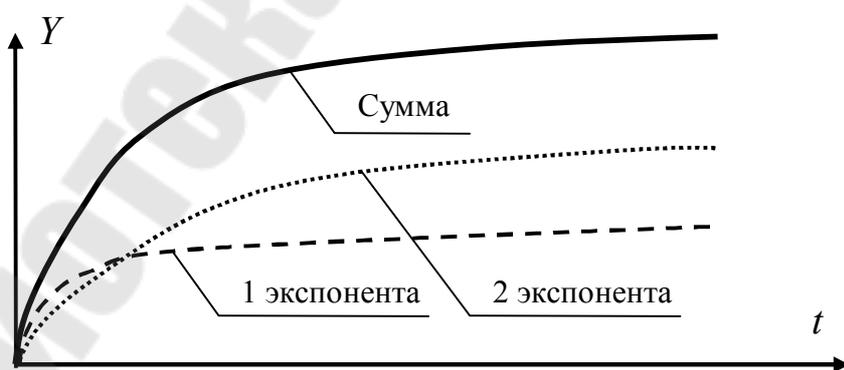


Рис. 4.2 Апериодическая переходная функция для системы второго порядка

**Периодическая переходная функция с аperiodической составляющей** имеет место, когда корни характеристического уравнения являются комплексными с отрицательной вещественной частью. Такая функция представляет собой затухающий колебательный процесс с огибающей в виде суммы экспонент, как показано на рис. 4.3.

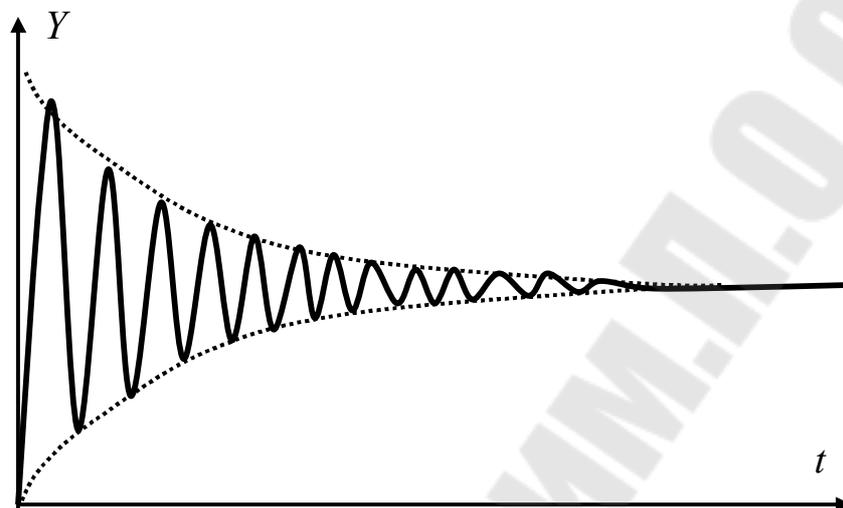


Рис. 4.3 Периодическая переходная функция с аperiodической составляющей

#### 4.2 Идентификация параметров объекта, имеющего аperiodическую переходную функцию

Аperiodические функции представляют собой сумму экспоненциальных составляющих:

$$Y(t) = \sum_{i=1}^w X_i \cdot \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau_i}} \right), \quad (4.8)$$

где:  $i$  - номер экспоненциальной составляющей;  $w$  - количество экспоненциальных составляющих;  $X_i$  - установившиеся значения экспоненциальных составляющих;  $\tau_i$  - постоянные времени экспоненциальных составляющих.

В результате идентификации должны быть определены параметры  $X_i$ ,  $\tau_i$  и  $w$ . Рассмотрим этапы идентификации.

##### Этап №1.

Принимают аппроксимирующую зависимость вида:

$$Y(t) \approx Y_{уст} - C_1 \cdot e^{\frac{-t}{\tau_1}}, \quad (4.9)$$

где:  $Y_{уст}$  - установившееся значение экспериментальной переходной функции;  $C_1, \tau_1$  - аппроксимирующие коэффициенты.

**Этап №2.**

По экспериментальным данным рассчитывают зависимость:

$$h_1(t) \approx Y_{уст} - Y(t) = C_1 \cdot e^{\frac{-t}{\tau_1}}. \quad (4.10)$$

**Этап №3.**

Логарифмируют полученную зависимость  $h_1(t)$ :

$$\begin{aligned} f_1(t) &= \ln|h_1(t)| \approx \ln\left(C_1 \cdot e^{\frac{-t}{\tau_1}}\right) = \ln C_1 + \ln\left(e^{\frac{-t}{\tau_1}}\right) = \\ &= \ln C_1 - \frac{t}{\tau_1} = a + \frac{t}{b}, \end{aligned} \quad (4.11)$$

где:  $a, b$  – параметры касательной.

**Этап №4.**

Строят график функции  $f_1(t)$  (рис. 4.4).

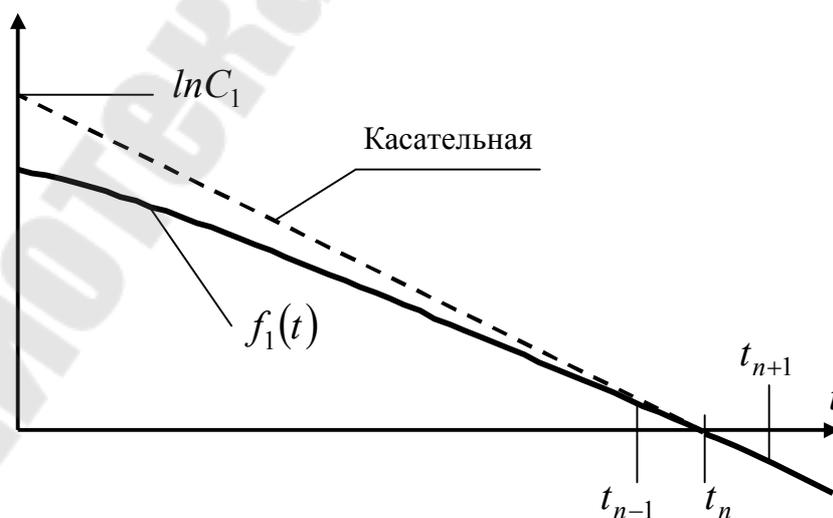


Рис. 4.4 Построение касательной к кривой  $h_1(t)$

Как следует из (4.11) в первом приближении график функции  $f_1(t)$  является прямой. Эта прямая должна быть построена как касательная в точке  $f_1(t_n) = 0$ .

Касательную наиболее удобно рассчитать аналитически, используя линейную интерполяцию. Так значение времени  $t_n$ , когда функция равна нулю можно рассчитать по формуле:

$$t_n = \frac{t_{n+1} \cdot f_1(t_{n-1}) + t_{n-1} \cdot |f_1(t_{n+1})|}{f_1(t_{n-1}) + |f_1(t_{n+1})|}, \quad (4.12)$$

где:  $t_{n+1}$  – значение расчётного времени, при котором наблюдается первое отрицательное значение функции  $f_1(t)$ ;  $t_{n-1}$  – значение расчётного времени, при котором наблюдается последнее положительное значение функции  $f_1(t)$ .

#### Этап №5.

Рассматривают систему уравнений:

$$\begin{cases} f_1(t_{n-1}) = a + \frac{t_{n-1}}{b}; \\ f_1(t_n) = 0 = a + \frac{t_n}{b}. \end{cases} \quad (4.13)$$

Откуда можно выразить параметр наклона касательной в точке перехода графика  $f_1(t)$  через ноль:

$$b = \frac{t_n - t_{n-1}}{f_1(t_{n-1})}. \quad (4.14)$$

Из выражения (4.11) следует, что:

$$\tau_1 = -b. \quad (4.15)$$

#### Этап №6.

Рассчитывают аппроксимирующий коэффициент  $C_1$  из условия  $t = 0$  и выражения (4.11):

$$\ln C_1 = \frac{t_n}{\tau_1}. \quad (4.16)$$

**Этап №7.**

Строят график аппроксимирующей функции (4.9) и сравнивают его с экспериментальным графиком. Если погрешность в каких-либо точках превышает допустимые значения, то идентификацию параметров необходимо продолжить. В противном случае процесс заканчивается.

