**НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК КЫРГЫЗСКОЙ РЕСПУБЛИКИ**

На правах рукописи

УДК: 681.5

***Осмонова Рима Чынарбековна***

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ УПРАВЛЯЕМЫХ СИСТЕМ**

05.13.16 - применение вычислительной техники, математического моделирования и математических методов в научных исследованиях (по отраслям наук)

**Диссертация на соискание ученой степени**

**кандидата технических наук**

**Научный руководитель:**

**доктор технических наук,**

**член-корреспондент НАН КР,**

**Заслуженный деятель науки КР**

**Оморов Т.Т.**

**Бишкек – 2019**

**ОГЛАВЛЕНИЕ**

ВВЕДЕНИЕ……………………………………………………………………….4

ГЛАВА 1. ПРОБЛЕМА И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИДЕНТИФИКАЦИИ УПРАВЛЯЕМЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ.………..…………..9

* 1. Основные проблемы и модели динамических управляемых систем….9
  2. Общая постановка задачи идентификации объектов управления.…...14
  3. Обзор основных методов идентификации динамических управляемых систем……...…………………………………………...….18

Выводы……………………………………………………………….....…….33

ГЛАВА 2. ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ УПРАВЛЯЕМЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ………………………………….….34

* 1. Описание нового подхода к параметрической идентификации управляемых систем...…………...………………………………………. 35
  2. Параметрическая идентификация модели объектов управления по экспериментальным данным……………………………………………..39
  3. Синтез импульсной характеристики управляемого объекта ……...…..46
  4. Идентификация параметров линейного дискретного объекта управления ………………………………………………..………………51

Выводы…………………………………………………………………...…..57

ГЛАВА 3. ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ И ХАРАКТЕРИСТИК РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ В СОСТАВЕ АСКУЭ ......................................................…….....…..…58

3.1. Состояние проблемы совершенствования современных АСКУЭ…….58

3.2. Идентификация параметров распределительной сети по данным АСКУЭ…………………………………………………...….65

3.3. Идентификация недоступных для измерения и контроля переменных состояния распределительной сети по данным АСКУЭ…...………..80

3.4. Идентификация потерь электроэнергии в распределительной сети по данным АСКУЭ …................................................................................…93

Выводы……...……………………………………………………………........97

ГЛАВА 4. ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ КОМПЛЕКСА ЗАДАЧ ИДЕНТИФИКАЦИИ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ И ЕГО ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ПРИКЛАДНЫХ ЗАДАЧ........................…............…....99

4.1. Описание программного обеспечения комплекса задач идентификации параметров распредсетей…....………………......……………………......99

4.2. Прикладные расчеты по идентификации параметров межабонентских участков распредсети................................................................................103

Выводы……………………….………………………………………………109

ЗАКЛЮЧЕНИЕ………….…………………………………………………..…110

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ…….……………...………112

ПРИЛОЖЕНИЕ……………………………………………………….……..…122

**ВВЕДЕНИЕ**

**Актуальность проблемы.** Проектирование и создание широкого класса управляемых технических и технологических объектов различного назначения в качестве основных этапов предусматривает этап идентификации их математических моделей. Последние при этом используются для решения широкого круга задач на основе данных «вход-выход». В частности, при проектировании систем автоматического управления (САУ) модели объектов автоматизации используются для: исследования устойчивости проектируемых САУ; синтеза регуляторов систем управления; компьютерного моделирования совместного функционирования объекта управления и синтезированного регулятора; анализа качества процессов управления. При создании АСУ ТП на основе математического описания объектов автоматизации, например, решаются задачи: разработки алгоритмического и специального программного обеспечения функциональных подсистем АСУ ТП; идентификации параметров и переменных состояния управляемых объектов, недоступных для измерения и контроля; проведения вычислительных экспериментов по оценке показателей качества и эффективности проектируемых систем управления.

Диссертационная работа посвящена проблемам параметрической идентификации моделей управляемых технических и технологических объектов. В качестве таких объектов в работе рассматриваются: динамические управляемые системы, представленные в виде «черного ящика», а также распределительные электрические сети (РЭС), которые являются конечными звеньями при передаче электроэнергии ее потребителям. Класс объектов типа «черного ящика» очень широк, так как в большинстве случаев для построения математических моделей использование физических законов представляет определенные сложности. В то же время для проектирования систем управления такими объектами необходимо идентифицировать их модели, необходимые для синтеза соответствующих регуляторов систем автоматического управления (САУ). С другой стороны практически отсутствуют научные основы и методы построения моделей и расчета параметров трехфазных распределительных сетей напряжением 0,4 кВ в условиях несимметрии токов и напряжений, которые необходимы для решения ряда важных функциональных задач в составе АСКУЭ, внедряемых на объектах распределительных компаний Республики. К таким задачам, в частности, относятся задачи диагностики состояний и параметров функциональных элементов РЭС в условиях неопределенности, а также задачи оптимизации режимов работы распредсетей. Указанные обстоятельства обуславливают актуальность проблемы параметрической идентификации управляемых технических систем, к которым, в частности, относятся трехфазные распределительные электрические сети.

**Связь темы диссертации с научными программами (проектами).** Диссертационная работа выполнена в Институте физико-технических проблем и материаловедения НАН Кыргызской Республики в рамках проектов фундаментальных исследований:

1. «Разработка инновационных технологий для создания автоматических и информационных систем управления и контроля».

2. «Разработка научных основ и инновационных технологий для создания диагностических и управляющих подсистем в целях совершенствования АСКУЭ».

**Цель и задачи исследований. Целью** диссертационной работы является развитие методов и алгоритмов параметрической идентификации технических систем и их использование в задачах автоматизации технических объектов.

**Задачи исследований:**

* анализ современного состояния проблемы параметрической идентификации управляемых технических систем;
* математическое описание критериального условия для целей параметрической идентификации объектов управления;
* разработка моделей и методов параметрической идентификации линейных непрерывных и дискретных стационарных объектов управления, описываемых передаточными функциями и импульсными переходными функциями (ИПФ) на основе полученных критериальных условий.
* разработка моделей и алгоритмов идентификации параметров и переменных состояния (потерь электроэнергии) распределительных электрических сетей по данным АСКУЭ;
* разработка программных средств для целей параметрической идентификации параметров распределительных электрических сетей и их применение для решения прикладных задач.

**Методы исследования.** В работе использованы методы математического анализа, дифференциальных уравнений, теории автоматического управления и электротехники. Для исследования эффективности разработанных методов и алгоритмов параметрической идентификации управляемых систем использованы технологии компьютерного моделирования.

* **Научная новизна полученных результатов** состоит в разработке новых методов и алгоритмов параметрической идентификации технических объектов, направленных на развитие теории идентификации управляемых систем.

**Практическая значимость результатов работы.** Разработанные в диссертации модели, методы и алгоритмы позволяют выполнить:

* идентификацию моделей объектов управления для динамического проектирования регуляторов систем управления техническими объектами;
* идентификацию параметров (сопротивлений) и диагностику состояний межабонентских участков магистральной линии распредсети в составе АСКУЭ, обеспечивающей определить уровень износа проводов линий электропередач.

Результаты работы также могут быть использованы при создании алгоритмического и специального программного обеспечения систем автоматизации научных исследований и управления технологическими процессами в различных отраслях экономики.

**Основные положения диссертации, выносимые на защиту:**

1. Новый подход к решению задач парамерической идентификации управляемых динамических технических систем на основе критериального условия.
2. Методы и алгоритмы параметрической идентификации моделей линейных стационарных объектов управления, описываемых передаточными функциями и импульсными переходными функциями (ИПФ) на основе предложенного подхода.
3. Методы и алгоритмы идентификации параметров распредсетей 0,4 кВ с использованием предложенного подхода.
4. Методика идентификации потерь электроэнергии в распредсети с использованием данных АСКУЭ.

**Реализация результатов работы.** Результаты исследований использованы в ОАО «Северэлектро» и учебном процессе Кыргызского государственного технического университета им. И. Раззакова.

**Личный вклад соискателя.** Все основные результаты, изложенные в диссертации, получены автором под руководством научного руководителя.

**Апробация результатов диссертации.** Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на:

* XXVIII Международной научно-практической конференции «Научная дискуссия: вопросы технических наук», г. Москва, 2014г.;
* Международной конференции «Современное состояние и перспективы развития горнодобывающей отрасли» (КГТУ им.И.Раззакова), г.Бишкек, 2014г.;
* Международной научно-практической конференции «Строительное образование и наука Кыргызстана: перспективы интеграции, инновации и партнерства» (КГУСТА), г.Бишкек, 2014г.;
* Международной научно-практической конференции «Актуальные вопросы современной техники и технологии», г.Липецк, 2015;
* Международной конференции «Инновации в науке, производстве и образовании», г.Калининград, 2015;
* Международной конференции «Информационные технологии и математическое моделирование в науке, технике и образовании» (КГТУ им.И.Раззакова), г.Бишкек, 2016г;
* XXVI Международной научно-практической конференции [«Актуальные проблемы в современной науке и пути их решения»](http://euroasia-science.ru/ru/conference/), г.Москва, 2016г;
* XIII Международной научно-технической конференции «Виртуальные и интеллектуальные системы», г. Барнаул, 2018г.

**Публикации.** По результатам проведенных исследований опубликовано 23 научные работы, в том числе в периодических изданиях (журналах), включенных в международные базы цитирования (РИНЦ, Web of Science, Scopus и др.).

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа изложена на 125 страницах, состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованных источников, который включает 91 наименование, приложения, содержит 33 рисунка и 15 таблиц. Приложение содержит тексты программных средств, предназначенных для идентификации параметров магистральной линии распредсети.

**ГЛАВА 1**

**ПРОБЛЕМА И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИДЕНТИФИКАЦИИ**

**УПРАВЛЯЕМЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

* 1. **Основные проблемы и модели динамических**

**управляемых систем**

Проектирование систем автоматизации процессов управления техническими и технологическими объектами (рис.1.1.1) в качестве одного из основных этапов включает этап идентификации математической модели управляемых объектов на основе физических законов или экспериментальных данных.

Объект

управления

Рис.1.1.1. Условное изображение объекта управления

Для этой цели используются следующие основные динамические характеристики объектов:

1. Дифференциальные и разностные уравнения;
2. импульсные переходные функции (ИПФ);
3. передаточные функции.

**Модели объектов управления в пространстве состояний.** Наиболее общей моделью динамической управляемой системы является векторное дифференциальное уравнение в переменных состояния:

, (1.1.1)

где – n-мерный вектор состояния объекта; – m-мерный вектор управляющих воздействий; – -мерный вектор внешних возмущающих воздействий; – n-мерная вектор-функция, компоненты которой удовлетворяют условиям существования и единственности соответствующей задачи Коши; – -мерный вектор, составленный из параметров объекта; t – непрерывное время;  – начальный и конечный моменты управления;  – начальное состояние объекта.

Функциональная связь между векторами выхода y(t) и состояния x(t) объекта определяется соотношением [1]

(1.1.2)

где C – Nn - мерная вещественная матрица; - вектор, составленный из помех  в каналах измерений управляемых переменных .

Таким образом, предполагается, что помехи  не измеряются, а наблюдается лишь вектор выхода объекта .

В случае линейного стационарного многомерного объекта векторное уравнение (1.1.1) имеет вид:

(1.1.3)

где *A, B, M* – вещественные матрицы соответствующих размерностей: , , .

Совокупность элементов этих матриц составляют вектор-параметр объекта , имеющий размерность .

Дискретные объекты (модели) описываются разностными уравнениями, которые, в частности, можно получить из (1.1.3) путем ее дискретизации по времени в точках :

(1.1.4)

где *,*  – вещественные матрицы соответствующих размерностей.

**Модели объектов управления в форме «вход – выход».** Для математического описания динамики объектов в форме «вход – выход» широко используются дифференциальные уравнения, передаточные и импульсные переходные функции [2, 3]. В случае, когда объект имеет один выход (y1) и два входа (*u1,*) его динамические свойства определяются дифференциальным уравнением:

где *u1(t)* и *y1(t)* – входная и выходная переменные модели объекта соответственно; – внешнее возмущение; , , – вещественные параметры объекта, которые образуют n-мерный вектор – параметр , ; *n, m, r* – порядки дифференциальных операторов левой и правой частей уравнения (1.1.5). Предполагается, что *n*>*m* и *n*>*r*.

Разностное уравнение объекта управления в форме «вход – выход» можно получить из (1.1.5) путем ее дискретизации по времени в точках :

(1.1.6)

,

где – шаг дискретизации по времени; *N*+1 – количество точек дискретизации.

Передаточные функции динамического объекта определяются при нулевых начальных условиях. Далее для наглядности и без потери общности предположим, что внешние возмущения отсутствуют, т.е. где 0- нулевой вектор. Для объекта управления, описываемого векторным уравнением (1.1.3), матрица передаточной функции объекта  определяет изображение Y(s) вектора управляемой переменной y(t):

 (1.1.7)

где ; s – комплексная переменная;  оператор Лапласа. При этом с учетом (1.1.2) определяется формулой [4, 5]:

где передаточные функции

, , .

В рассматриваемом случае вектор-параметр объекта состоит из элементов матриц *А* и *В*, где .

При отсутствии внешнего возмущения () передаточная функция линейной стационарной системы, описываемой уравнением (1.1.5), представляется в виде следующего дробно-рационального выражения:

Тогда изображение  выхода объекта имеет вид

Как известно [2, 3], импульсная переходная функция **(**ИПФ) одномерного объекта определяется как его реакция на действие входного импульсного сигнала при нулевых начальных условиях.

Матрица ИПФ многомерного линейного стационарного объекта управления определяется как обратное преобразование Лапласа от матрицы передаточных функций :

При известной матрице  вектор управляемых переменных многомерного объекта y(t) при нулевых начальных условиях определяется интегралом свертки [6]:

Для одномерного объекта его реакция на входной сигнал  имеет вид:

где скалярная ИПФ .

В случае, когда априорная информации об объекте мала, т.е. когда объект представляет собой «черный ящик», для целей идентификации модель ИПФ целесообразно представить в параметрическом виде [7, 8]:

где – неизвестные вещественные параметры; – известные по своей структуре функции заданные с точностью до вектор-параметра

В качестве системы , в частности, можно использовать экспоненциальные или ортогональные функции [9, 10, 11].

При этом вектор–параметр , где . Переходный процесс  на выходе объекта, описываемого ИПФ вида (1.1.11), на единичное входное воздействие *u1(t)=*1(t) определяется соотношением

Рассмотренные выше модели объектов управления в дальнейшем используются для решения задач идентификации динамических систем и синтеза регуляторов САУ.

* 1. **Общая постановка задачи идентификации объектов управления**

Один из основных этапов проектирования САУ состоит в идентификации управляемой системы, т.е. в построении математической модели объекта по данным «вход – выход». При этом возможны следующие случаи:

1. физические процессы, протекающие в объекте управления, в достаточной степени известны проектировщику системы;
2. из-за сложности объекта априорная информация о закономерностях его функционирования отсутствует или является неполной.

В первом случае для построения модели системы имеется возможность использования физических законов, что дает возможность определить ее структуру. Но значения ряда параметров (коэффициентов) все же могут остаться неизвестными. Во втором случае практически невозможно применение физических законов, а управляемый объект рассматривается как «черный ящик» с неизвестными структурой и параметрами. В связи с этим в целях построения качественной и адекватной модели необходимо проведение эксперимента над объектом.

В общем случае процесс идентификации управляемого объекта включает следующие основные этапы:

1. проведение эксперимента над объектом управления и получение данных в форме «вход – выход»;
2. выбор и формализация критерия качества идентификации;
3. выбор типа (класса) и структуры модели объекта;
4. синтез (оценка) параметров модели объекта по выбранному критерию;
5. анализ синтезированной модели объекта;
6. использование построенной модели для синтеза САУ.

В целях проведения эксперимента для идентификации объекта используются группа приборов ИП1 и ИП2, которые измеряют и записывают значения входного и выходного сигналов в заданные моменты времени. Упрощенная схема получения экспериментальных данных об одномерном объекте управления приведена на рис.1.2.1.

Объект

управления

ИП1

ИП2

Рис.1.2.1. Схема получения данных об объекте

Как правило, эксперимент проводится в процессе функционирования объекта управления в активном или пассивном режиме. В первом случае на вход объекта подаются типовые воздействия (ступенчатые, гармонические, импульсные и др.). Пассивный режим предполагает проведение эксперимента в режиме нормального функционирования объекта.

В общем случае, особенно когда объект представлен как «черный ящик», определение структуры модели объекта является сложной проблемой. В настоящее время в теории идентификации систем не существует общего формализованного метода выбора структуры модели. В то же время в ее рамках наиболее разработанными являются алгоритмы параметрической идентификации [12, 13].

Далее предполагается, что структура модели объекта известна. В частности, для передаточной функции (1.1.6) это означает, что априори заданы порядки n и m полиномов ее знаменателя и числителя. Тогда реакция модели на известный (детерминированный) входной сигнал зависит от его вектор-параметра , т.е. . Введем невязку

, ,

где  – реакция неизвестного объекта на входное воздействие , полученная в результате эксперимента (рис.1.2.2).

Объект

управления

Модель объекта

управления

\_

Рис.1.2.2. Схема формирования ошибки идентификации

Функция определяет динамическую ошибку идентификации объекта управления. Она используется для формирования критериальной (штрафной) функции , которая служит для оценки качества идентификации, т.е. степени адекватности модели и реального объекта.

В большинстве случаев, критериальная функция  определяется как функционал

где - неотрицательная функция, определяющая меру ошибки идентификации.

В качестве функции для многомерных объектов используется евклидовая норма вектора невязки (ошибки идентификации)

, (1.2.3)

а для одномерных систем квадратические или модульные функции:

; (1.2.4)

. (1.2.5)

В статистических задачах идентификации широкое применение получило критериальная функция

, (1.2.6)

где – символ математического ожидания.

Другой подход к определению штрафных функций связан с использованием статистических характеристик отклонения оценки идентифицируемого вектор-параметра объекта от его истинного значения . Эти функции используются в методах максимального правдоподобия и максимума апостериорной вероятности, которые рассматриваются в 1.3.

Очевидно, что чем меньше значение функционала , тем выше качество идентификации модели объекта.

Общая постановка задачи параметрической идентификации объекта управления состоит в следующем. Предполагается, что задана следующая исходная информация:

1. данные измерений входа и выхода объекта управления в интервале [;
2. структура модели управляемого объекта (например, в виде соотношений (1.1.4) или (1.1.6));
3. критериальная функция  для идентификации объекта.

На основе этих данных требуется определить такой вектор-параметр модели объекта управления, обеспечивающий минимум критериальной функции , т.е.

где – -мерное арифметическое пространство.

Далее в главе 2 разрабатываются новые подходы для формирования критериальной (штрафной) функции и решения экстремальной задачи (1.2.2), которые используются для решения задач параметрической идентификации управляемых систем.

* 1. **Обзор основных методов идентификации динамических управляемых систем**

Как известно [2, 6, 14], проектирование регуляторов САУ осуществляется на основе моделей управляемых объектов. При этом в качестве математического описания их динамики применяются: дифференциальные и разностные уравнения; передаточные и импульсные переходные функции. В рамках теории управления и идентификации разработан целый ряд подходов и методов построения моделей динамических объектов, которые можно классифицировать на следующие три группы:

* методы структурной идентификации;
* методы параметрической идентификации;
* методы непараметрической идентификации.

Необходимо отметить, что структура модели объекта определяется выбранным классом динамических характеристик. Например, если динамика объекта описывается векторным уравнением (1.1.3), то структура его модели определяется размерностью (n) вектора состояния . В случае использования для этой цели передаточной функции (1.1.6) структура модели определяется порядками полиномов знаменателя (n) и числителя (m). Как известно [13, 15, 16], определение структуры модели управляемого объекта представляет собой сложную проблему и в настоящее время в теории идентификации еще не существует формализованных методов ее решения [16, 17]. В то же время можно отметить, что один из возможных подходов к синтезу структуры модели объекта заключается в использовании принципа сложности [18, 19] на основе формирования соответствующих шкал сложности для возможных типов моделей динамической системы.

Наиболее разработанными в теории управления и идентификации являются методы и алгоритмы параметрической и непараметрической идентификации динамических систем.

К группе параметрической идентификации относятся методы, в которых в качестве математического описания объектов используются дифференциальные, разностные уравнения и передаточные функции, заданные (например, в виде (1.2.3), (1.2.6)) с точностью до неизвестных параметров . Из этой группы наибольшее применение получили:

* метод наименьших квадратов (МНК) [12, 13, 20];
* градиентные алгоритмы [1, 12, 13];
* стохастическая аппроксимация [13, 21];
* спектральные и частотные методы [20, 22, 23, 24];
* метод максимального правдоподобия и апостериорной вероятности [13].

Методы непараметрической идентификации, в основном, используются для построения (оценки) импульсных переходных функций (ИПФ). Из этой группы в практике автоматизации управления широкое применение нашли:

* метод свертки [12, 13, 20];
* корреляционный метод [3, 12, 20].

Рассмотренная выше классификация методов идентификации динамических систем представлена на рис.1.3.1.

**Методы параметрической идентификации.** Параметрическая идентификация включает выполнение следующих основных этапов:

1. выбор типа (класса) и структуры модели объекта управления;
2. выбор и формализация критерия близости объекта и его модели;

Методы идентификации

управляемых систем

Методы структурной идентификации

Методы параметрической идентификации

Методы непараметрической идентификации

Метод наименьших квадратов (МНК)

Градиентные

алгоритмы

Спектральные методы

Частотные методы

Метод максимального подобия

Метод свертки

Корреляционный метод

Метод апостериорной вероятности

1.3.1. Классификация методов идентификации динамических объектов

1. оценка вектор-параметра модели, обеспечивающего минимум выбранного критерия идентификации:

Выбор критерия идентификации  осуществляется в зависимости от объема информации о внешних возмущениях и помехах измерения .

Метод наименьших квадратов, в основном, используется в тех случаях, когда возмущения не измеряются (не контролируются). При этом критериальная (штрафная) функция  определяется евклидовой нормой, определяемой формулой:

где – вектор ошибки идентификации:

.

В случае, когда выбранная модель объекта управления описывается линейным дифференциальным или разностным уравнением, штрафная функция  является квадратической функцией от параметров модели . При этом решение экстремальной задачи приводит к системе линейных алгебраических уравнений относительно компонентов вектора . Если его размерность велика, то решение полученной системы уравнений представляет определенные трудности, так как процедура обращения матрицы системы является сложной задачей. В связи с этим разработаны рекуррентные алгоритмы метода наименьших квадратов, которые дают возможность последовательно определить оценки параметров модели объекта без операции обращения матрицы системы. При этом искомая оценка вектора является несмещенной и состоятельной, если возмущения представляют собой независимые одинаково распределенные случайные величины [1].

В случае, когда критерий  является нелинейной функцией от компонентов вектора , полученная система алгебраических уравнений, определяющих необходимые условия ее экстремума, также является нелинейной функцией. При этом для решения задачи (1.5.1), т.е. для идентификации объекта можно использовать градиентные методы [1, 12, 13, 20], которые делятся на 2 группы: прямые и косвенные методы. В прямых методах штрафная функция  минимизируется на каждом шаге по итерационной схеме:

где – значение вектора на -ом шаге;

- диагональная матрица, элементами которой являются положительные числа , выбираемые из условий обеспечения сходимости последовательности (1.5.3) и необходимой скорости сходимости.

Таким образом, в градиентных методах процедура идентификации объекта сводится к формированию последовательности (1.5.3), которая завершается, если выполняется условие

где - малое положительное число.

Найденный при этом вектор-параметр , обеспечивает локальный минимум критерия . В общем случае штрафная функция может иметь несколько экстремумов, что усложняет процедуру идентификации объекта управления.

Градиентный метод, реализующий вычислительный алгоритм (1.3.3), известен как классический градиентный метод первого порядка, который приводит к медленной сходимости в окрестности точки экстремума. Для того чтобы обеспечить быструю сходимость итерационного процесса используется метод наискорейшего спуска [13] или градиентный метод второго порядка, известный как метод Ньютона [13, 25, 26]. Для этой цели более эффективным может оказаться метод сопряженного градиента [25], сочетающий преимущества методов первого и второго порядков. Недостатком этих алгоритмов является то, что при высоких порядках моделей объектов реализация их вычислительных процедур представляет определенные трудности. Проблема усугубляется, если штрафная функция является многоэкстремальной и имеет овражную структуру [27]. Для этих случаев разработаны специальные методы [27, 28], в частности, метод оврагов [27] и алгоритм массивной точки [26].

Здесь можно отметить, что к классу градиентных методов можно отнести и подход к синтезу регуляторов САУ [29-34] и параметрической идентификации объектов управления [35, 36, 37]. Основу этого подхода составляют критериальные условия на штрафные функции , которые позволяют получить уравнения адаптации (самонастройки) параметров синтезируемого регулятора и модели управляемого объекта. Вычислительные процедуры разработанных алгоритмов дают возможность идентифицировать динамические системы, описываемые передаточными функциями, импульсными переходными функциями, линейными дифференциальными и разностными уравнениями.

В целях параметрической идентификации объектов управления кроме прямых градиентных методов, рассмотренных выше, используются и косвенные методы, такие как методы квазилинеаризации, дифференциальной и разностной аппроксимации [13].

При реализации алгоритма квазилинеаризации нелинейные функции, входящие в уравнение динамики объекта, линеаризуются на каждом шаге итерации, например, по схеме Тейлора.

Метод квазилинеаризации позволяет:

* осуществить оценку параметров нелинейных моделей стационарных, нестационарных и многомерных объектов, представленных в виде дифференциальных и разностных уравнений с учетом возмущающих воздействий;
* достаточно эффективно решать двухточечные краевые задачи, к которым сводятся некоторые задачи параметрической идентификации систем.

Основными недостатками метода квазилинеаризации являются:

* сложность и трудоемкость вычислительных процедур из-за применения методов оптимального управления при динамических ограничениях;
* имеются трудности, связанные с заданием начального приближения, от которого во многом зависит сходимость итерационного процесса.

Методы стохастической аппроксимации [13] по существу являются развитием градиентных алгоритмов в условиях неопределенности. Первоначально они использовались для решения уравнений регрессии и нахождения экстремумов функций регрессий [12, 13]. В дальнейшем идеи стохастической аппроксимации начали использоваться для решения задач параметрической идентификации объектов, описываемых системой дифференциальных и разностных уравнений с учетом действий внешних возмущений и помех измерений . При этом большие трудности представляет выбор аналога матрицы , обеспечивающей сходимость итерационной процедуры. При идентификации динамических систем на основе стохастической аппроксимации возникает необходимость применения методов теории оптимального управления [38, 39], в частности, принципа максимума [38], что значительно усложняет процедуру поиска искомого вектор-параметра объекта .

**Непараметрические методы идентификации.** Эта группа методов предназначена, в основном, для определения модели объекта управления в форме ИПФ. Основными из них являются:

* методы, основанные на решении уравнений типа свертки [1, 6, 13];
* корреляционный метод [1, 3, 13].

Рассмотрим основные идеи этих методов на примере одномерных объектов управления.

В методе свертки исходным соотношением для идентификации является, в частности, уравнения свертки (1.1.10):

На основе уравнения (1.3.5) и наблюдений (измерений) входного и выходного сигналов объекта в дискретные моменты , , формируется система алгебраических уравнений относительно значений ИПФ :

, (1.3.6)

где векторы , , а матрица

.

Здесь без потери общности принято, что =1. При существует обратная матрица , поэтому искомый вектор определяется в явной форме:

*.* (1.3.7)

Треугольная структура матрицы обеспечивает простоту процедуры идентификации объекта на основе метода свертки. При этом используются данные наблюдений «вход – выход», записанные в процессе нормальной работы объекта управления без использования специальных входных тестовых сигналов. Метод свертки имеет ряд недостатков:

* при больших N снижается точность метода, так как возрастают ошибки округления;
* наличие помех в измерениях делает невозможным использование алгоритма (1.5.7);
* в случае непрерывного объекта в большинстве случаев найденные числовые значения , , необходимо преобразовать в удобную форму (например, в виде непрерывной функции от времени или передаточной функции) для применения соответствующего метода синтеза САУ.

Повышение эффективности метода можно достичь на основе использования быстрого преобразования Фурье [10, 22].

Корреляционный метод идентификации объекта управления является статическим и применяется для определения ИПФ в случае, когда на его входе действует случайный сигнал , а измерение выходной величины сопровождается с помехой . При этом объект описывается уравнением

Для определения ИПФ используется уравнение Винера – Хопфа:

где - корреляционная функция случайного сигнала ;

- взаимная корреляционная функция сигналов и .