**Этап №8.**

Принимают аппроксимирующую зависимость вида:

$$Y(t) \approx Y_{уст} - C_1 \cdot e^{\frac{-t}{\tau_1}} - C_2 \cdot e^{\frac{-t}{\tau_2}}. \quad (4.17)$$

**Этап №9.**

Используя полученные ранее значения, рассчитывают функцию:

$$h_2(t) = h_1(t) - C_1 \cdot e^{\frac{-t}{\tau_1}} \quad (4.18)$$

**Этап №10.**

Повторяют этапы 3-7, приняв для параметра  $C_2$  тот же знак, который имели значения  $h_2(t)$ . Для того, чтобы значения  $h_2(t)$  в каких-либо точках не были равны нулю, расчётные значения  $\tau_1$  и  $C_1$  необходимо округлять до точности около 0,1%.

Отметим, что приведенная методика не позволяет аппроксимировать с высокой точностью начальные участки экспериментальных зависимостей.

### **4.3 Идентификация параметров объекта, имеющего периодическую переходную функцию**

Большинство периодических переходных функций с достаточной точностью в аналитической форме могут быть записаны следующим образом:

$$Y(t) = Y_{уст} \cdot \left( 1 - e^{\frac{-t}{\tau}} \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t) \right), \quad (4.19)$$

где:  $Y_{уст}$  – установившееся значение;  $f$  – частота колебаний;  $\tau$  – постоянная времени затухания колебаний.

Величины  $Y_{уст}$ ,  $f$  и  $\tau$  являются аппроксимирующими параметрами, которые необходимо найти в процессе исследований. Это можно выполнить по трём точкам, как показано на рис. 4.5.

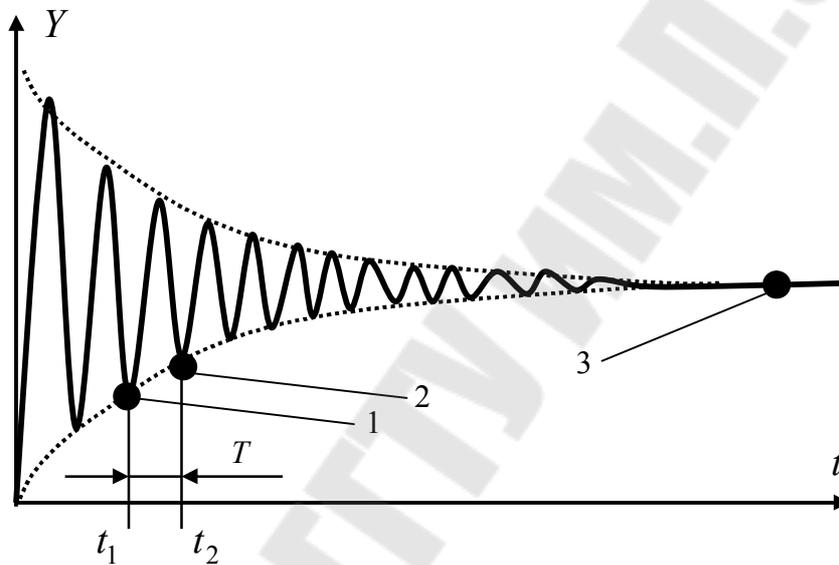


Рис. 4.5 Расположение контрольных точек на графике переходного процесса

Точки №1 и №2 нужно разместить на соседних пиковых (максимальных или минимальных) значениях переходного процесса. Очевидно, что интервал времени  $T$  между ними будет равен периоду колебаний. Тогда частота колебаний будет равна:

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{t_2 - t_1}. \quad (4.20)$$

Точка №3 должна быть расположена на участке установившегося значения переходной функции. Таким образом, будет определён требуемый аппроксимирующий параметр  $Y_{уст}$  в формуле (4.19).

Постоянную времени  $\tau$  можно рассчитать, записав выражение для огибающей графика на рис. 4.5, то есть для апериодической составляющей  $Y_{\text{апер}}(t)$ :

$$Y_{\text{апер}}(t) = Y_{\text{уст}} \cdot \left( 1 - e^{\frac{-t}{\tau}} \right). \quad (4.21)$$

Для точки  $t_1$  получим:

$$Y_{\text{апер}}(t_1) = Y(t_1) = Y_{\text{уст}} \cdot \left( 1 - e^{\frac{-t_1}{\tau}} \right). \quad (4.22)$$

Откуда выразим неизвестный параметр  $\tau$ :

$$\tau = \frac{t_1}{\ln\left(\frac{Y_{\text{уст}}}{Y_{\text{уст}} - Y(t_1)}\right)}. \quad (4.23)$$

## 5 МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ОБЪЕКТАХ ЭНЕРГЕТИКИ

Большинство объектов энергетики работают при значительных мощностях нагрузок. В результате этого протекающие в проводниках высокие токи, намагничивающиеся сердечники и приложенные к изоляции высокие напряжения приводят к потерям активной мощности, которые рассеиваются, в основном, в виде тепла. Таким образом, температура – это важнейший параметр, характеризующий условия и качество работы силового электроэнергетического оборудования, и расчёт тепловых процессов в объектах энергетики необходимо выполнять, как на стадии проектирования, так и на стадии эксплуатации систем электроснабжения.

Известно, что дифференциальные уравнения, описывающие тепловые процессы, подобны дифференциальным уравнениям, описывающим электрические процессы. Благодаря этому, расчёты тепловых процессов могут быть выполнены методами электротехники. Такой подход называют **методом термоэлектрических аналогий**. Данный метод будет описан и использован далее для задач математического моделирования нестационарных (переходных) тепловых процессов в устройствах систем электроснабжения.

### 5.1 Метод термоэлектрических аналогий

Рассмотрим простейшую систему: однородное тело – окружающая среда (рис. 5.1).

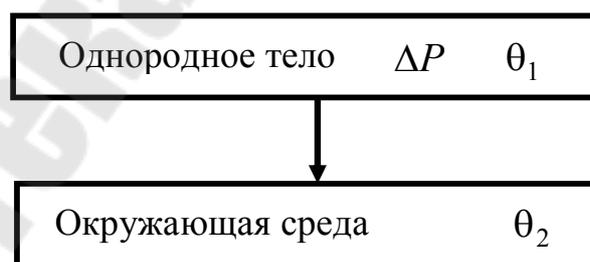


Рис. 5.1 Структурная схема тепловых процессов в простейшей системе

Под **однородным телом** в теплотехнике подразумевают некоторую часть исследуемого объекта, тепловые свойства которой можно считать одинаковыми по всему объёму.

Пусть в рассматриваемом случае однородное тело имеет потери активной мощности  $\Delta P(t)$  и температуру  $\theta_1(t)$ . Температура окружающей среды обозначена  $\theta_2(t)$ .

В соответствии с Первым законом термодинамики приращение тепловой энергии тела  $dQ$  из-за наличия потерь равно:

$$dQ = C_T \cdot d\theta_1(t) = dU + dA, \quad (5.1)$$

где:  $dU$  – внутренняя энергия;  $dA$  – внешняя работа;  $C_T$  – теплоёмкость.

По закону Джоуля-Ленца внутренняя энергия рассчитывается по формуле:

$$dU = \Delta P(t) \cdot dt. \quad (5.2)$$

Внешняя работа обусловлена теплообменом с окружающей средой и по закону теплопроводности Фурье равна:

$$dA = -\frac{\theta_1(t) - \theta_2(t)}{R_T} \cdot dt, \quad (5.3)$$

где:  $R_T$  – тепловое сопротивление.