Операция дискретизации функций в точках , входящих в соотношение (1.3.9), приводит к системе линейных алгебраических уравнений

, (1.3.10)

где и – векторы: , ; – матрица, определяемая соотношением:

.

При этом без потери общности считается, что =1. Матрица является симметричной, так как функция представляет собой четную функцию, т.е. . В результате при известных корреляционных функциях и искомый вектор определяется по формуле

, (1.3.11)

где – матрица обратная .

По сравнению с методом свертки статистический подход к идентификации объектов обладает преимуществом, что проявляется в значительном увеличении точности оценки ИПФ за счет устранения неизмеряемых (неконтролируемых) помех. Кроме этого корреляционный метод не требует наличия априорной информации об объекте управления, в то же время позволяет определить его ИПФ независимо от данных «вход – выход», поступающих в процессе нормальной эксплуатации технологического объекта. С другой стороны, рассматриваемый метод можно использовать для идентификации только линейных динамических систем, характеристики которых изменяются медленно. Его реализация требует дополнительные аппаратные и программные средства, которые необходимы для получения соответствующих корреляционных функций.

Спектральные методы идентификации [22] базируются на понятии спектральных характеристик объектов и их сигналов, которые определяются набором коэффициентов Фурье рассматриваемых процессов относительно используемой системы ортонормированных (базисных) функций . В качестве последних широкое применение получили функции Лягера [22] и Уолша [10]. Использование спектральных методов позволяет идентифицировать параметры моделей объектов, представленных в виде дифференциальных и разностных уравнений, передаточных и импульсных переходных функций, заданных с точностью до неизвестных параметров. Реализация процедуры идентификации одномерного объекта на основе рассматриваемого метода включает следующие основные этапы:

1. Выбор вида и структуры модели объекта.
2. В случае описания объекта дифференциальным уравнением его преобразование в эквивалентное интегральное уравнение. При идентификации ИПФ нет необходимости такого преобразования, так как непосредственно используется уравнение типа свертки (1.1.10) или уравнение Винера-Хопфа (1.3.9).
3. Спектральное разложение экспериментально полученных данных о входном и выходном сигналах объекта управления относительно выбранной системы базисных функций :

где , - векторы, составленные из коэффициентов Фурье , соответственно функций и .

1. Спектральное представление ядер интегрального уравнения, полученного на втором этапе. В случае идентификации ИПФ объекта

где - вектор-параметр ИПФ, который требуется определить.

1. На основе полученного на втором этапе формирование системы алгебраических уравнений относительно искомой спектральной характеристики объекта. В случае идентификации ИПФ эта система является линейной:

, (1.3.15)

где матрица и вектор столбец являются известными, элементы которых зависят от элементов векторов и .

1. Решение векторно-матричного уравнения и определение искомого вектор-параметра ИПФ. при этом используются известные численные методы [26], в частности, можно использовать метод наименьших квадратов.

Спектральный подход к задачам идентификации динамических систем является универсальным методом, так как позволяет построить модели широкого класса объектов управления, принадлежащих линейным и нелинейным, стационарным и нестационарным, одномерным и многомерным, детерминированным и стохастическим системам.

Существенным недостатком рассматриваемого метода является достаточно большой объем вычислений, необходимых для реализации его алгоритма, что связано с необходимостью спектрального разложения действующих в системе сигналов, их статистических характеристик и динамических характеристик идентифицируемых объектов, а также для решения системы уравнений вида (1.3.15) при высоких порядках их моделей. В связи с этим для расчета спектральных характеристик сложных систем и процессов используются алгоритмы быстрого преобразования Фурье (БПФ) [10, 22].

Частотные методы идентификации ориентированы на определение параметров передаточных функций объектов управления. Как известно [3, 6], частотная характеристика объекта непосредственно определяется по его передаточной функции Например, если передаточная функция задается выражением (1.1.6), то соответствующая частотная характеристика представляется в виде

где  

 .

Идентифицируемый вектор-параметр включает неизвестные коэффициенты полиномов числителя и знаменателя передаточной функции , т.е. , где его размерность .

Частотные характеристики объекта , , , можно получить экспериментальным путем. Для этого на его вход подается гармонический сигнал с частотой . При этом на выходе объекта устанавливается сигнал . Повторяя эту процедуру раз для различных значений частоты , можно получить набор значений и , , путем их измерения на выходе объекта. Далее на основе этих данных определяются значения для характеристик и используя следующие соотношения:

,

, . (1.3.17)

Следует отметить, что эти данные можно получить без использования формул (1.3.17) как выходы фильтра Фурье [1] подавая на его вход сигнал (рис.1.3.2)

Объект управления

Фильтр Фурье

Рис.1.3.2. Схема получения характеристик и .

При этом

где Т- период усреднения (фильтрации) сигнала .

В результате на основе соотношения (1.3.16) для оценки искомого вектор-параметра модели объекта составляется система из линейных алгебраических уравнений:

(1.3.18)

.

Для решения этой системы используются известные методы и алгоритмы, например, метод наименьших квадратов.

Рассмотренный частотный метод имеет ряд недостатков:

* эксперимент для получения данных по частотным характеристикам возможен только определенного класса объектов, так как он связан с нарушением нормальной работы объекта управления;
* запись частотных характеристик объекта требует дополнительных аппаратурных и программных средств;
* повышение точности идентификации параметров передаточных функций обуславливает увеличение объема и сложности вычислительных процедур метода, что связано с возрастанием порядка системы уравнений (1.3.18).

К группе параметрической идентификации объектов управления относятся и методы, использующие априорную информацию о статистических характеристиках сигналов и помех в каналах измерения. В случае, когда имеется априорная информация о плотности распределения вектора выхода объекта в качестве штрафной функции  используется условная плотность вероятности наблюдаемого процесса относительно вектор-параметра , т.е.

. (1.3.19)

Функция , определяемая формулой (1.3.19), называется функцией правдоподобия [13]. Оценка искомого вектор-параметра определяется из условия максимума , т.е.

. (1.3.20)

Такой подход к идентификации объектов называется методом максимального правдоподобия. Для решения экстремальной задачи используются известные численные методы [25, 26], в частности, градиентные методы.

Другой подход, относящийся к указанной группе, известен как метод максимума апостериорной вероятности [39], в котором предполагается, что априори известна плотность вероятности вектор-параметра , а штрафная функция определяется через условную плотность вероятности , т.е.

. (1.3.21)

Оценка вектор-параметра объекта находится путем максимизации штрафной функции , определяемой выражением (1.3.21). При этом также используются известные вычислительные алгоритмы.

На основе методов максимального правдоподобия и максимума апостериорной вероятности можно решать задачи параметрической идентификации широкого класса линейных, нелинейных, непрерывных, дискретных и многомерных объектов управления при наличии случайных возмущающих воздействий. В то же время они имеют ряд недостатков:

* формализованное описание статистических характеристик случайных процессов требует значительного объема работ;
* построение штрафной функции  представляет определенные трудности;
* реализация алгоритмов методов связана со сложными вычислительными процедурами;
* точность полученных оценок параметров моделей объектов ухудшается при неправильном описании априорных статистических характеристик (математических ожиданий, ковариационных матриц).

Таким образом, краткий обзор известных методов идентификации объектов управления показывает, что основными проблемами построения моделей управляемых систем являются проблемы получения критериальных условий, обеспечивающих достижение цели идентификации, а также нахождение вычислительных алгоритмов, которые используются для построения итерационных процедур методов идентификации.

**Выводы**. В данной главе рассмотрены различные формы представления математических моделей управляемых технических систем, таких как дифференциальные и разностные уравнения, импульсные переходные функции (ИПФ) и передаточные функции. Сформулирована задача идентификации параметров этих динамических характеристик объектов. Выполнен анализ методов и алгоритмов идентификации моделей динамических систем, используемых для их математического описания.

**ГЛАВА 2**

**ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ УПРАВЛЯЕМЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ**

* 1. **Описание нового подхода к параметрической идентификации управляемых систем**

Автоматизация технических объектов и технологических процессов предполагает предварительное построение их математических моделей. В частности, одним из основных этапов динамического проектирования систем автоматического управления (САУ) является идентификация управляемых объектов [7, 12, 13]. В связи с этим в рамках современной теории управления активно развивается теория идентификации динамических систем [7, 12, 13, 39]. При этом проблема синтеза конструктивных и менее трудоемких вычислительных методов и алгоритмов построения моделей объектов управления остается актуальной задачей. В данном подразделе формулируется новый подход к параметрической идентификации динамических характеристик объектов [35-37] на основе критериального условия для целей идентификации управляемых систем. При этом в качестве основных динамических характеристик объектов управления можно использовать:

* импульсные переходные функции (ИПФ);
* дифференциальные и разностные уравнения;
* передаточные функции.

Рассмотрим одномерную динамическую систему (объект управления), на входе которой действует сигнал , а на выходе протекает переходный процесс . Идентификацию параметров объекта будем осуществлять по схеме настраиваемой модели, показанной на рис. 2.1.1.

*y(t)*

Объект управления

Модель объекта управления

КС

*u(t)*

*t)*)

*e(t)*

-

+

Рис.2.1.1. Общая схема идентификации объекта.

Будем считать, что выход объекта (переходный процесс) является известной функцией, определяемой на основе экспериментальных данных. При этом идентифицируемая динамическая характеристика (импульсная переходная функция, передаточная функция и др.) объекта, т.е. его идентифицируемая модель представляется в параметрической форме, в частности, в виде

(2.1.1)

где -мерный вектор, составленный из настраиваемых параметров модели; – начальный и конечный моменты процесса управления.

Ошибка идентификации определяется выражением

.

Предварительно проведем дискретизацию функций по времени:

,

где (N+1) – количество дискретных точек. Тогда ошибки идентификации (невязки) в дискретных точках:

Для оценки качества идентификации на основе невязок введем следующую критериальную (штрафную) функцию:

обладающую тем свойством, что при имело место и где .

В качестве критериальных функций , в частности, можно использовать квадратические или модульные штрафные функции:

* В процессе идентификации контур самонастройки (КС) выполняет две основные функции:

1) осуществляет формирование критериальной функции ;

2) производит настройку элементов вектор-параметра модели объекта путем решения следующей экстремальной задачи:

где – значение вектор – параметра , который принимается в качестве решения задачи параметрической идентификации; - m-мерное арифметическое пространство.

Таким образом задача идентификации модели управляемого объекта сводится к определению такого вектор-параметра , обеспечивающего минимальное значение штрафной функции . При этом обеспечивается близость выхода модели объекта и выхода объекта , т.е. ошибки идентификации в дискретные моменты времени стремятся к нулю.

Для формулировки критериального условия для параметрической идентификации управляемых систем рассмотрим следующую функцию [&]:

где – переменные, характеризующие процесс идентификации.

Проинтегрируем правую часть выражения (2.1.4):

Пусть , где – малое положительное число. Тогда из соотношения (2.1.5) видно, что если для каждого и выполняется условие

(2.1.6)

то модуль штрафной функции убывает с течением времени , так как при этом выполняется неравенство:

(2.1.7)

В результате можно сформулировать следующую теорему [\*\*].

**Теорема.**  Пусть начальное значение штрафной функции и для каждого и при малом значении выполняется условие:

Тогда штрафная функция убывает во времени и

Соотношение (2.1.8) можно рассматривать как критериальное условие, выполнение которого обеспечивает минимизацию штрафной функции . Контур самонастройки (КС) выполняет функцию поддержания критериального соотношения (2.1.8), обеспечивая целенаправленное изменение элементов вектор – параметра модели объекта в желаемом направлении.

В целях использования критериального соотношения (2.1.8) для параметрической идентификации необходимо определить производную штрафной функции по времени :

* Далее путем подстановки в левую часть соотношения (2.1.8) выражения для производной можно вывести систему дифференциальных уравнений, определяющую процесс самонастройки (адаптации) элементов вектор-параметра [??]:

где – функции, определяемые из условия обеспечения критериального соотношения (2.1.8). Методика вывода уравнений (2.1.9) рассматривается в следующих разделах.

Установившиеся решения системы уравнений (2.1.9) и определяют оценку элементов искомого вектор параметра :

В практических расчетах в качестве решения задачи параметрической идентификации можно взять и вектор – параметр , обеспечивающий выполнение следующего условия:

где – достаточно малое положительное число.

Полученные результаты позволяют сформулировать общий алгоритм параметрической идентификации моделей управляемых систем на основе критериального условия (2.1.8). Основные этапы этого алгоритма состоит в следующем:

1. Получение экспериментальных данных в форме «вход-выход» для идентифицируемого объекта управления.
2. Выбор структуры и вектор-параметра модели объекта.
3. Построение штрафной функции
4. Формирование уравнений адаптации (2.1.9) компонентов вектор-параметра .
5. Решение уравнений самонастройки (2.1.9) параметров модели управляемого объекта.
6. Определение искомой оценки вектор-параметра где как установившиеся решения (2.1.10) уравнений самонастройки (2.1.9) или вектор – параметра , удовлетворяющего условию (2.1.11).
   1. **Параметрическая идентификация модели объектов управления по экспериментальным данным**

Предположим, что в дискретные моменты времени с шагом получены экспериментальные данные реакции выхода объекта *y(t)* на входное ступенчатое воздействие *u(t)=1(t):*

,

где (N+1) – количество дискретных точек.

Задача состоит в определении динамической характеристики объекта, заданной в виде переходного процесса на основе дискретных данных (2.2.1). Для целей идентификации неизвестную (настраиваемую) модель объекта представим в следующей параметрической форме:

где – установившееся значение управляемой переменной *y(t)*; – параметрические функции:

, – неизвестные параметры модели, составляющие -мерный вектор – параметр n – порядок модели (количество функций ).

Проведем дискретизацию функции *y*(*t*):

где .

Для краткости записи в дальнейшем шаг дискретизации будем опускать. Введем (*N+1*)-мерные векторы:

где Т – знак транспонирования.

В каждый момент времени ошибки идентификации (невязки) определяются выражениями:

, . (4)

Тогда вектор ошибки идентификации

. ()

Меру близости процессов можно оценить на основе критериальной (штрафной) функции (2.1.2) или некоторой нормой вектора *е*:

()

Проблема идентификации объекта состоит в определении такого вектор-параметра , обеспечивающего минимум штрафной функции :

где – -мерное вещественное арифметическое пространство.

Далее будем считать, что процесс идентификации протекает во времени (). В процессе поиска экстремума функции , вектор-параметр изменяется во времени , следовательно, варьируется и значение функции , т. е..