Подставив (5.2) и (5.3) в (5.1), продифференцировав всё выражение по  $dt$ , получим **дифференциальное уравнение теплового равновесия**:

$$C_T \cdot \frac{d\theta_1(t)}{dt} + \frac{\theta_1(t) - \theta_2(t)}{R_T} = \Delta P. \quad (5.4)$$

При рассмотрении нескольких однородных тепловых тел получают систему дифференциальных уравнений. При этом количество уравнений будет равно количеству тепловых тел.

Если мысленно представить, что в уравнении (5.4) температуры – это напряжения, потери мощности – это ток, теплоёмкость – это ёмкость, а тепловое сопротивление – это электрическое сопротивление, то можно составить электрическую схему, процессы в которой

будут полностью соответствовать выражению (5.4). Такая схема изображена на рис. 5.2.

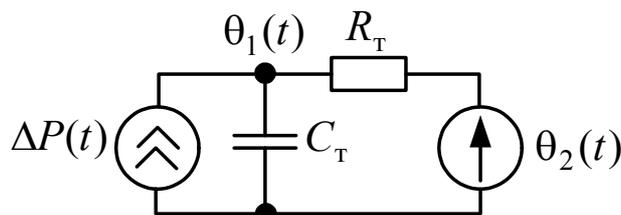


Рис. 5.2 Тепловая схема замещения для простейшей системы

Схема, представленная на рис. 5.2 – это **тепловая схема замещения**. В табл. 5.1 приведены названия и размерности соответствующих параметров электрических и тепловых схем (по строкам).

Таблица 5.1

Названия и размерности параметров

Электрическая схема		Тепловая схема	
Напряжение	В	Температура	°С
Ток	А	Потери мощности	Вт
Сопротивление	Ом	Тепловое сопротивление	°С/Вт
Ёмкость	Ф	Теплоёмкость	Вт · с / °С

Аналога индуктивности в тепловых схемах нет.

Используя схему на рис. 5.2 и более сложные схемы, методами электротехники можно рассчитывать нестационарные тепловые процессы как переходные электрические процессы, используя такие удобные методы как операторное преобразование Лапласа и метод наложения.

## 5.2 Математическое моделирование тепловых процессов в силовых кабелях

Поставим задачу разработать упрощённую математическую модель тепловых процессов одножильного силового кабеля, конструктивно состоящего из токоведущей жилы, основной изоляции жилы, защитной оболочки

Рассмотрим два вида окружающей среды: внутреннюю и внешнюю. Пусть температура внутренней окружающей среды зависит от нагрева кабеля, а температура внешней окружающей среды – не зависит.

Представим внутреннюю окружающую среду как полый цилиндр с внешним диаметром  $d_4$ . Внутренняя граница этого цилиндра совпадает с поверхностью кабеля, а внешняя граница соответствует началу области внешней окружающей среды.

Внешнюю окружающую среду рассмотрим как полый цилиндр с бесконечно большим внешним диаметром. На рис. 5.3 показана конструкция одножильного кабеля как системы тепловых однородных тел (а) и структурная схема тепловых процессов в такой системе (б).

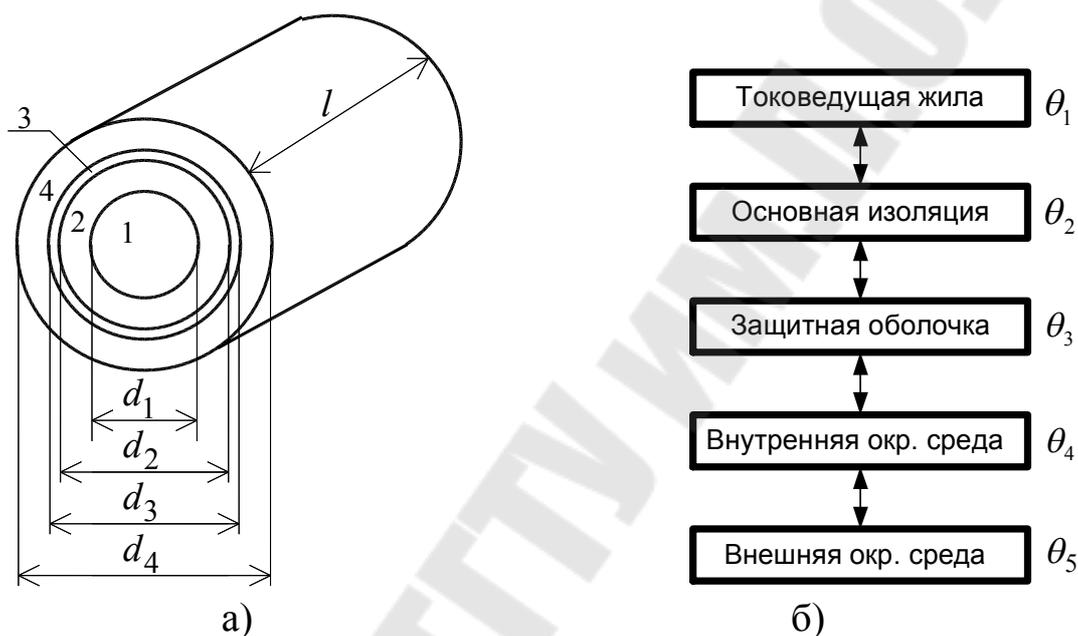


Рис. 5.3. Представление одножильного кабеля как системы тепловых однородных тел:  
 а – конструкция кабеля; б - структурная схема тепловых процессов  
 1 – токоведущая жила; 2 – основная изоляция; 3 – защитная оболочка; 4 – внутренняя окружающая среда; 5 – внешняя окружающая среда

Каждому однородному телу соответствует значение температуры  $\theta_i$  на его внутренней границе, где  $i$  - номер тела. При этом температуру внешней окружающей среды  $\theta_5$  будем считать заранее заданной, полученной в результате измерений. Тогда дифференциальные уравнения теплового равновесия, описывающие тепловые процессы в рассматриваемой системе, запишутся в виде:

$$\left\{ \begin{array}{l} C_1 \cdot \frac{d\theta_1}{dt} + \frac{\theta_1 - \theta_2}{R_1} = \Delta P; \\ C_2 \cdot \frac{d\theta_2}{dt} + \frac{\theta_2 - \theta_1}{R_1} + \frac{\theta_2 - \theta_3}{R_2} = 0; \\ C_3 \cdot \frac{d\theta_3}{dt} + \frac{\theta_3 - \theta_2}{R_2} + \frac{\theta_3 - \theta_4}{R_3} = 0; \\ C_4 \cdot \frac{d\theta_4}{dt} + \frac{\theta_4 - \theta_3}{R_3} + \frac{\theta_4 - \theta_5}{R_4} = 0, \end{array} \right. \quad (5.5)$$

где:  $\theta_1 \dots \theta_5$  - соответственно, температуры однородных тел: токоведущей жилы, основной изоляции, защитной оболочки, внутренней и внешней окружающих сред ( $^{\circ}\text{C}$ );  $C_1 \dots C_4$  - теплоёмкости соответствующих однородных тел ( $\frac{\text{Вт} \cdot \text{с}}{^{\circ}\text{C}}$ );  $R_1 \dots R_4$  - тепловые сопротивления

соответствующих однородных тел ( $\frac{^{\circ}\text{C}}{\text{Вт}}$ );  $\Delta P$  - потери активной мощности в токоведущей жиле (Вт).

На основе системы (5.5) в соответствии с методикой, описанной в п. 5.1., может быть синтезирована тепловая схема замещения кабеля (рис. 5.4).

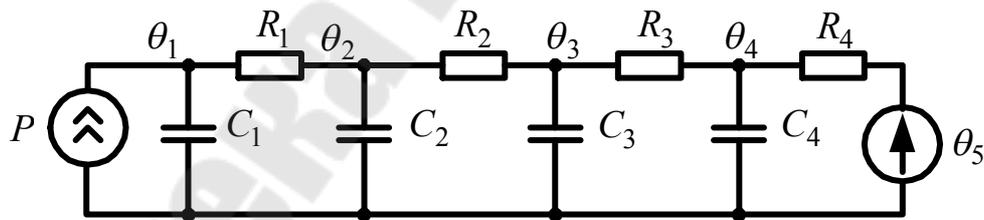


Рис. 5.4. Тепловая схема замещения одножильного силового кабеля с учётом параметров окружающей среды

Воспользовавшись операторным преобразованием Лапласа и методом наложения, после необходимых преобразований получим соотношения для температуры изоляции жилы:

$$\theta_2(p) = \frac{(b_2 p^2 + b_1 p + b_0) \cdot P(p) + (g_1 p + 1) \cdot \theta_5(p)}{a_4 p^4 + a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + 1}, \quad (5.6)$$

где:

$$\left\{ \begin{array}{l}
 b_2 = R_2 R_3 R_4 C_3 C_4; \\
 b_1 = R_4 C_4 (R_2 + R_3) + R_2 C_3 (R_3 + R_4) \\
 b_0 = R_2 + R_3 + R_4; \\
 g_1 = R_1 C_1; \\
 a_4 = R_1 R_2 R_3 R_4 C_1 C_2 C_3 C_4; \\
 a_3 = R_3 R_4 (R_1 + R_2) C_1 C_3 C_4 + R_1 R_4 (R_2 + R_3) C_1 C_2 C_4 + \\
 + R_1 R_2 (R_3 + R_4) C_1 C_2 C_3 + R_2 R_3 R_4 C_2 C_3 C_4; \\
 a_2 = R_4 (R_1 + R_2 + R_3) C_1 C_4 + (R_3 + R_4) (R_1 + R_2) C_1 C_3 + \\
 + R_1 (R_2 + R_3 + R_4) C_1 C_2 + R_4 (R_2 + R_3) C_2 C_4 + \\
 + R_2 (R_3 + R_4) C_2 C_3 + R_3 R_4 C_3 C_4; \\
 a_1 = (R_1 + R_2 + R_3 + R_4) C_1 + (R_2 + R_3 + R_4) C_2 + \\
 + (R_3 + R_4) C_3 + R_4 C_4.
 \end{array} \right. \quad (5.7)$$

Тепловые сопротивления цилиндрических однородных тел  $R_1 \dots R_3$  рассчитываются по формулам:

$$\left\{ \begin{array}{l}
 R_1 = \frac{1}{2 \cdot \gamma_1 \cdot \pi \cdot l}; \\
 R_2 = \frac{\ln\left(\frac{d_2}{d_1}\right)}{2 \cdot \gamma_2 \cdot \pi \cdot l}; \\
 R_3 = \frac{\ln\left(\frac{d_3}{d_2}\right)}{2 \cdot \gamma_3 \cdot \pi \cdot l},
 \end{array} \right. \quad (5.8)$$

где:  $d_1 \dots d_3$  - диаметры соответствующих однородных тел (см. рис. 5.3, а), м;  $\gamma_1 \dots \gamma_3$  - удельные теплопроводности материалов однородных тел,  $\left(\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{°C}}\right)$ ;  $l$  - длина кабеля, м.

Теплоёмкости однородных тел  $C_1 \dots C_3$  можно найти по формулам:

$$\begin{cases} C_1 = c_1 \cdot G_1 = c_1 \cdot \beta_1 \cdot \frac{\pi \cdot d_1^2}{4} \cdot l; \\ C_2 = c_2 \cdot G_2 = c_2 \cdot \beta_2 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (d_2^2 - d_1^2) \cdot l; \\ C_3 = c_3 \cdot G_3 = c_3 \cdot \beta_3 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (d_3^2 - d_2^2) \cdot l, \end{cases} \quad (5.9)$$

где:  $c_1 \dots c_3$  - удельные теплоёмкости материалов соответствующих однородных тел,  $\left(\frac{\text{с} \cdot \text{Вт}}{\text{°С} \cdot \text{кг}}\right)$ ;  $G_1 \dots G_3$  - массы соответствующих однородных тел (рассчитываются как произведение плотности на объем), кг;  $\beta_1 \dots \beta_3$  - плотности материалов соответствующих однородных тел,  $\left(\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}\right)$ .

Рассмотрим расчёт тепловых параметров внутренней окружающей среды  $R_4$  и  $C_4$ .

Воспользуемся упрощённой формулой расчёта теплового сопротивления окружающей среды:

$$R_4 = \frac{0,1}{\pi \cdot l \cdot d_4}, \quad (5.10)$$

Так как внутренняя окружающая среда представлена в виде полого цилиндра, то для расчёта можно воспользоваться вторым или третьим уравнением системы (5.8):

$$R_4 = \frac{\ln\left(\frac{d_5}{d_4}\right)}{2 \cdot \gamma_4 \cdot \pi \cdot l}, \quad (5.11)$$

где:  $\gamma_4$  - удельная теплопроводность воздуха, или среды, в которой проложен кабель.

Приравняв соотношения (5.10) и (5.11), после преобразований получим выражение для расчёта внешнего диаметра цилиндра внутренней окружающей среды:

$$d_5 = d_4 \cdot \exp\left(\frac{0,2 \cdot \gamma_4}{d_4}\right). \quad (5.12)$$

Таким образом, для расчёта теплового сопротивления  $R_4$  необходимо воспользоваться вначале соотношением (5.12), а затем соотношением (5.11).

Теплоёмкость внутренней окружающей среды  $C_4$  можно рассчитать по аналогии с (5.9):

$$C_4 = c_4 \cdot G_4 = c_4 \cdot \beta_4 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (d_5^2 - d_4^2) \cdot l, \quad (5.13)$$

где:  $G_4$ ,  $c_4$ ,  $\beta_4$  - соответственно, масса, удельная теплоёмкость и плотность внутренней окружающей среды.

Разработаем алгоритм расчёта температуры изоляции жилы кабеля. Для этого разобьём реальные графики величин – активных потерь в жиле и температуры внешней охлаждающей среды – на равные интервалы времени с периодом дискретизации  $\Delta t$ , и будем считать эти величины постоянными в течение каждого из интервалов, как показано на рис. 3 на примере потерь.

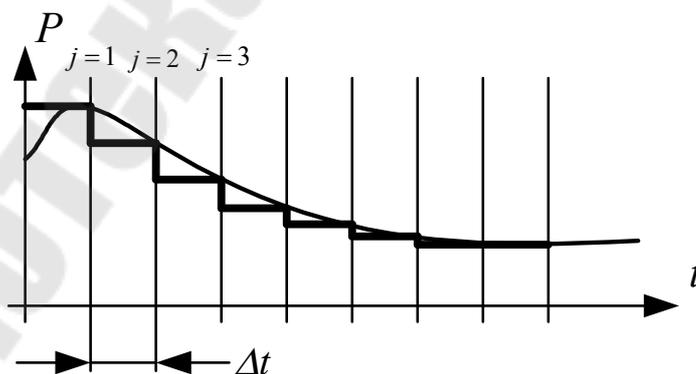


Рис. 5.5 Преобразование исходного графика активных потерь в жиле кабеля в ступенчатый график

Тогда на каждом  $j$  - ом интервале расчёта в соответствии с правилами операторного преобразования Лапласа можно записать:

$$P_j(p) = \frac{\Delta P_j}{p}; \quad (5.14)$$

$$\theta_{5,j}(p) = \frac{\theta_{5,j}}{p}. \quad (5.15)$$

Пусть  $p_1, p_2, p_3, p_4$  - корни характеристического уравнения в выражении (5.6). Тогда, с учётом (5.14) и (5.15), выражение (5.6) преобразуется к виду:

$$\begin{aligned} \theta_{2,j}(p) &= \frac{(b_2 p^2 + b_1 p + b_0) \cdot \frac{\Delta P_j}{p} + (g_1 p + 1) \cdot \frac{\theta_{5,j}}{p}}{a_4 \cdot (p - p_1) \cdot (p - p_2) \cdot (p - p_3) \cdot (p - p_4)} = \\ &= \frac{\Delta P_j}{p} \cdot \sum_{i=1}^4 \left( \frac{w_i}{1 + p \cdot \tau_i} \right) + \frac{\theta_{5,j}}{p} \cdot \sum_{i=1}^4 \left( \frac{z_i}{1 + p \cdot \tau_i} \right), \end{aligned} \quad (5.16)$$

где:  $w_i, z_i, \tau_i = -\frac{1}{p_i}$  - коэффициенты, получаемые при разложении выражения для  $\theta_2(p)$  на простые дроби (частичные доли).