Теперь рассмотрим возможность использования теоремы, сформулированную в 2.1, для решения экстремальной задачи (2.2.3), что эквивалентно нахождению искомого вектор-параметра модели объекта. Для этого вначале необходимо выбрать соответствующую критериальную функцию . Далее для определенности штрафная функция задается в виде (2.1.2):

Вначале, в целях использования критериального соотношения (2.1.8), определим производные компонентов вектора невязки , определяемых выражением:

где с учетом (2.2.8) частные производные:

Производная выбранной штрафной функции:

С учетом () и () имеем, что

где

С учетом (2.2.10) критериальная функция , определяемая выражением (2.1.4), имеет вид:

где .

Теперь потребуем, чтобы динамика компонентов вектор-параметра подчинялась следующим соотношениям:

где , – неизвестные пока вещественные параметры.

С учетом (2.2.14) критериальная функция (2.2.13) запишется в виде:

Отсюда видно, что если

то будет выполняться критериальное условие (2.1.8).

Полученный результат позволяет сформулировать следующее утверждение.

**Утверждение 1.** Пусть заданы данные по выходу объекта в виде ряда (2.2.1), структура его модели в форме (2.2.2) и штрафная функция по формуле (2.2.13). Тогда уравнения самонастройки (адаптации) элементов вектор-параметра модели (2.2.2) определяются соотношениями (2.1.14), а установившиеся их решения являются оценкой параметров модели (2.2.2).

При этом алгоритм параметрической идентификации объекта включает следующие основные этапы.

1. Проведение эксперимента и получение данных по переходному процессу на выходе объекта в виде вектора .
2. Задание структуры модели объекта в форме (2.2.2).
3. Определение выражений для невязок по формуле (2.2.4).
4. Составление выражений для функций и по формуле (2.2.12).
5. Формирование уравнений самонастройки (2.1.14) элементов вектор-параметра .
6. Решение уравнений самонастройки (2.1.14) и определение вектор-параметра , элементы которого являются оценкой параметров модели объекта (2.2.2).

При этом в качестве функций можно выбрать и ортогональные функции [10, 22], в частности, функции Ляггера [8].

В целях иллюстрации эффективности разработанного метода рассматривается одномерный объект, для которого с дискретным шагом получены экспериментальные данные переходного процесса при N=6 (табл. 2.1).

Таблица 2.2.1 - Экспериментальные данные переходного процесса

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| , сек | 0 | 0.75 | 1.5 | 2.25 | 3.0 | 3.75 | 4.5 |
|  | 0 | 0.75 | 1.03 | 1.15 | 1.2 | 1.23 | 1.24 |

Непрерывная модель неизвестного объекта представляется в форме:

(2.2.17)

где *n*=2; 1.25;

При этом вектор – параметр выбранной модели . Задача идентификации состоит в нахождении вектора p, обеспечивающего минимум штрафной функции , определяемой формулой (2.1.2). Для решения сформулированной задачи использован разработанный в данном разделе алгоритм параметрической идентификации. При этом уравнения контура самонастройки (КС) параметров модели имеют вид:

(2.2.18)

где

.

Для решения системы (2.2.19) использован программный комплекс Matlab, при следующих значениях параметров:

=-150, =-200, =-500, =-800

Динамика самонастройки компонентов вектора в процессе идентификации показана на рис.2.2.1-2.2.4.

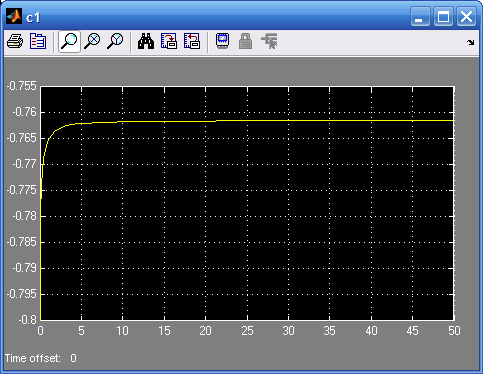
 

Рис. 2.2.1. Динамика параметра *с1* Рис. 2.2.2. Динамика параметра *с2*

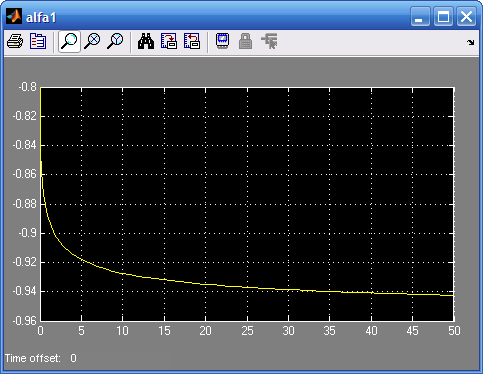
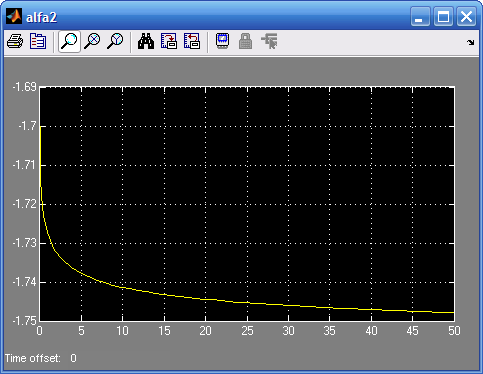
 

Рис.2.2.3. Динамика параметра *a1* Рис.2.2.4. Динамика параметра *a2*

Как видно из графиков установившиеся решения системы (2.2.18):

-0.762, =-0.487,

=-0.949, =-1.748

составляют искомый вектор–параметр =[-0.762, -0.487, -0.949, -1.748].

Для оценки качества идентификации в табл.2.2.2 приведены исходные экспериментальные данные из табл.2.2.1 и результаты, полученные в конце процедуры построения модели объекта.

Таблица 2.2.2 – Данные, полученные в результате построения модели объекта

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| , сек | 0 | 0.75 | 1.5 | 2.25 | 3.0 | 3.75 | 4.5 |
|  | 0 | 0.75 | 1.03 | 1.15 | 1.2 | 1.23 | 1.24 |
|  | 0 | 0.745 | 1.032 | 1.151 | 1.202 | 1.227 | 1.239 |
|  | 0 | -0.005 | 0.002 | 0.001 | 0.002 | -0.003 | -0.001 |

Переходный процесс *y(t)* на выходе объекта и динамика штрафной функции показаны соответственно на рис.2.2.5 и 2.2.6.

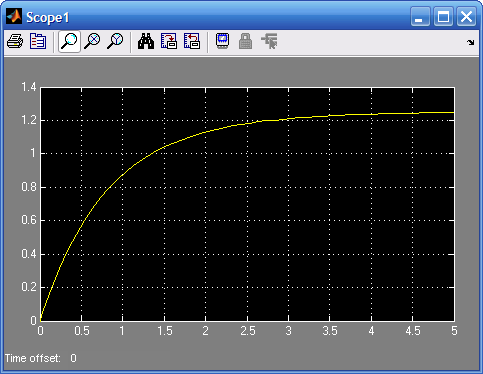
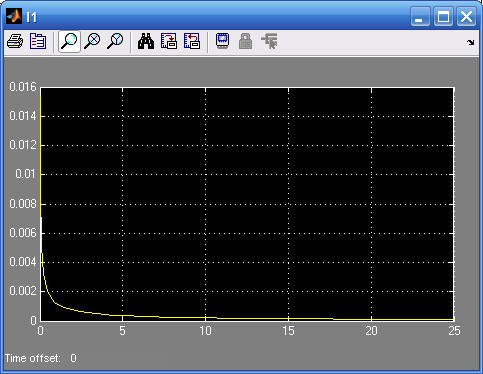
 

Рис.2.2.5. Переходный процесс *y(t)* Рис.2.2.6. Динамика штрафной

функции *E*

Сравнение выходов рассматриваемого объекта управления и его модели с найденными параметрами показывает достаточную их близость, что свидетельствует об эффективности разработанного метода идентификации.

* 1. **Синтез импульсной характеристики управляемого объекта**

Рассматривается одномерный стационарный объект, на входе которого действует единичное ступенчатое входное воздействие . При этом в дискретные моменты времени на его выходе получены значения переходного процесса :

, (2.3.1)

где – шаг дискретизации; - количество дискретных точек.

Задача состоит в том, чтобы по данным наблюдения (2.3.1) определить импульсную переходную функцию (ИПФ) объекта. Как известно, для линейной стационарной системы функциональная связь между ее выходной переменной и входным воздействием при нулевых начальных условиях определяется выражением [3]:

Пусть переходный процесс представлен в следующей параметрической форме:

где функции

(2.3.4)

– неизвестные пока параметры, составляющие m=n-мерный вектор-параметр Далее будем считать, что вектор настраиваемых параметров , а установившееся значение переходного процесса , где .

В случае, когда входной сигнал является ступенчатым, а переходный процесс задается в форме (2.3.3), ИПФ объекта с учетом (2.3.2) определяется в явном виде:

где .

Проведем дискретизацию функции *y*(*t*):

где .

В каждый момент времени между соответствующими значениями рядов (2.3.1) и (2.3.6) существуют невязки (ошибки идентификации):

, . (2.3.7)

Для оценки качества идентификации будем использовать следующую штрафную функцию, определяемую формулой (2.1.2):

которая определяет суммарную квадратическую ошибку.

Теперь проблема идентификации объекта состоит в определении такого вектор – параметра , обеспечивающего минимум штрафной функции :

где – -мерное вещественное арифметическое пространство.

Для решения экстремальной задачи (2.3.9) будем использовать алгоритм, описанный в 2.2. Далее будем считать, что процесс идентификации протекает во времени (). В процессе поиска экстремума функции , вектор-параметр изменяется во времени . В соответствии с этим алгоритмом решение задачи (2.3.8) сводится к решению следующей системы уравнений:

где – отрицательные числа; – функции, определяемые формулой:

При этом установившиеся решения () системы уравнений (2.3.10):

являются искомыми элементами вектор – параметра , т.е. .

Таким образом, в результате идентификации искомая ИПФ объекта имеет вид:

где .

Для иллюстрации изложенной процедуры идентификации рассмотрим следующий пример. Экспериментальные данные, определяющие значения переходного процесса на выходе объекта в дискретные моменты времени с шагом представлены в табл.2.3.1 (*N*=10).

Таблица 2.3.1 – Экспериментальные данные переходного процесса

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|  | 0 | 0.5 | 1 | 1.5 | 2 | 2.5 | 3 | 3.5 | 4 | 4.5 | 5 |
|  | 0 | 0.46 | 0.68 | 0.811 | 0.885 | 0.93 | 0.96 | 0.975 | 0.985 | 0.99 | 0.994 |

Непрерывная модель неизвестного объекта представляется в форме (2.3.3):

где *n*=4; 0.994;

При этом вектор – параметр выбранной модели . Выполним дискретизацию непрерывной функции в точках :

где

Далее определяем невязки:

и штрафную функцию:

Функции , определяемые формулами (2.3.10) , имеют вид:

Алгоритм самонастройки параметров модели, обеспечивающий минимизацию штрафной функции , определяется следующими уравнениями:

Для решения системы (2.3.12) использован программный комплекс Matlab [40], при следующих значениях параметров:

=-900, =-900=-2000, =-2000

и начальных условиях ():

.

Динамика самонастройки компонентов вектора в процессе идентификации показана на рис.2.3.1-2.3.4.

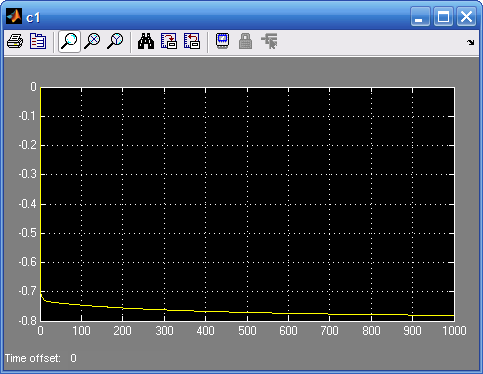
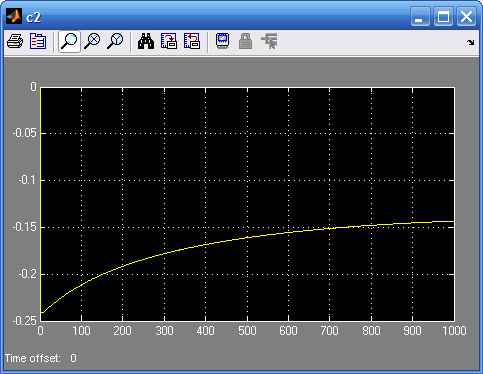
 

Рис. 2.3.1. Динамика параметра *с1* Рис. 2.3.2. Динамика параметра *с2*

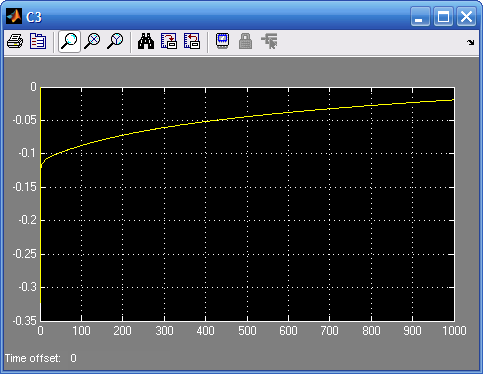
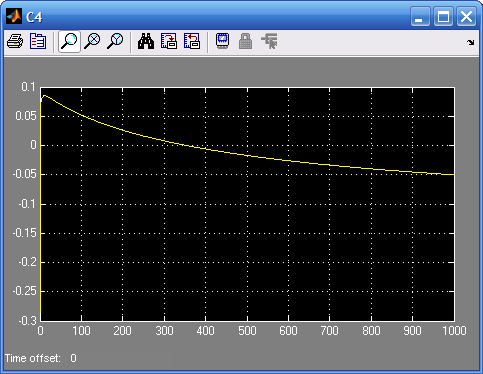
 

Рис. 2.3.3. Динамика параметра *с3* Рис. 2.3.4. Динамика параметра *с4*

Как видно из графиков установившимися решениями системы (2.3.12) являются:

-0.78, =-0.143, -0.02, -0.05.

В соответствии с выше изложенным алгоритмом полученный вектор – параметр =[-0.78, -0.143, -0.02, -0.05] является решением задачи идентификации модели объекта (2.3.3).

Таким образом, с учетом (2.3.5) искомая ИПФ имеет вид:

где коэффициенты имеют следующие численные значения:

0.78, 0.286, 0.06, 0.2.

Для оценки качества идентификации в табл.2.3.2 приведены исходные экспериментальные данные из табл.2.3.1 и результаты, полученные в конце процедуры построения модели объекта.