Из (5.16) следует, что исходная передаточная функция  $\theta_2(p)$  может быть представлена в виде суммы передаточных функций апериодических звеньев первого порядка, как показано на рис. 5.6.

Учитывая, что при скачкообразном изменении входной величины переходный процесс  $i$ -го апериодического звена представляет собой экспоненту с постоянной времени  $\tau_i$ , для каждой экспоненциальной составляющей  $\vartheta_{i,j}$  или  $\eta_{i,j}$  (см. рис. 5.6) температуры  $\theta_{2,j}$  во временной области можно записать:

$$\vartheta_{i,j} = \left( \vartheta_{уст} \right)_{i,j} + \left( \vartheta_{i,j-1} + \left( \vartheta_{уст} \right)_{i,j} \right) \cdot e^{\frac{-\Delta t}{\tau_i}}, \quad (5.17)$$

где:  $\left( \vartheta_{уст} \right)_{i,j}$  - установившееся значение составляющей  $\vartheta_{i,j}$  на  $j$ -ом интервале.

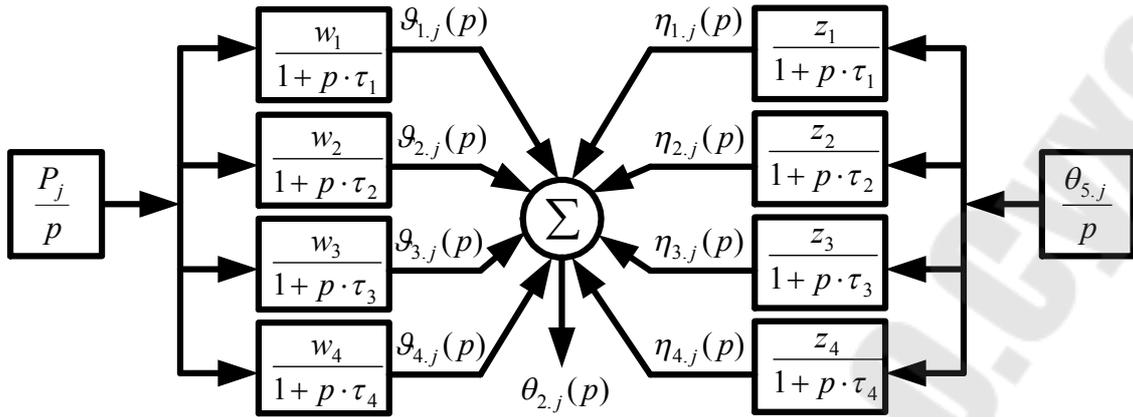


Рис. 5.6 Структурная схема для расчёта температуры изоляции жилы кабеля

Величины  $(\vartheta_{уст})_{i,j}$  можно найти, используя правила обратного преобразования Лапласа.

С учётом (5.17), алгоритм для расчёта температуры изоляции жилы силового кабеля  $\theta_{2,j}$  можно записать следующим образом:

$$\left\{ \begin{array}{l}
 w_i = \frac{-(b_2 \cdot (p_i)^2 + b_1 \cdot p_i + b_0)}{5 \cdot a_4 \cdot (p_i)^4 + 4 \cdot a_3 \cdot (p_i)^3 + 3 \cdot a_2 \cdot (p_i)^2 + 2 \cdot a_1 \cdot p_i + a_0}; \\
 z_i = \frac{-(g_1 \cdot p_i + 1)}{5 \cdot a_4 \cdot (p_i)^4 + 4 \cdot a_3 \cdot (p_i)^3 + 3 \cdot a_2 \cdot (p_i)^2 + 2 \cdot a_1 \cdot p_i + a_0}; \\
 \tau_i = -\frac{1}{p_i}; \\
 \Delta P_j = I_j^2 \cdot \rho_{20} \cdot (1 + \alpha \cdot (\theta_{2,j-1} - 20)) \cdot \frac{4 \cdot l}{\pi \cdot d_1^2}; \\
 \vartheta_{i,j} = w_i \cdot \Delta P_j + (\vartheta_{i,j-1} - w_i \cdot \Delta P_j) \cdot e^{-\frac{\Delta t}{\tau_i}}; \\
 \eta_{i,j} = z_i \cdot \theta_{5,j} + (\eta_{i,j-1} - z_i \cdot \theta_{5,j}) \cdot e^{-\frac{\Delta t}{\tau_i}}; \\
 \theta_{2,j} = \sum_{i=1}^4 (\vartheta_{i,j} + \eta_{i,j})
 \end{array} \right. \quad (5.18)$$

где:  $i \in \{1;2;3;4\}$  - номер экспоненциальной составляющей теплового процесса;  $j$  - номер отсчёта;  $p_i$  - корни характеристического уравнения выражения (5.6);  $\tau_i$  - постоянные времени экспоненциальных составляющих;  $w_i$  и  $z_i$  - коэффициенты, рассчитываемые в соответствии с правилами обратного преобразования Лапласа;  $\vartheta_{i,j}$  и  $\eta_{i,j}$  - соответственно, составляющие температуры изоляции жилы от активных потерь в жиле и от температуры внешней охлаждающей среды по каждой экспоненциальной составляющей;  $\Delta t$  - интервал времени между  $j$  - м и  $j + 1$  отсчётами (период дискретизации).

Пятое уравнение алгоритма (5.18) учитывает зависимость электрического сопротивления жилы кабеля от её температуры.

Вместо алгоритма (5.18) все расчёты можно сделать методом Рунге-Кутты, так как система (5.5) может быть записана в форме Коши. Однако данный метод требует значительных вычислительных ресурсов, и это затрудняет его использование для расчётов в режиме реального времени.

Алгоритм (5.18) позволяет вести расчёт температур с помощью микропроцессорных устройств в режиме реального времени.

Математическое моделирование тепловых процессов в трёх-жильных силовых кабелях проводится в соответствии с описанной методикой, только при этом количество однородных тел возрастёт.

### **5.3 Математическое моделирование тепловых процессов в силовых трансформаторах**

Силовой трансформатор в отличие от кабеля является очень сложным устройством, состоящим из тысяч различных элементов и деталей. Поэтому для расчёта тепловых процессов необходимо принять ряд серьёзных допущений.

В нормативных документах и научной литературе силовой масляный трансформатор рассматривают как систему из трёх основных однородных тел: магнитопровода, обмотки и масла. Тогда структурная схема тепловых процессов трансформатора будет выглядеть, как показано на рис. 5.7.

Из структурной схемы видно, что теплообмен между магнитопроводом и обмотками отсутствует. Это обусловлено наличием между ними изоляционных цилиндров из плотного картона.

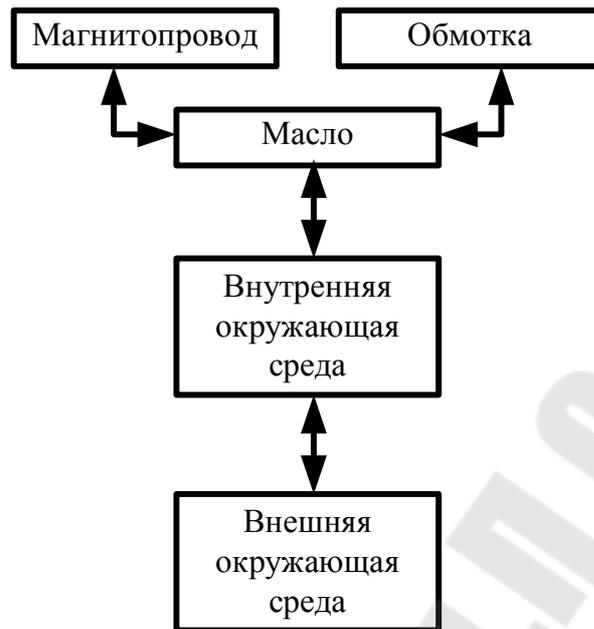


Рис. 5.7. Структурная схема тепловых процессов силового масляного трансформатора

Система уравнений, описывающая рассматриваемые процессы, запишется следующим образом:

$$\left\{ \begin{array}{l} C_1 \cdot \frac{d\theta_1}{dt} + \frac{\theta_1 - \theta_3}{R_1} = \Delta P_{xx}; \\ C_2 \cdot \frac{d\theta_2}{dt} + \frac{\theta_2 - \theta_3}{R_2} = \Delta P_H; \\ C_3 \cdot \frac{d\theta_3}{dt} + \frac{\theta_3 - \theta_1}{R_1} + \frac{\theta_3 - \theta_2}{R_2} + \frac{\theta_3 - \theta_4}{R_3} = 0; \\ C_4 \cdot \frac{d\theta_4}{dt} + \frac{\theta_4 - \theta_3}{R_3} + \frac{\theta_4 - \theta_5}{R_4} = 0, \end{array} \right. \quad (5.19)$$

где:  $C_1 \dots C_4$  - соответственно, теплоёмкости магнитопровода, обмотки, масла и внутренней окружающей среды;  $R_1 \dots R_4$  - соответственно, тепловые сопротивления магнитопровода, обмотки, масла и внутренней окружающей среды;  $\theta_1 \dots \theta_5$  - соответственно, температуры магнитопровода, обмотки, масла, внутренней окружающей среды и внешней окружающей среды;  $\Delta P_{xx}$  - активная мощность потерь холо-

стого хода трансформатора;  $\Delta P_{\text{H}}$  - активная мощность нагрузочных потерь трансформатора.

На основе системы (5.19) можно синтезировать тепловую схему замещения силового трансформатора (рис. 5.8).

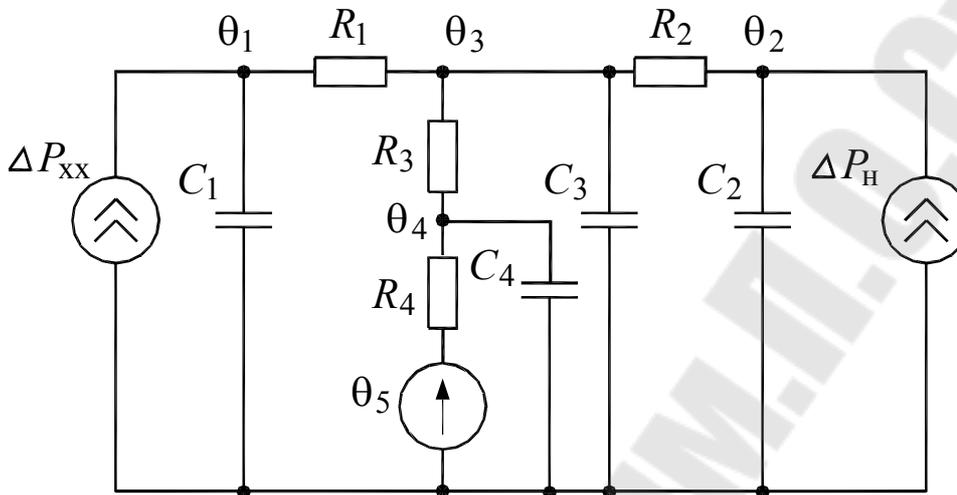


Рис. 5.8 Тепловая схема замещения силового масляного трансформатора

Воспользовавшись операторным методом, а также, учитывая, что  $\Delta P_{\text{xx}} \approx \text{const}$ , получим выражения для температуры наиболее нагретой точки обмотки трансформатора:

$$\begin{aligned} \theta_2(p) = & \Delta P_{\text{xx}} \cdot (R_3 + R_4) + \\ & + \frac{(b_{2.3} \cdot p^3 + b_{2.2} \cdot p^2 + b_{2.1} \cdot p + b_{2.0}) \cdot \Delta P_{\text{H}}(p)}{a_4 \cdot p^4 + a_3 \cdot p^3 + a_2 \cdot p^2 + a_1 \cdot p + 1} + \\ & + \frac{(d_{2.1} \cdot p + 1) \cdot \theta_5(p)}{a_4 \cdot p^4 + a_3 \cdot p^3 + a_2 \cdot p^2 + a_1 \cdot p + 1}, \end{aligned} \quad (5.20)$$

где:

$$\left\{ \begin{array}{l} a_4 = R_1 R_2 R_3 R_4 C_1 C_2 C_3 C_4; \\ a_3 = R_1 R_2 R_4 C_1 C_2 C_4 + R_2 R_3 R_4 C_1 C_2 C_4 + R_2 R_3 R_4 C_2 C_3 C_4 + \\ + R_1 R_2 (R_3 + R_4) C_1 C_2 C_3 + R_1 R_3 R_4 C_1 C_2 C_4 + R_1 R_3 R_4 C_1 C_3 C_4; \\ a_2 = R_2 R_4 C_2 C_4 + R_1 R_2 C_1 C_2 + R_2 (R_3 + R_4) C_1 C_2 + \\ + R_2 (R_3 + R_4) C_2 C_3 + R_1 (R_3 + R_4) C_1 C_2 + R_3 R_4 C_2 C_4 + \\ + R_1 R_4 C_1 C_4 + R_3 R_4 C_1 C_4 + R_3 R_4 C_3 C_4 + R_1 (R_3 + R_4) C_1 C_3; \\ a_1 = R_2 C_2 + (R_3 + R_4) C_2 + R_4 C_4 + (R_3 + R_4) C_1 + \\ + (R_3 + R_4) C_3 + R_1 C_1; \end{array} \right. \quad (5.21)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} b_{2,3} = R_1 R_2 R_3 R_4 C_1 C_3 C_4; \\ b_{2,2} = R_1 R_2 R_4 C_1 C_4 + R_2 R_3 R_4 C_1 C_4 + R_2 R_3 R_4 C_3 C_4 + \\ + R_1 R_2 (R_3 + R_4) C_1 C_3 + R_1 R_3 R_4 C_1 C_4; \\ b_{2,1} = R_2 R_4 C_4 + R_1 R_2 C_1 + R_2 (R_3 + R_4) C_1 + R_2 (R_3 + R_4) C_3 + \\ + R_1 (R_3 + R_4) C_1 + R_3 R_4 C_4; \\ b_{2,0} = R_2 + R_3 + R_4; \\ d_{2,1} = R_1 C_1. \end{array} \right. \quad (5.22)$$

Тепловые сопротивления магнитопровода, обмотки и масла трансформатора можно рассчитать по формулам:

$$\left\{ \begin{array}{l} R_1 = \frac{\vartheta_{\text{с.м}}}{\Delta P_{\text{XX}}}; \\ R_2 = \frac{\vartheta_{\text{ННТ.М.НОМ}}}{\Delta P_{\text{К.НОМ}}}; \\ R_3 + R_4 = \frac{\vartheta_{\text{М.НОМ}}}{\Delta P_{\text{XX}} + \Delta P_{\text{К.НОМ}}}, \end{array} \right. \quad (5.23)$$

где:  $\vartheta_{\text{с.м}}$ ,  $\vartheta_{\text{ННТ.М.НОМ}}$ ,  $\vartheta_{\text{М.НОМ}}$  – номинальные значения превышений температур, соответственно, магнитопровода, обмотки и масла над температурой окружающей среды;  $\Delta P_{\text{XX}}$ ,  $\Delta P_{\text{К.НОМ}}$  – номинальные значе-

ния активной мощности потерь, соответственно, холостого хода и короткого замыкания трансформатора.