Таблица 2.3.2 – Данные, полученные в результате построения модели объекта

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|  | 0 | 0.5 | 1 | 1.5 | 2 | 2.5 | 3 | 3.5 | 4 | 4.5 | 5 |
|  | 0 | 0.46 | 0.68 | 0.811 | 0.885 | 0.93 | 0.96 | 0.975 | 0.985 | 0.99 | 0.994 |
|  | 0 | 0.459 | 0.691 | 0.818 | 0.892 | 0.935 | 0.961 | 0.977 | 0.986 | 0.991 | 0.995 |
|  | 0 | -0.001 | 0.011 | 0.007 | 0.007 | 0.005 | 0.001 | 0.002 | 0.001 | 0.001 | 0.001 |

Полученный в результате идентификации объекта переходный процесс *y(t)* и динамика штрафной функции показаны соответственно на рис. 2.3.5 и 2.3.6.

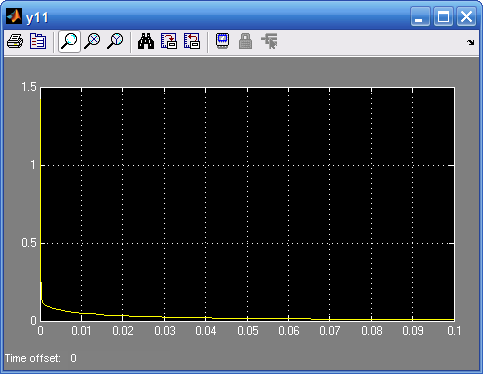
 

Рис. 2.3.5. Переходный процесс *y(t)* Рис. 2.3.6. Динамика штрафной

функции *I(t)*

Анализ результатов решения иллюстративного примера показывает, что на основе предложенного в 2.1 подхода к параметрической идентификации динамических характеристик объекта управления можно построить достаточно эффективные процедуры синтеза импульсных переходных функций одномерных управляемых объектов. Подход позволяет обобщение на многомерные стационарные системы.

* 1. **Идентификация параметров линейного дискретного объекта управления**

Пусть имеется некоторый дискретный объект управления, имеющий выходную переменную и входное воздействие . Допустим, что для этого объекта экспериментальным путем в дискретные моменты времени получены данные «вход - выход» [35]:

(2.4.1)

,

где – шаг дискретизации по времени; *N*+1 – количество точек дискретизации.

Предполагается, что структура модели рассматриваемого объекта управления задается следующим линейным разностным уравнением:

где , – вещественные параметры объекта, которые образуют -мерный вектор – параметр , ; *n* и *r* – целые положительные числа. Будем считать, что *n*>*r*.

Задача идентификации состоит в определении такого вектор – параметра , обеспечивающего достаточную близость переменной *y*(*k*) модели (2.4.1) и выхода объекта в дискретные моменты времени .

Для решения сформулированной задачи будем использовать алгоритм параметрической идентификации, предложенный в 2.1 и описанный в [5]. В соответствии с этим алгоритмом вначале вводятся невязки:

где

Оценка качества идентификации осуществляется на основе штрафной функции (2.1.2):

Для минимизации оценочной функции используется теорема, сформулированная в 2.1, а именно - критериальное соотношение (2.1.8):

Для вывода уравнений самонастройки будем использовать результаты, полученные в 2.2. При этом для поддержания соотношения (2.4.5) динамика параметров и должна подчиняться следующим уравнениям:

где , – вещественные отрицательные числа; , функции, определяемые формулами

В результате установившиеся решения системы уравнений (2.4.7):

являются оценками параметров разностного уравнения (2.4.2), т.е. вектор-параметр .

Для иллюстрации изложенной процедуры идентификации рассмотрим следующий пример. Предположим, что в результате эксперимента в дискретные моменты времени с шагом 0.2с. получены данные «вход – выход», которые приведены в табл.2.4.1. При этом считается, что на входе объекта действует единичное ступенчатое воздействие, т.е. *u()=*1, а N=12.

Таблица 2.4.1

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| *k* | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|  | 0 | 0.2 | 0.4 | 0.6 | 0.8 | 1.0 | 1.2 | 1.4 | 1.6 | 1.8 | 2.0 | 2.2 | 2.4 |
|  | 0 | 0.18 | 0.5 | 0.775 | 0.96 | 1.045 | 1.065 | 1.055 | 1.03 | 1.015 | 1.006 | 1.002 | 1.0 |

Структуру модели объекта в форме «вход – выход» зададим в виде:

, (2.4.9)

т.е. *n*=2, а *m*=0.

Задача состоит в определении вектор-параметра на основе данных, представленных в табл.2.4.1.

В соответствии с предложенной методикой идентификации штрафная функция

где

При этом выходная переменная модели объекта

Уравнения самонастройки параметров (2.4.6) запишутся в виде

(2.4.11)

где

Для решения системы уравнений (2.4.11) использован программный комплекс Matlab Simulink при следующих зна

=-700, -700, =-700

и начальных условиях

=-1.0, =0.4, =0.3.

Процесс самонастройки компонентов вектора в процессе идентификации показана на рис. 2.4.1-2.4.3, а динамика штрафной функции на рис. 2.4.4.

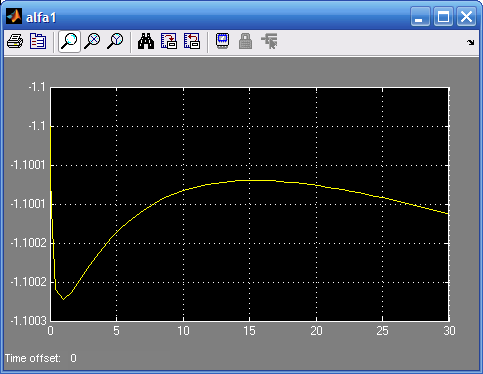
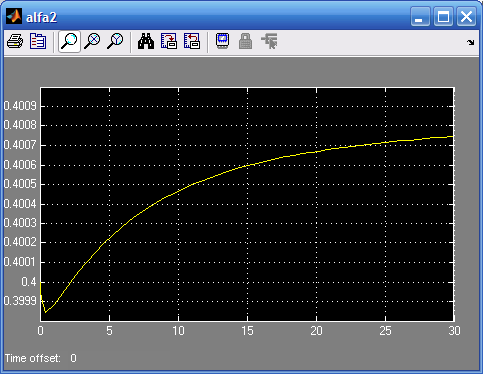
 

Рис.2.4.1. Процесс самонастройки Рис. 2.4.2. Процесс самонастройки

параметра параметра

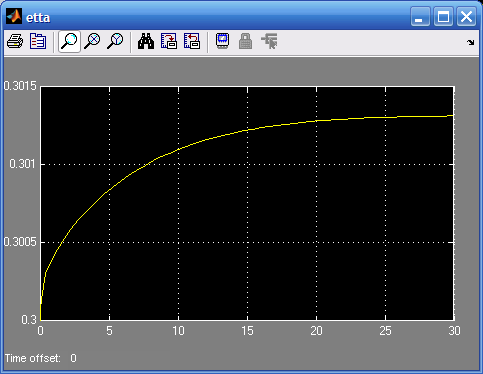
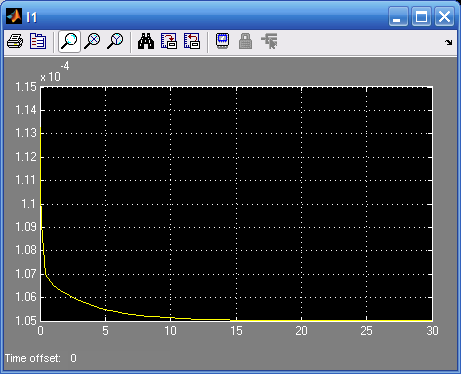
 

Рис. 2.4.3. Процесс самонастройки Рис. 2.4.4. Динамика штрафной

параметра функции

Как видно из графиков установившимися решениями системы (2.4.11) являются:

=-1.1, =0.4, =0.3.

Таким образом, в качестве оценки вектор-параметра дискретной модели объекта (2.4.9) можно принять [-1.1, 0.4, 0.3].

В табл. 2.4.2 представлены результаты из табл. 2.4.1 и дискретные значения переменной *y(k)*, , полученные на основе соотношения (2.4.10) при , , =.

Таблица 2.4.2 - Дискретные значения переменной *y(k)*

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| *k* | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|  | 0.4 | 0.6 | 0.8 | 1.0 | 1.2 | 1.4 | 1.6 | 1.8 | 2.0 | 2.2 | 2.4 |
|  | 0.5 | 0.775 | 0.96 | 1.045 | 1.065 | 1.055 | 1.03 | 1.015 | 1.006 | 1.002 | 1.0 |
|  | 0.499 | 0.779 | 0.954 | 1.047 | 1.066 | 1.054 | 1.06 | 1.05 | 1.03 | 1.005 | 1.001 |
|  | 0.001 | -0.004 | 0.006 | -0.002 | -0.001 | 0.001 | -0.03 | -0.035 | 0.024 | 0.003 | 0.001 |

Переходный процесс y(t) на выходе объекта показан на рис. 2.4.5.

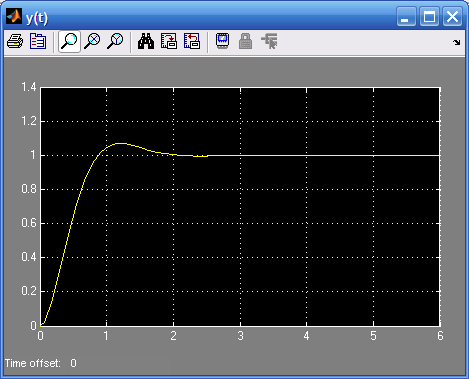


Рис. 2.4.5. Переходный процесс y(t)

Анализ результатов решения иллюстративного примера показывает, что на основе изложенного алгоритма можно построить достаточно эффективные процедуры параметрической идентификации моделей дискретных одномерных управляемых объектов в форме «вход – выход». Предложенную процедуру можно обобщить на случай идентификации параметров непрерывных многомерных динамических объектов управления.

**Выводы.** В главе 2 работы разработан альтернативный подход к решению задач параметрической идентификации динамических объектов управления, который основывается на новом критериальном условии. Анализ полученного условия показал, что оно дает возможность формировать уравнения адаптации компонентов вектор-параметра модели объекта , обеспечивающее достижение цели идентификации.

**ГЛАВА 3**

**ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ И ХАРАКТЕРИСТИК РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ В СОСТАВЕ АСКУЭ**

* 1. **Состояние проблемы совершенствования современных АСКУЭ**

Как известно, энергетический комплекс Кыргызской Республики (КР) состоит из трех взаимосвязанных систем: генерирующей, транспортирующей и распределительной. Выработанная генерирующей системой (ГЭС, ТЭЦ) электрическая энергия подводится на вход транспортирующей системы (высоковольтные электрические сети), которая поставляет энергию к распределительным электрическим сетям (РЭС) напряжением 0,4 кВ. Управление этими системами осуществляют: ОАО «Электрические станции», «Национальные электрические сети Кыргызстана» и распределительные компании «Северэлектро», «Востокэлектро», «Ошэлектро», «Жалалабадэлектро». На вход распредкомпаний в 2018 г. поступило 12,1536 млрд. кВт.ч энергии, которая через РЭС подана потребителям (абонентам) электроэнергии, что больше на 0, 484 млн. кВт.ч чем в 2017 г.

В настоящее время в целях комплексной автоматизации и информатизации процессов энергопотребления в РЭС стали внедряться автоматизированные системы контроля и учета электроэнергии (АСКУЭ) [41-44]. Как известно, структура таких автоматизированных систем состоит из двух или трех иерархических уровней. Общая структура двухуровневой системы показана на рис.3.1. Она включает два уровня: верхний и нижний уровни управления. Основу верхнего уровня составляет вычислительный комплекс (ВК), расположенный в центральном диспетчерском пункте управления (ЦДПУ). Комплекс технических средств (КТС) нижнего уровня включает: концентратор данных (КД); группу счетчиков электроэнергии (Сч), установленных у потребителей (абонентов); телекоммуникационные модули (ТКМ), которые строятся по технологии PLC, GSM и входят в состав КД и Сч.

**…**

**…**

**…**

Нижний уровень

ВК ЦДПУ

 КД1

Верхний уровень

* 1
* 2
* 3

Сч1

Сч2

Счn

**. . .**

КДN

КД2

Сч1

Сч2

Счm

Сч1

Сч2

Счk

* 1
* 2
* 1
* 2
* 3
* 1
* 2
* 3
* 1
* 2
* 3

**. . .**

**. . .**

Рис. 3.1.1. Общая структура двухуровневой АСКУЭ

Счетчики электроэнергии обеспечивают измерение потребляемой абонентами мощности и количества энергии, а также токов и напряжений на нагрузках потребителей. Концентратор данных строится на основе микропроцессорной техники, который, в основном, располагается в трансформаторной подстанции РЭС, и выполняет функции сбора данных со счетчиков, их хранение и обработку с целью решения соответствующих функциональных задач нижнего уровня (оценка потерь электроэнергии в РЭС, контроль технического состояния Сч, управление нагрузкой абонентов и др.), а также для передачи необходимых данных на верхний уровень. В ВК ЦДПУ (центральный компьютер, сервер базы данных, автоматизированные рабочие места) осуществляется сбор, хранение, обработка и анализ данных, полученных от концентраторов (КД) нижних уровней с целью решения соответствующих функциональных задач (расчет потерь электроэнергии, составление энергобаланса по системе; принятие управленческих решений; формирование документов, связанных с отчетностью и оплатой за потребленную абонентами электроэнергию, взаимодействие с внешними информационными системами и др.). Функцию обмена информацией между верхним и нижним уровнями системы выполняют различные типы ТКМ (PLC, GSM и др.) [45, 46].

Основные достоинства АСКУЭ заключаются в следующем:

1. автоматизация процесса сбора данных со счетчиков электроэнергии без участия инспекторов (контролеров) энергосбыта;
2. исключение человеческого фактора при сборе данных об энергопотреблении, что позволяет устранить коррупционные схемы;
3. автоматическое отключение нагрузки абонента при несвоевременной оплате за использованную электроэнергию;
4. автоматическое отключение нагрузки абонента при превышении установленного лимита по потребляемой мощности в соответствии с техническими условиями на подключение энергии;
5. оперативное составление энергобаланса в системе.