Значения величин  $\Delta P_{xx}$  и  $\Delta P_{к.ном}$  являются справочными (или паспортными) данными трансформатора. Значения  $\vartheta_{нт.м.ном}$  и  $\vartheta_{м.ном}$  нормируются ГОСТ 14209-85, и их можно найти из табл. 5.2. Значение  $\vartheta_{с.м}$  в литературе рекомендуется принимать равным 25 °С.

Таблица 5.2

Значения величин $\vartheta_{нт.м.ном}$ и $\vartheta_{м.ном}$		
Система охлаждения	Превышения температур	
	$\vartheta_{м.ном}, ^\circ\text{C}$	$\vartheta_{нт.м.ном}, ^\circ\text{C}$
М и Д	60 или 55	23
ДЦ и Ц	40	23

В третьем уравнении системы (5.23) записана сумма тепловых сопротивлений  $R_3 + R_4$ , т.к. величина  $\vartheta_{м.ном}$  нормируется в ГОСТ относительно температуры внешней окружающей среды, те есть уже учитывает тепловое сопротивление этой среды.

Теплоёмкости магнитопровода, обмотки и масла трансформатора можно рассчитать по формулам:

$$\begin{cases} C_1 = c_{уд.ст} \cdot G_{ст}; \\ C_2 = c_{уд.Аl(Cu)} \cdot G_{Аl(Cu)}; \\ C_3 = c_{уд.м} \cdot G_{м}, \end{cases} \quad (1.16)$$

Где:  $c_{уд.ст}$ ,  $c_{уд.Аl(Cu)}$ ,  $c_{уд.м}$  - удельные теплоёмкости, соответственно, стали, алюминия (или меди) и масла в трансформаторе;  $G_{ст}$ ,  $G_{Аl(Cu)}$ ,  $G_{м}$  - массы, соответственно, стали, алюминия (или меди), и масла в трансформаторе.

Значения  $G_{ст}$ ,  $G_{Аl(Cu)}$ ,  $G_{м}$  являются справочными (или паспортными) данными для каждого трансформатора. Удельные теплоёмкости – также справочные данные.

Алгоритмы расчёта температур силового трансформатора во временной области строятся аналогично алгоритмам, представленным в п. 5.2.

**МОДУЛЬ 2**  
**ИННОВАЦИОННАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ В РЕСПУБЛИКЕ**  
**БЕЛАРУСЬ ПО ВОПРОСАМ ЭНЕРГЕТИКИ**

## 6 ИННОВАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ

**Инновация в энергетике** – это введённое в эксплуатацию новое или значительно улучшенное устройство или мероприятие, созданное и разработанное путём предварительно проведенных научных исследований. После внедрения инновации эффективность соответствующих участков системы электроснабжения должна возрасти. В противном случае внедрение нельзя признать инновационным.

Под повышением эффективности в энергетике понимают:

- повышение надёжности систем электроснабжения;
- снижение электропотребления, как элементами системы электроснабжения, так и потребителями электроэнергии;
- снижение потерь в системах электроснабжения;
- повышение качества электроэнергии;
- повышение уровня безопасности в электроустановках.

По степени новизны инновации бывают радикальными, оптимизирующими и модифицирующими.

**Радикальная инновация** – внедрение принципиально нового оборудования по сравнению с ранее установленным оборудованием и обладающего значительными преимуществами.

В качестве примера радикальных инноваций в энергетике можно привести технологию «Цифровая подстанция», когда электромеханическое и аналоговое электронное оборудование для задач измерений, защиты и автоматики подстанций заменяется микропроцессорными приборами, объединёнными в информационную сеть. При этом на цифровой подстанции имеется диспетчерский пункт, куда с помощью цифровых контроллеров и волоконно-оптических линий связи поступает вся информация от электронного оборудования – результаты измерений электрических и неэлектрических величин, текущее состояние оборудования, информация об аварийных режимах и других событиях.

Ещё один характерный пример радикальной инновации – замена открытых распределительных устройств напряжением 110 кВ устройствами КРУЭ, то есть комплектными распределительными устройствами, выполненными в едином герметичном корпусе, заполненном элегазом. Такая конструкция делает распределительные устройства более компактными и более надёжными.

Также к радикальным инновациям относится технология «*Smart Grid*» – разумная сеть. Эта технология предполагает автоматическое

взаимодействие между отдельными частями системы электроснабжения с помощью цифровой информационной сети таким образом, что будет повышена надёжность этой системы и снизятся потери в электрических сетях.

**Оптимизирующая инновация** – внедрение нового оборудования, которое частично заменят более старое оборудование, и позволяет достичь преимуществ от этой замены.

Как правило, все мероприятия по частичной реконструкции систем электроснабжения являются оптимизирующими инновациями.

К оптимизирующим инновациям можно отнести: установку микропроцессорных терминалов релейной защиты в высоковольтных шкафах распределительных устройств вместо электромеханических реле; замену силовых или измерительных трансформаторов более современными; замену масляных высоковольтных выключателей вакуумными или элегазовыми выключателями; переход от неизолированных к изолированным проводам воздушных линий электропередачи; замену силовых кабелей с бумажной изоляцией на кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена и многое другое.

В низковольтных электрических сетях в последние годы внедряется оптимизирующая инновация в виде технологии «*Smart Plug*» – разумная розетка. Данная технология предполагает измерение электропотребления и реализацию защиты каждого электроприёмника с помощью стандартной бытовой информационной сети, например, *Wi-Fi*. При этом микропроцессорные устройства встраивают непосредственно в розетки или вилки, использующиеся для подключения электроприёмников к электрической сети.

К оптимизирующим инновациям относятся также различные мероприятия по энергосбережению. Так, например, на предприятии технологический процесс может быть изменён таким образом, что в результате общее электропотребление или потери в электрических сетях будут снижены. Или же существующие источники света могут быть заменены более энергосберегающими светодиодными.

**Модифицирующая инновация** – это корректировка существующих конструкций или мероприятий с целью повышения энергоэффективности.

Модифицирующие инновации отличаются тем, что имеют ограниченную область применения, затрагивающую небольшую часть системы электроснабжения. Например: замена классического автоматического выключателя в низковольтном распределительном щитке

на дифференциальный выключатель; замена двухконтактных розеток на трёхконтактные с заземлённым контактом; установка дополнительных сигнальных элементов; размещение поясняющих надписей и схем в электроустановке и тому подобное.

**Инновационный процесс** – это процесс последовательного перехода от научной идеи к внедрению законченного устройства или мероприятия, готовых к внедрению в системе электроснабжения.

Инновационный процесс включает следующие основные этапы: научная идея, фундаментальные научные исследования, прикладные научные исследования, опытно-конструкторские работы, производство продукта, внедрение продукта.

**Инновационная деятельность** – более широкое понятие, чем инновационный процесс. Она включает сам инновационный процесс и систему организационных, производственных и коммерческих мероприятий, направленных на создание или усовершенствование продукта, технологического процесса, получение прибыли. Так, например, одной из основных составляющих инновационной деятельности является привлечение инвестиций.

**Инновационный потенциал** – совокупность ресурсов различных видов, включающая в себя материальные, финансовые, интеллектуальные, научно-технические и иные ресурсы, необходимые для осуществления инновационной деятельности.

**Инновационный проект** – комплекс работ по созданию и реализации инноваций.

**Инновационная инфраструктура** – совокупность субъектов, осуществляющих материально-техническое, финансовое, организационно-методическое, информационное, консультационное и иное обеспечение инновационной деятельности.

## 7 ИННОВАЦИОННАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ

Инновационную деятельность в Республике Беларусь должны поддерживать: республиканские органы государственного управления, Национальная академия наук Беларуси, органы местного управления и самоуправления областного территориального уровня, учреждения образования, а также все юридические и физические лица, деятельность которых связана с инновациями.