Главный недостаток существующих АСКУЭ заключается в том, что они являются информационно-измерительными системами и поэтому, в основном, предназначены для коммерческого учета электроэнергии [42, 43]. Следовательно, они по существу не имеют технических и программных средств для борьбы с источниками потерь электроэнергии. Здесь следует отметить, что так называемые «умные счетчики» не имеют ни технических, ни программных средств для устранения указанных источников потерь электроэнергии. Средства, включенные в состав современных электронных счетчиков [47-49] позволяют лишь дистанционное отключение нагрузки абонента при несвоевременной оплате за использованную электроэнергию, а также при превышении установленного лимита по потребляемой мощности в соответствии с техническими условиями на подключение энергии.

Необходимо отметить, что современные электронные счетчики по сравнению с индукционными имеют расширенный состав измеряемых величин. В частности, функциональная структура этих приборов включает следующие функции [47, 48]:

1. измерение действующих значений токов и напряжений на нагрузках распределительных сетей;
2. измерение коэффициентов мощностей;
3. измерение активных и реактивных мощностей.

Эти дополнительные функциональные возможности электронных счетчиков можно использовать для расширения состава функций существующих АСКУЭ и повышения их эффективности.

Существующая частично автоматизированная система учета и контроля электроэнергии республики, включающая в настоящее время ряд АСКУЭ, допускает высокий уровень технических и коммерческих потерь электроэнергии из-за существенного влияния ряда факторов, к которым, в частности, относятся несимметрия токов и напряжений в сети [50-53], несанкционированные отборы (хищения) электроэнергии (НОЭ), недостаточная точность приборов учета, а также изношенность технического оборудования системы. Официальные статистические данные по потерям электроэнергии за последние годы приведены в табл.3.2 [54].

Таблица 3.1.1 – Данные по потерям электроэнергии по КР

|  |  |
| --- | --- |
| **Годы** | **Относительный уровень потерь**  **(%)** |
| 2010 год | 26,8 |
| 2012 год | 21,2 |
| 2014 год | 18,2 |
| 2015 год | 14,9 |
| 2016 год | 13,9 |
| 2017 год | 13,1 |
| 2018 год | 12,7 |

Несмотря на то, что распределительными компаниями ведется определенная работа по снижению потерь электроэнергии, как видно из этих данных, уровни потерь остаются достаточно высокими и в 2018 году составили порядка 12,7%, что составляет 1,5439 млрд кВт час электроэнергии. Потери электроэнергии в развитых странах в среднем составляют 6-7%. Таким образом, в распределительных сетях Республики имеется возможность для снижения потерь электроэнергии. Анализ показывает, что для этой цели, в частности, необходимо совершенствование функциональных и технических возможностей внедряемых в настоящее время АСКУЭ на объектах распредкомпаний.

Как известно, суммарные объемы технических и коммерческих потерь электроэнергии в сетях напряжением 0,4 кВ можно рассматривать в качестве одного из основных показателей эффективности функционирования РЭС и АСКУЭ. При этом можно выделить следующие основные источники потерь электроэнергии:

1. несимметрия нагрузки фаз линий и параметров сети (токов и напряжений) [50-53];
2. несанкционированные отборы (хищения) электроэнергии и утечки токов в сети [55-59];
3. наличие в сети нелинейных нагрузок (электроприемников) потребителей, вызывающих несинусоидальность токов [60, 61];
4. износ силовых электрических линий [62] и высокое сопротивление контактных соединений проводов [63];
5. обрывы линий электроснабжения РЭС [64].

Кроме этого на качество работы РЭС влияют отклонения напряжений и частоты от их номинальных значений.

Несимметрия нагрузки фаз линий и параметров сети приводит к повышенным потерям электроэнергии в силовых линиях (фазных и нулевом проводах) и трансформаторной подстанции (ТП) [50, 53]. По данным научных исследований в линиях с распределенной нагрузкой при относительном отклонении токов фаз от их среднего значения в диапазоне 0,3 – 0,5 технические потери возрастают в среднем на 35%. Результаты экспериментальных исследований по определению потерь электроэнергии в системах электроснабжения индивидуального жилищного строительства показывают, что технические потери от несимметрии в линиях электропередач и трансформаторной подстанции составляют более 6% от общего объема потребляемой электроэнергии в РЭС [67]. Как известно, при несимметричном режиме РЭС возрастает вероятность выхода из строя бытовой техники и промышленных установок, а также сокращаются сроки эксплуатации функциональных элементов (КТП, линий электропередач и др.) РЭС [51].

В настоящее время наиболее актуальной является и борьба с несанкционированными отборами электроэнергии (НОЭ), так как объемы хищений все еще остаются и не поддаются точной оценке. Поэтому оперативная локализация НОЭ в сети в составе АСКУЭ [55-58] дает возможность значительно сократить коммерческие потери электроэнергии за счет своевременного принятия соответствующих мер. Непрерывная диагностика состояний электрических линий позволяет оценить уровень их износа [62], а также своевременно идентифицировать обрывы фазных и нулевых проводов распределительных сетей [64-66], что также важно для уменьшения потерь электроэнергии и поддержания сети в нормальном состоянии. Актуальной проблемой является также проблема раздельной оценки технических и коммерческих потерь электроэнергии в РЭС, так как в существующих АСКУЭ такая функция отсутствует, в них формируется лишь информация об общих – суммарных потерях электроэнергии [41-43].

В настоящее время в НАН КР совместно с НПО «МИР» (Россия, г.Омск) ведутся работы по созданию коммутатора фазных токов (КФТ) в составе электронного счетчика электроэнергии.

1. В НАН КР ведутся научно-исследовательские работы по разработке научных и методологических основ моделирования распределительных сетей напряжением 0,4 кВ в условиях несимметрии токов и напряжений, а также новых технологий, ориентированных для совершенствования существующих АСКУЭ. В Институте автоматики и информационных технологий были разработаны:

* система дистанционного съема и сбора информации об энергопотреблении;
* прибор учета с картой предоплаты за потребленную энергию.

Как известно, несколько лет назад распредкомпаниями были разработаны и частично реализованы пилотные проекты для отдельных объектов («Востокэлектро» и «Северэлектро») по внедрению электронных счетчиков с картой предоплаты, направленные на снижение уровня дебиторской задолженности потребителей. Здесь следует отметить, что с помощью таких мероприятий невозможно кардинально решить такие острые проблемы, как выявление и предотвращение несанкционированного отбора (хищения) электроэнергии, оптимизация режима работы распределительной сети и контроль за состоянием приборов учета и технологического оборудования, оценка технических и коммерческих потерь, составление баланса энергопотребления. Другими словами, счетчики с картой предоплаты осуществляют лишь частичную автоматизацию процессов энергопотребления в РЭС. Поэтому распредкомпаниями республики принята концепция системного подхода к решению рассматриваемой проблемы, предусматривающая комплексную автоматизацию и информатизацию распределительных сетей напряжением 0,4 кВ. Анализ процессов автоматизации и информатизации РЭС показывает, что к настоящему времени более 80% распределительных сетей остаются не охваченными системами АСКУЭ.

Таким образом, сегодня наиболее актуальной является проблема дальнейшего совершенствования существующих АСКУЭ, позволяющего повысить их эффективность за счет комплексной автоматизации и информатизации процессов в РЭС. При этом основное направление такого совершенствования – это создание информационно-управляющих систем, которые должны включать в своем составе новые функциональные подсистемы, предназначенные, в частности, для решения в режиме реального времени следующих задач:

1. идентификации и локализации мест несанкционированного отбора электроэнергии и утечек тока в трехфазной сети;
2. оптимизации режима работы распределительной сети в условиях несимметрии токов и напряжений;
3. диагностики состояний магистральных линий РЭС;
4. идентификации и мониторинга технических и коммерческих потерь электроэнергии в распределительной сети.

Разработка и использование указанных подсистем в составе АСКУЭ позволит:

1) значительно сократить технические и коммерческие потери электроэнергии;

2) повысить технико-экономические показатели АСКУЭ и распределительных компаний;

3) улучшить качество электроснабжения.

В 2017 г. Жогорку Кенешем КР принято Постановление ЖК КР (№1478-VI от 05.04.2017г.), в соответствии с которым Нацэнергохолдингу КР дано поручение разработать и практически реализовать целевой проект по совершенствованию АСКУЭ, внедряемых на объектах распределительных компаний республики, совместно с НАН КР.

**3.2. Идентификация параметров трехфазной распределительной сети по данным АСКУЭ**

Дальнейшее повышение эффективности внедряемых в настоящее время автоматизированных систем контроля и учета электроэнергии (АСКУЭ) [41- 43] перед их разработчиками ставит решение ряда важных технических и теоретических проблем. Так, в современных АСКУЭ практически отсутствуют алгоритмические и программные средства, предназначенные для реализации таких важных диагностических и оптимизационных задач, как идентификация обрывов [64-66] и уровня износа магистральных линий РЭС [62], локализация утечек тока в сети, включая несанкционированные отборы электроэнергии [58, 59], а также управление и оптимизация режимов работы РЭС [68-72] за счет симметрирования фазных нагрузок [73-77]. В результате не удается в полной мере использовать потенциальные возможности цифровых технологий, используемых при создании АСКУЭ, что не позволяет достичь достаточно высокий уровень технико-экономических показателей внедряемых автоматизированных систем и распределительных компаний. Таким образом, проблема совершенствования существующих АСКУЭ тесно связана с разработкой новых моделей и методов, адаптированных к условиям функционирования распределительных сетей, для большинства которых характерны такие факторы как несимметрия токов и напряжений [50, 52, 53], а также периодическая изменчивость параметров магистральных линий РЭС в зависимости от климатических и других условий. Один из подходов в этом направлении – это проблема идентификации параметров распределительных сетей. Известные методы параметрической идентификации [78-82] в недостаточной степени адаптированы для их применения в режиме реального времени.

В [83-85] предложены вычислительные схемы, предназначенные для определения параметров четырехпроводной РЭС напряжением 0,4 кВ, функционирующей в условиях несимметрии токов и напряжений. При этом предварительно решается задача математического описания токов и напряжений на нагрузках сети в комплексной форме с определением их неизвестных фазовых сдвигов, что в определенной степени усложняет проблему нахождения искомых параметров. В данном разделе предлагается метод параметрической идентификации несимметричной РЭС, вычислительная схема которого базируется только на измерительных данных АСКУЭ, полученных по каналам связи с абонентских счетчиков электроэнергии, что упрощает процедуру идентификации искомых параметров сети. Алгоритм метода ориентирован для создания алгоритмического и специального программного обеспечения подсистемы оперативного мониторинга потерь электроэнергии и диагностики состояний межабонентских участков магистральной линии распределительной сети в составе АСКУЭ.

**Постановка задачи.** В качестве объекта рассматривается четырехпроводная РЭС, расчетная схема которой показана на рис.3.2.1.

. . .

. . .

**~**

**~**

**~**

Рис.3.2.1. Расчетная схема трехфазной сети

Обозначения имеют следующий смысл: - индексные переменные, обозначающие соответственно номера фаз А, В, С и электрических контуров сети ; ЭДС -ой фазы; , – мгновенные синусоидальные напряжения и токи соответственно на входах соответствующих фаз;, – синусоидальные мгновенные ток, напряжение и сопротивление нагрузки (электроприемника) с координатой ; – мгновенный ток и комплексное сопротивление -го межабонентского участка (МАУ) -ой фазы; , – напряжения соответственно на -ом МАУ -й фазы и нейтрального провода; *, –* мгновенный ток и комплексное сопротивление -го участка нейтрального провода.

Далее предполагается, что выполняются следующие условия:

1) трехфазная сеть является линейной системой;

2) фазные и нейтральные провода сети имеют одинаковые сечения, т.е. межабонентские сопротивления ;

3) в системе используются технические средства для подавления высших гармонических составляющих токов и напряжений в сети;

4) со счетчиков электроэнергии (), установленных у абонентов сети и в трансформаторной подстанции, в базу данных АСКУЭ по каналам связи в дискретные моменты времени с шагом дискретизации ( поступают следующие данные:

* действующие значения токов и напряжений на нагрузках сети;
* коэффициенты мощности , определяемые фазовыми сдвигами между соответствующими напряжениями и токами ().

Как известно, в существующих АСКУЭ межабонентские комплексные токи  и напряжения , не идентифицируются и не контролируются. В то же время в АСКУЭ имеется возможность их определения по данным со счетчиков электроэнергии системы, что позволяет осуществлять оперативный мониторинг электрического состояния РЭС [55, 56, 86]. При этом, мгновенные синусоидальные токи , напряжения на соответствующих нагрузках и их сопротивления в установившемся режиме можно представить в комплексной форме [56, 87]:

*,* (3.2.1)

*,*

(3.2.2)

где символы «в» и «м» обозначают вещественные и мнимые части соответствующих комплексных переменных; модули этих переменных. При этом

*,*

где , – приращения фазовых сдвигов относительно их номинальных значений , обусловленные несимметрией токов и напряжений в сети. В случае, когда построена модель нагрузок в форме (3.2.1) и (3.2.2) межабонентские токи и напряжения можно оценить на основе известных законов электротехники [87] (рис.3.2.1), т.е.:

*, ,*

где , действующее значение и приращение фазового сдвига межабонентского комплексного тока соответственно.

Введем вектор , составленный из оценок сопротивлений в текущем интервале наблюдения :

.

В результате вектор параметров распредсети (сопротивлений) межабонентских участков сети можно определить на основе модели РЭС, представленной системой соотношений (3.2.1) – (3.2.4). Как видно из этих соотношений для их оценки необходимо, чтобы предварительно были определены фазовые сдвиги токов и напряжений на нагрузках сети, что является отдельной задачей. Дальнейшие исследования показали, что указанные выше параметры можно определить без предварительного представления токов и напряжений сети в комплексной форме.

Задача заключается в том, чтобы на основе данных АСКУЭ, полученных со счетчиков электроэнергии, идентифицировать вектор параметров межабонентских участков несимметричной трехфазной сети в режиме реального времени.

Решение сформулированной выше задачи включает следующие основные этапы:

1. Определение соотношенийдля идентификации параметров.
2. Оценка разностей фазовых сдвигов.
3. Идентификация параметров трехфазной сети.

*Определение соотношений* *для идентификации параметров*. Предположим, что в момент времени путем опроса счетчиков электроэнергии в базу данных АСКУЭ поступили данные измерений, перечень которых приведен выше. Рассмотрим фазы трехфазной сети, показанной на рис.3.2.1. Эквивалентные сопротивления й фазы можно вычислить по данным головного трехфазного счетчика электроэнергии:

где , , , – модуль, аргумент, вещественные и мнимые части комплексной величины соответственно, определяемые по исходным данным задачи по формулам

.

С другой стороны для можно записать следующие выражения:

где

С учетом выражений (3.2.1) – (3.2.3) при формулы (3.2.7) для эквивалентных сопротивлений можно представить в виде

где величины их модулей и разностей фазовых сдвигов определяются по формулам

а вещественные и мнимые части

Теперь приравнивая правые части соотношений (3.2.5) и (3.2.6) с учетом (3.2.8) получаем

Для краткости записи далее вводятся следующие обозначения:

.

На основе равенств (3.2.9) можно записать функциональные зависимости между неизвестными параметрами и :

,

где , известные комплексные величины, определяемые выражениями

При этом их вещественные и мнимые части вычисляются по формулам

,

*Оценка разностей фазовых сдвигов*. Введем в рассмотрение вектор-параметр , состоящий из неизвестных разностей фазовых сдвигов . Для их оценки выражения (3.2.10) запишем для каждой фазы, т.е. для каждого целого значения:

Путем деления соответствующих левых и правых частей первого уравнения системы (3.2.11) на соответствующие части второго и третьего уравнений получаем следующие равенства:

которые представим в виде

где

Соотношение (3.2.12) представляет собой систему уравнений относительно компонентов вектор-параметра . Для ее решения предварительно систему уравнений (3.2.12) представим в тригонометрической форме:

Для того, чтобы полученные соотношения выполнялись должны соблюдаться условия равенства их соответствующих вещественных и мнимых частей. После несложных преобразований эти условия можно записать в виде системы следующих уравнений:

Теперь первое уравнение представим в виде

левую часть которого подставляем в третье уравнение системы (3.2.13). В результате получаем систему алгебраических уравнений относительно компонентов вектор параметра :

Для решения системы алгебраических уравнений (3.2.14) можно применять известные численные методы [26, 88, 89]. Далее для этой цели будем использовать методику, изложенную в главе 2 и в статьях [35, 37, 90]. В соответствии с ней на основе соотношений (3.2.14) в начале определяются ошибки идентификации , и :

Далее для решения системы уравнений (3.2.14) в рассмотрение вводится квадратическая критериальная (штрафная) функция:

. (3.2.16)

В результате задача определения вектора , обеспечивающего минимум штрафной функции , сводится к решению следующей экстремальной задачи:

(3.2.17)

где – трехмерное арифметическое пространство; - искомый вектор-параметр.

Для решения экстремальной задачи (3.2.17) используется следующее критериальное условие:

выполнение которого обеспечивает минимизацию штрафной функции во времени *t.* Поиск искомых параметров на основе соотношений (3.2.18) осуществляется посредством уравнений адаптации компонентов вектора во времени. Для получения этих уравнений в начале определяется производная штрафной функции:

Производные , и на основе выражений (3.2.15) определяются по следующим формулам:

Подставляя полученные производные в выражение для , определяемое формулой (3.2.19), получаем

Теперь подставляя выражение для в соотношение (3.2.19) на основе методики, изложенной в [37, 90], получаем следующие уравнения адаптации искомого вектор-параметра :

где значение вектор – параметра в начальный момент времени ; , , функции, определяемые по формулам

,

*, ,* – вещественные отрицательные числа, т.е. *, .*

Далее определяем установившиеся решения системы дифференциальных уравнений (3.2.15):

.

При достаточно малом значении , близком к нулю, компоненты найденного вектора являются оценками искомых разностей фазовых сдвигов, т.е. , , .

*Идентификация параметров трехфазной сети*. В результате по найденному значению вектора на основе одного из равенств системы соотношений (3.2.11) можно вычислить искомый параметр , например:

Далее переходим к идентификации неизвестного параметра межабонентских участков сети при . Для этой цели необходимо предварительно идентифицировать действующие значения (модули) межабонентских комплексных токов и соответствующих разностей фазовых сдвигов . В начале определим . Как видно из рис.3.2.1 комплексные токи , протекающие через соответствующие межабонентские фазные провода сети, определяются выражениями

Для квадратов действующих значений (модулей) комплексных токов можно записать следующие формулы:

(3.2.22)

При этом для их составляющих справедливы следующие выражения:

где действующие значения токов, протекающих через соответствующие сопротивления и .

В результате на основе выражений (3.2.22) с учетом (3.2.23) и получаем следующие формулы для искомых величин :

Теперь переходим к определению неизвестных разностей фазовых сдвигов (). Для этой цели вначале на основе соотношений (3.2.6) находим значения эквивалентных сопротивлений :

где сопротивления вычисляются соответственно по формулам (3.3.5) и (3.2.21).

С другой стороны для справедливы следующие равенства (рис.3.2.1):

где эквивалентное сопротивление определяется выражением

Соотношения (3.2.25) можно рассматривать как систему уравнений относительно неизвестных сумм . После несложных преобразований ее решение можно записать в следующем виде:

где известное комплексное сопротивление, значение которого определяется по формуле

а сопротивление определяется по формуле (3.3.8).

Аналогично предыдущему случаю, выражения для с учетом (3.2.1) – (3.2.3) можно записать в виде

где

а определяется по формуле

Теперь с учетом (3.2.27) из соотношений (3.2.26) определяем функциональные зависимости между неизвестными величинами и :

,

где комплексные величины и являются известными параметрами и определяются по формулам

а их вещественные и мнимые части

,

Теперь выражения (3.2.28) как и ранее запишем для каждой фазы сети, т.е. для каждого целого значения :

Соотношения (3.2.29) аналогичны соотношениям (3.2.11). Следовательно, для нахождения разностей фазовых сдвигов , , и искомого сопротивления можно использовать вычислительную схему, использованную для определения , , и сопротивления .

Таким образом, продолжая указанную выше процедуру для каждого контура сети при можно идентифицировать численные значения остальных параметров межабонентских участков трехфазной сети, т.е. сопротивления , , …, .

Полученные выше результаты позволяют сформулировать следующий обощенный (укрупненный) алгоритм идентификации параметров трехфазной несимметричной распредсети, который показан на рис.3.2.2.

Нет

Начало

Опрос абонентских счетчиков электроэнергии и запись в базу данных исходных данных ()

Определение разностей фазовых сдвигов

Идентификация искомого параметра электрического контура с номером

Вывод искомого вектора

параметров

Конец

Да

Рис.3.2.2. Обощенный алгоритм идентификации параметров несимметричной распредсети

При этом алгоритм идентификации параметров го межабонетского участка несимметричной распредсети имеет следующий вид.

* + 1. Вычисление эквивалентных сопротивлений для каждой фазысети () по формулам (3.2.5).
    2. Оценка вещественных и мнимых частей комплексных величин () для заданного .
    3. Формирование систем алгебраических уравнений (3.2.14).
    4. Определение ошибок идентификации , по формулам (3.2.15).
    5. Формирование критериальных (штрафных) функций по формулам (3.2.16).
    6. Формирование системы дифференциальных уравнений (3.2.20).
    7. Решение экстремальных задач (3.2.17) на основе решения системы дифференциальных уравнений (3.2.20) и определения .
    8. Оценка вектора искомых разностей фазовых сдвигов на основе установившихся решений дифференциальных уравнений (3.2.20).
    9. По найденному вектору оценка искомого параметра го межабонентского участка сети по формуле

Далее по паспортным данным проводов магистральной линии распредсети предварительно можно определить и записать в базу данных концентратора (КД) базовый вектор , составленный соответственно из номинальных значений параметров сети :

.

Анализ показывает, что знание векторов и позволяет решить задачу диагностики состояний межабонентских участков магистральной линии трехфазной распредсети. Для этой цели используются данные идентификации текущих параметров РЭС, т.е. текущего значения вектора и базового вектора . Предварительно оцениваются уровни износа электрических линий межабонентских участков сети. Для этого вычисляются относительные отклонения текущих значений параметров сети от их номинальных значений:

, .

Как известно, технические потери электроэнергии в соответствующих участках сети увеличиваются, если найденные оценки превышают их критических значений. Поэтому критерием нормального состояния электрических линий РЭС является выполнение следующих условий:

,

где – максимально допустимые уровни износа соответствующих линий электроснабжения.

Таким образом, изложенная процедура диагностики на основе проверки критериальных условий (3.2.30) позволяет распределительным компаниям принимать оперативные меры по поддержанию магистральной линии РЭС в нормальном состоянии.

**3.3. Идентификация недоступных для измерения и контроля переменных состояния распределительной сети**

**по данным АСКУЭ**

В [56, 58, 59, 62, 71, 72] изложены методологические основы оценки неизмеряемых параметров несимметричной трехфазной сети. При этом предварительно решается задача построения математической модели РЭС, которая базируется на комплексном представлении ее переменных, что в определенной степени усложняет проблему нахождения искомых параметров. В связи с этим в данном подразделе излагается метод идентификации неизмеряемых параметров межабонентских участков сети, предложенный в [91]. При этом в качестве исходных данных задачи непосредственно используются данные АСКУЭ, полученные по каналам связи с абонентских счетчиков электроэнергии, что значительно упрощает процедуру идентификации искомых величин.

**Постановка задачи.** Рассматривается четырехпроводная РЭС напряжением 0,4 кВ, расчетная схема которой показана на рис.3.2.1. Обозначения имеют следующий смысл: - индексные переменные, обозначающие соответственно номера фаз А, В, С и электрических контуров сети ; ЭДС -ой фазы; , – мгновенные синусоидальные напряжения и токи соответственно на входах соответствующих фаз;, – синусоидальные мгновенные ток, напряжение и сопротивление нагрузки (электроприемника) с координатой ; – мгновенный ток и комплексное сопротивление -го межабонентского участка (МАУ) -ой фазы; , – напряжения соответственно на -ом МАУ -й фазы и нейтрального провода; *, –* мгновенный ток и комплексное сопротивление -го участка нейтрального провода.

Далее предполагается, что выполняются следующие условия:

1) трехфазная сеть является линейной системой;

2) фазные и нейтральные провода сети имеют разные сечения, т.е. комплексные сопротивления , которые предварительно определяются и записываются в базу данных АСКУЭ;

3) в системе используются технические средства для подавления высших гармонических составляющих токов и напряжений в сети;

4) с абонентских счетчиков электроэнергии () в базу данных АСКУЭ по каналам связи в дискретные моменты времени с шагом дискретизации ( поступают следующие данные:

* действующие значения токов и напряжений на нагрузках сети;
* коэффициенты мощности , определяемые фазовыми сдвигами между соответствующими напряжениями и токами .

Как известно, в современных АСКУЭ межабонентские комплексные токи  и напряжения , не измеряются и не контролируются, что не дает возможность осуществлять оперативный мониторинг электрического состояния РЭС. В то же время на основе метода, основанном на комплексном представлении токов и напряжений в сети, можно их идентифицировать по данным АСКУЭ. Мгновенные синусоидальные токи и напряжения на нагрузках в установившемся режиме представляются в форме (3.2.1) и (3.2.2) [56, 87].

В случае, когда построена модель нагрузок в форме (3.2.1) и (3.2.2) межабонентские токи и напряжения можно оценить на основе известных законов электротехники (рис.3.2.1):

*, .*

При этом

*, ,*

*,*

где , – приращения фазовых сдвигов относительно их номинальных значений , обусловленные несимметрией токов и напряжений в сети.

Анализ соотношений (3.2.1), (3.2.2) и (3.3.1), (3.3.2) показывает, что для определения указанных электрических переменных необходимо, чтобы предварительно были определены фазовые сдвиги токов и напряжений на нагрузках сети, что является отдельной сложной задачей. Дальнейшие исследования показали, что использование подхода, основанного на декомпозиции исходной структуры трехфазной сети, позволяет идентифицировать модули (действующие значения) межабонентских комплексных токов и напряжений , без предварительного построения модели несимметричной распределительной сети на основе комплексного описания ее переменных.

Задача заключается в том, чтобы на основе данных, полученных с абонентских счетчиков электроэнергии, хранящихся в базе данных АСКУЭ, идентифицировать межабонентские действующие токи и напряжения , несимметричной распределительной сети, недоступные для измерения и контроля.

Решение сформулированной выше задачи включает следующие основные этапы:

1. Декомпозиция задачи.
2. Оценка разностей фазовых сдвигов.
3. Идентификация действующих токов и напряжений на участках фазных проводов.
4. Идентификация действующих токов и напряжений на участках нулевого провода.

*Декомпозиция задачи*. По условиям задачи рассматриваемая трехфазная сеть (рис.3.2.1) представляет собой линейную систему. Тогда на основе свойства линейности ее можно расчленить на три подсистемы (составные части), каждая из которых представляет собой соответствующую фазу сети при отключенном состоянии двух других фаз (рис. 3.3.1).

**~**

Рис. 3.3.1. Структура й подсистемы распределительной сети

Эти подсистемы можно рассматривать как условно автономные структуры, на входах которых действуют ЭДС , и , формируемые источником питания (трансформаторной подстанции) сети. При этом комплексные токи и напряжения на нагрузках новых подсистем отличаются от прежних их значений и описываются следующими выражениями:

где модули соответствующих переменных. При этом их фазовые сдвиги и сохраняются, но их значения неизвестны. Межабонентские токи также отличаются от их исходных значений, которые можно представить в экспоненциальной форме

(3.3.4)

где , – модуль (действующее значение) и аргумент комплексного тока соответственно.

Следует отметить, что при такой декомпозиции исходной проблемы значения комплексных сопротивлений сети ( ) не изменяются. В частности, сопротивления нагрузок можно представить в виде

, (3.3.5)

где , – модули и аргументы комплексных сопротивлений соответственно, определяемые по исходным данным задачи

Основная идея декомпозиции исходной структуры трехфазной сети заключается в том, что на ее основе удается найти функциональные связи между фазовыми сдвигами и . В частности, можно численно оценить величины , определяющие их разности:

.

Как видно будет из дальнейшего, знание разностей позволяет определить оценки действующих значений межабонентских токов , которые недоступны для измерений и в АСКУЭ не контролируются.

*Оценка разностей фазовых сдвигов*. Предположим, что в момент времени путем опроса счетчиков электроэнергии в базу данных АСКУЭ поступили данные измерений. Рассмотрим электрические контуры новых подсистем, полученных путем декомпозиции, и представленных на рис.3.3.2, где - эквивалентные сопротивления й фазы, определяемые выражениями

**~**

Рис. 3.3.2. Схема й подсистемы с эквивалентным сопротивлением

Для этих контуров справедливы следующие балансовые соотношения для напряжений:

По условиям задачи все сопротивления трехфазной сети являются известными величинами, поэтому эквивалентные сопротивления можно вычислить непосредственно по заданной расчетной схеме, показанной на рис.3.3.1. Один из возможных алгоритмов их оценки, имеющий более простую вычислительную схему, выглядит следующим образом..