Поддержка инновационной деятельности в Республике Беларусь осуществляется: центрами поддержки предпринимательства; государственными программами научных исследований (ГПНИ); государственными научно-техническими программами (ГНТП); маркетинговыми центрами; конкурсами инновационных проектов.

Инновационная инфраструктура Республики Беларусь включает: Республиканский Центр трансфера технологий; свободные экономические зоны (СЭЗ), технопарки, Белорусский инновационный фонд.

Например, в СЭЗ «Гомель Ратон» осуществляется выпуск инновационной продукции для нужд энергетики: высоковольтные и низковольтные распределительные устройства.

Для поддержки инновационной деятельности в сфере энергетики правительством Республики Беларусь утвержден перечень приоритетных направлений научно-технической деятельности на 2016-2020 годы. В этом перечне под №1 находится программа «Энергетика и энергоэффективность, атомная энергетика», включающая подпрограммы:

- энергобезопасность и энергосбережение;
- энергоэффективные технологии и техника;
- атомная энергетика;
- возобновляемые источники энергии, местные и вторичные энергоресурсы.

Для правильной организации инновационной деятельности необходимо создать инновационный проект.

Участниками инновационного проекта являются: заказчик, инвестор, проектировщик, поставщик, руководитель проекта, команда проекта.

**Заказчик** – будущий владелец и пользователь результатов проекта (юридические, физические лица).

**Инвестор** – юридические, физические лица, которые вкладывают деньги (заказчик и инвестор могут совпадать).

**Проектировщик** – разработчик проекта.

**Поставщик** – организация, которая обеспечивает материально-техническое снабжение.

**Руководитель проекта** – юридическое лицо, которому заказчик делегирует полномочия по руководству работ по проекту.

**Команда проекта** - создаётся на период работ над проектом.

Инновационный проект в области энергетики должен иметь следующие разделы:

- **тема проекта**, отражающая суть предлагаемых технологий;
- **аннотация проекта**, являющаяся кратким описанием продукции;
- **области применения**, характеризующие конкретные участки системы электроснабжения, где должна быть внедрена инновационная разработка;
- **технология получения продукции**, где описываются основные подходы к реализации разработки и без детализации при необходимости скрыть незапатентованную информацию;
- **бизнес-план проекта**, содержащий технико-экономическое обоснование внедрения проекта.

Бизнес-план инновационного проекта, как правило, имеет следующие разделы:

- описание продукции (особенности продукции по сравнению с существующими на рынке аналогами; лицензия, сертификация продукции; технология производства продукции; потребность в сырье и материалах для производства продукции и т.п.);
- анализ отрасли и рынка, маркетинг (перечень основной продукции и услуг, предлагаемых данной отраслью; общий объём продаж по отрасли и тенденции изменения рынка; специфические особенности рынка; описание сегмента рынка, на котором предполагается выполнение проекта; планы относительно зарубежных рынков, экспортный потенциал и т.п.);
- права на интеллектуальную собственность (лицензионное соглашение, патент, заявка на патент, ноу-хау; юридические взаимоотношения между владельцем интеллектуальной собственности и производителем);
- основные потребители и характеристика сбытовой политики (методы продвижения и каналы сбыта продукции);

- ценообразование (оценка конкурентоспособности продукции по цене; себестоимость продукции и ее составляющие; тенденции ценообразования; планируемые объемы сбыта и т.п.);
- конкуренты (тактика и стратегия, продукция, цены, местонахождение конкурентов);
- поставщики (описание организаций-поставщиков; перечень необходимых материалов, цена и т.п.);
- производственный план (основные этапы производства);
- организационный план (кадровая структура организации выполнения работ, график выполнения работ, график осуществления инвестиций, формы финансирования проекта – кредит, заём, собственные средства и т.п.);
- возможные проблемы реализации инновационного проекта;
- финансовый план проекта (доходы; текущие производственные затраты; капитальные вложения, оборотный капитал; характеристика финансовой состоятельности проекта и т.п.).

Государственный комитет по науке и технологиям Республики Беларусь ежегодно проводит Республиканский конкурс инновационных проектов. Конкурс проводится в целях стимулирования реализации перспективных инновационных проектов, содействия в поиске инвестиционной поддержки инновационных проектов, коммерциализации результатов научных исследований и разработок. Номинации конкурса: «Лучший инновационный проект» и «Лучший молодежный инновационный проект». В рамках конкурса рассматриваются перспективные инновационные проекты с детально проработанной стратегией реализации (коммерциализации) и соответствующие приоритетным направлениям научно-технической деятельности в Республике Беларусь. Участниками конкурса могут быть юридические и физические лица, участники самостоятельно выбирают, к какой номинации относится представляемый ими инновационный проект. В номинации «Лучший молодежный инновационный проект» могут принимать участие физические лица (например, студенты), возраст которых не превышает 35 лет. Среди победителей и призеров совет конкурса отбирает проекты для дальнейшей коммерциализации их результатов, которые получают сертификат в размере 400 тарифных ставок (13200 рублей в 2018 году).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Леонов, А. Н. Основы научных исследований и моделирования: учебно-методический комплекс для вузов / А. Н. Леонов, М. М. Дечко, В. Б. Ловкис. – Минск : БГАТУ, 2010. – 275 с.
2. Севриков, В. В. Методология и организация научных исследований / В. В. Севриков. – Минск : Дикта : Мисанта, 2012. – 371 с.
3. Семесенко, М.П. Методы обработки и анализа измерений в научных исследованиях. / М.П. Семесенко. – Киев: Вища шк., 1983. – 240 с.
4. Корн, Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров : определения, теоремы, формулы / Г. Корн, Т. Корн; под общ. ред. И. Г. Арамановича . – Изд. 5-е. - Москва: Наука, 1984. – 831 с.
5. Алексеев, А.А. Идентификация и диагностика систем / А.А. Алексеев, Ю.А. Кораблёв, М.Ю. Шестопапов. – М.: Издательский центр «Академия». – 2009. – 352 с.
6. Широков, О.Г. Тепловые схемы замещения электроэнергетических устройств / О.Г. Широков, Д.И. Зализный // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2008. – №2. – С.63-67.
7. Зализный, Д.И. Математическая модель тепловых процессов одножильного силового кабеля / Д. И. Зализный, С. Н. Прохоренко // Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ – Энергетика. – 2012. – №5. – С. 25-34.
8. Зализный, Д.И. Математическое моделирование тепловых процессов в силовых кабелях с пластмассовой изоляцией / Д.И. Зализный, О.Г. Широков, Н.М. Ходанович, А.Ю. Шутов // Вестник ГГТУ им. П.О. Сухого. – №3. – 2009. – С. 65-75.
9. Зализный, Д.И. Расчёт температур основных элементов силового масляного трансформатора на основе анализа температуры поверхности его бака / Д.И. Зализный, О.Г. Широков // Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ – Энергетика. – №4. – 2012. – С. 18-28.
10. Зализный, Д.И. Адаптивная математическая модель тепловых процессов трёхжильного силового кабеля / Д.И. Зализный, О.Г. Широков // Вестник ГГТУ им. П.О. Сухого. – №2. – 2014. – С.51-63.
11. Зализный, Д.И. Адаптивная математическая модель тепловых процессов асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором / Д.И.

Зализный, О.Г. Широков, В.В. Попичев // Вестник ГГТУ им. П.О. Сухого. – №1. – 2015. – С.31-44.

12. Зализный, Д.И. Адаптивная математическая модель тепловых процессов косинусного силового конденсатора / Д.И. Зализный, О.Г. Широков, Г.О. Широков, А.А. Капанский // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. – 2016. – №4. – с. 301-312.

13. Демчук, М. И. Системная методология инновационной деятельности : учеб. пособие / М.И. Демчук. – Минск: РИВШ, 2007. – 304 с.