Для определения эквивалентных сопротивлений запишем выражения для комплексных мощностей , потребляемых й фазой трехфазной сети (рис.3.2.1):

(3.3.9)

где , – активные и реактивные мощности соответственно, численные значения которых можно вычислить по исходным данным задачи по формулам:

.

С другой стороны выражения для этих мощностей можно записать в виде следующей суммы:

где

,

Таким образом имеем, что

Приравнивая правые части выражений (3.3.9) и (3.3.10) получаем

Отсюда находим :

Далее для определения используются следующие выражения, определяющие балансовые соотношения для комплексных мощностей относительно контуров, имеющих координаты :

где составляющие суммы определяются по формулам:

,

а мощность задается формулой (3.3.9).

Таким образом, соотношение (3.3.11) можно записать в виде

Отсюда определяем

Аналогичным образом можно найти и другие эквивалентные сопротивления , определяемые выражениями

Отметим, что действующие значения (модулей) токов , протекающих в начальных участках фазных проводов, являются известными величинами, так как они измеряются головным трехфазным счетчиком электроэнергии, установленным в трансформаторной подстанции РЭС, и хранятся в базе данных АСКУЭ. При этом модули (действующие значения) комплексных напряжений определяются на основе закона Ома: , где – модуль сопротивления . Для определения остальных межабонентских действующих токов и напряжений сети необходимо найти величины , определяемые выражением (3.3.7). Для этой цели рассмотрим электрические контуры , имеющие координаты . Для этих контуров соотношения (3.3.8) имеют вид (рис.3.3.3)

Полученные соотношения с учетом того, что запишем в виде

что эквивалентно следующим соотношениям:

где – комплексная величина, определяемая по формуле:

По условиям задачи сопротивления предварительно определяются и записываются в базу данных АСКУЭ, а также представляются, например, в виде (3.3.5). Следовательно, величины можно вычислить и представить в экспоненциальной форме

, (3.3.13)

где , – модули и аргументы соответственно.

В результате с учетом (3.3.3), (3.3.4) и (3.3.13) соотношения (3.3.12) можно записать в следующей экспоненциальной форме:

Для выполнения соотношений (3.3.14) должны соблюдаться равенства модулей и аргументов их левых и правых частей, т.е. должны выполняться следующие условия:

Таким образом, формулы (3.3.15) определяют значения разности фазовых сдвигов по исходным данным, полученным с абонентских счетчиков электроэнергии. Здесь следует отметить, что для начальных контуров, имеющих координаты , можно получить соотношения, аналогичные условиям (3.3.12), т.е.

Для этой цели используются балансовые соотношения для напряжений (3.4.13) при . Полученный результат далее будем использовать для идентификации неизмеряемых и неконтролируемых переменных (токов и напряжений) трехфазной сети.

*Идентификация действующих токов и напряжений на участках фазных проводов*. Для этой цели рассмотрим контуры исходной трехфазной сети, имеющие координаты (2). Как видно из рис.3.1.1 межабонентские токи , протекающие в 2-м участке фазного провода сети, определяются по формулам

Нетрудно показать, что для квадратов модулей этих токов справедливы выражения:

составляющие которых можно определить по формулам:

где действующие значения токов, протекающих через соответствующие сопротивления . В результате для справедлива следующая формула:

Отсюда с учетом (3.3.15) получаем численные значения :

Далее последовательно рассматриваются электрические контуры с координатами , , …, . На основе указанной выше вычислительной процедуры определяем действующие значения токов , , …, . При этом . Модули соответствующих межабонентских напряжений можно определить на основе закона Ома: , где – модуль сопротивления .

*Идентификация действующих токов и напряжений на участках нулевого провода*. Рассмотрим исходную структуру трехфазной сети, показанную рис.3.1.1. Как известно, комплексный ток , протекающий в м участке нулевого провода, определяется как сумма [84]:

где – межабонентские токи, протекающие через й участок фазных проводов. Для первого участка выражение (3.3.17) запишется в виде

Для квадрата модуля комплексного тока справедливо выражение:

составляющие которого можно определить по следующим формулам:

, , ,

С учетом полученных выражений квадрат модуля тока определяется по формуле:

.

где для разностей фазовых сдвигов введены следующие обозначения:

Отметим, что на основе рассмотрения новых подсистем (рис.3.3.2), полученных путем декомпозиции исходной структуры трехфазной сети, можно найти численные значения , , указанных выше разностей , и , т.е.

, , .

Доказательство этого факта приводится далее.

Рассмотрим исходную схему трехфазной сети (рис.3.2.1) и контуры, имеющие координаты . Для этих контуров балансовые соотношения для напряжений имеют вид

которые представим в виде

.

Правые части последних соотношений запишем через соответствующие токи и сопротивления:

где – эквивалентное сопротивление й фазы, определяемое по формуле

где – комплексная мощность, потребляемая й фазой трехфазной сети, определяемая по формуле (3.3.20). С учетом (3.2.1) и (3.3.1) соотношения (3.3.21) имеют вид

С учетом (3.3.15) получаем

что эквивалентно следующим соотношениям:

Введем обозначения

Отметим, что значения можно вычислить и представить в экспоненциальной форме

где , – модуль и аргумент комплексной величины соответственно, которые являются известными величинами.

В результате соотношения (3.3.22) с учетом (3.3.23) имеют вид

Теперь соотношения (3.3.22) запишем для каждой фазы :

Путем деления соответствующих левых и правых частей первого уравнения на соответствующие части второго и третьего уравнений, а также второго уравнения на третье получаем следующие равенства:

которые эквивалентны соотношениям

,

Для выполнения системы соотношений (3.3.25) должны соблюдаться равенства модулей и аргументов их левых и правых частей, т.е., в частности, должны выполняться следующие условия:

С учетом обозначений (3.3.18) получаем, что численные значения разностей , , фазовых сдвигов определяются по формулам

, ,

где величины , и являются известными, что подтверждает справедливость соотношений (3.3.19).

В результате искомое действующее значение тока , протекающего в первом участке нулевого провода, определяется следующим выражением:

.

Далее на основе изложенного выше алгоритма можно вычислить действующие значения токов , , …, . Модули соответствующих межабонентских комплексных напряжений определяются на основе закона Ома: , где – модуль сопротивления .

Считается, что трехфазная сеть относится к классу линейных систем, что дало возможность ее исследовать как систему, состоящую из трех условно автономных подсистем. В качестве последних рассматриваются ее электрические фазы, на входы которых поступают воздействия в виде отдельных э.д.с., формируемых источником питания сети. Отличительная особенность предложенного метода состоит в том, что реализация процедуры идентификации осуществляется непосредственно по исходным данным АСКУЭ, полученным с абонентских счетчиков электроэнергии по каналам связи. При этом не требуется построение математической модели трехфазной сети, основанной на представлении токов и напряжений в комплексной форме, что упрощает вычислительную схему метода.

**3.4. Идентификация потерь электроэнергии в распределительной сети по данным АСКУЭ**

Как известно [55, 92, 93] в современных АСКУЭ, внедряемых в настоящее время на объектах распредкомпаний, определяются суммарные потери электроэнергии в РЭС. В то же время на практике актуальной является оценка коммерческих потерь электроэнергии из общих потерь. В связи с этим в данном подразделе решается задача раздельной оценки технических и коммерческих потерь электроэнергии. При этом используются результаты, полученные в 3.2 и 3.3.

**Постановка задачи.** В качестве объекта рассматривается четырехпроводная РЭС напряжением 0,4 кВ, расчетная схема которой показана на рис.3.2.1. Далее предположим, что все обозначения и необходимые условия, принятые в подразделе 3.2 сохраняются и в данном разделе.

По результатам опроса счетчиков электроэнергии в АСКУЭ формируются исходные данные задачи – подмножества , и , состоящие из действующих токов и напряжений на соответствующих нагрузках и сдвигов фаз между ними:

(3.4.1)

Далее будем считать, что по исходным данным, представленным в форме (3.4.1), с использованием методов и алгоритмов, разработанных в 3.2 и 3.3, идентифицированы действующие значения (модулей) и соответствующих комплексных токов и , протекающих через межабонентские участки фазных и нулевого проводов.

В каждый момент времени суммарные токи на входах фаз *,* потребляемые абонентами сети в соответствующих фазах, определяются выражениями:

В случае, когда в РЭС отсутствует несанкционированный отбор электроэнергии выполняются следующие условия:

*,*

где – действующий ток на входе *k*-го линейного фазного провода, измеряемый трехфазным счетчиком электроэнергии () на выходе источника питания – трансформаторной подстанции (ТП); где – максимально допустимая погрешность измерения токов.

В случае, когда в РЭС появляется несанкционированный потребитель не выполняется хотя бы одно из условий (3.4.3), а величина соответствующего тока утечки в й фазе сети можно вычислить по формуле

где сумма абонентских токов в соответствующей фазе, которая определяется выражением (3.4.2).

Для определенности далее предположим, что в некоторый момент наблюдения в РЭС обнаружен факт наличия в сети несанкционированного потребителя, действующего в фазе с номером , где , а – дискретное подмножество, состоящее из трех элементов, обозначающих номера фаз сети. При этом комплексный ток несанкционированной нагрузки в соответствии с выражением (3.4.4) определяется выражением:

(3.4.5)

Задача заключается в идентификации технических и коммерческих потерь электроэнергии в распределительной сети.

**Метод решения задачи.** Как известно, энергобаланс в распределительной сети определяется выражением

где – количество электроэнергии, поступающей из источника (трансформаторной подстанции) на вход сети в интервале наблюдения ; – суммарное количество электроэнергии, потребляемой всеми абонентами сети; – технические потери электроэнергии на МАУ; – коммерческие потери электроэнергии, вызванные наличием в сети несанкционированного потребителя.

Необходимо отметить, что количество электроэнергии в каждом интервале наблюдения измеряется счетчиками электроэнергии, установленными соответственно на выходе трансформаторной подстанции и у абонентов сети. Эти данные передаются в базу данных концентратора и являются известными величинами. Как известно, величины технических и коммерческих потерь электроэнергии не доступны для измерения. Для их оценки можно использовать результаты, полученные в [56]. При этом вначале оцениваются комплексные потери мощности на участках линейного провода соответствующей фазы и потери мощности на участках нейтрального провода в интервале времени , которые определяются по следующим формулам:

где – сопряженные значения комплексных напряжений и соответственно. Тогда оценку суммарных технических потерь комплексной мощности в линейных проводах соответствующих фаз в интервалах можно записать в виде:

а потери мощности в нейтральном проводе определяются по формуле:

При этом вещественные и мнимые части комплексных выражений (8) и (9) определяют соответствующие потери активных мощностей:

, .

В результате оценка технических потерь электроэнергии сети за интервал наблюдения *T* запишется в виде:

Теперь используя найденную оценку на основе соотношения энергобаланса (3.4.6) можно определить оценку коммерческих потерь электроэнергии в сети за время *Т*:

Следует отметить, что изложенную выше процедуру идентификации потерь электроэнергии в сети можно значительно упростить, если для оценки коммерческих потерь использовать метод диагностики несанкционированного отбора электроэнергии, предложенный в [82]. Основная идея метода заключается в локализации координаты несанкционированных потребителей и определении соответствующих токов утечек и напряжений на их нагрузках, что позволяет идентифицировать потери мощности из-за хищения электроэнергии:

.

Далее можно определить коммерческие потери электроэнергии за интервал наблюдения по формуле

где .

В результате технические потери электроэнергии на основе балансового соотношения (3.4.6) определяются следующим выражением:

Таким образом, использование метода диагностики несанкционированного отбора электроэнергии [55, 56, 58] позволяет значительно упростить процедуру идентификации технических и коммерческих потерь электроэнергии в распределительной сети.

Точность идентификации технических и коммерческих потерь электроэнергии на основе изложенных выше методов, в основном, зависит от величин шагов дискретизации и погрешностей вычисления токов , , и напряжений , , . В целях достижения инженерной точности указанных показателей целесообразно, чтобы счетчики электроэнергии должны иметь класс точности не ниже 0,5 S для измерения активной мощности, что соответствует измерению действующих значений токов и напряжений на нагрузках с точностью порядка 0,25% от их номиналов. При этом разрядность микроконтроллера концентратора данных (КД) должна составлять не менее 32 бита. Шаг дискретизации , в основном, определяется временем опроса счетчиков электроэнергии () и временем обработки данных () в КД. При этом из-за высокой скорости микроконтроллера КД . В современных АСКУЭ в зависимости от используемого канала связи (GSM, PLC и др.) имеется возможность обеспечить время опроса от нескольких секунд до нескольких минут в зависимости от количества потребителей электроэнергии. Таким образом, повышение точности искомых оценок достигается за счет использования в составе АСКУЭ технических средств (микропроцессорных контроллеров, систем передачи данных, счетчиков электроэнергии) с высокими показателями быстродействия и точности.

**Выводы.** В главе 3предложены методы решения следующих задач:

* идентификации параметров РЭС, представляющих соротивления межабонентских участков магистральной линии трехфазной распределительной сети;
* оценки неизмеряемых и неконтролируемых переменных, описывающих состояния межабонентских участков распредсетей;
* идентификация технических и коммерческих потерь электроэнергии в распределительной сети напряжением 0,4 кВ.

При этом используются измерительные данные АСКУЭ, полученные с абонентских счетчиков электроэнергии. Результаты по идентификации параметров РЭС можно использовать для оценки уровня износа силовых электрических линий распредсети, что позволяет принять соотвествующие меры по поддержанию их в нормальном рабочем состоянии. Отличительной особенностью предложенных методов является то, что они позволяют выполнить необходимые расчеты в условиях несимметрии токов и напряжений, а также при наличии несанкционированных отборов электроэнергии в трехфазной сети. Их основу составляют идеи восстановления недоступных для измерения переменных и параметров сети, а также локализации координат несанкционированных потребителей с последующей оценкой их координат. Полученные результаты можно использовать для создания подсистемы идентификации и мониторинга потерь электроэнергии в распределительных сетях в составе АСКУЭ.

**ГЛАВА 4**

**ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ КОМПЛЕКСА ЗАДАЧ ИДЕНТИФИКАЦИИ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ И ЕГО ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ПРИКЛАДНЫХ ЗАДАЧ**

**4.1. Описание программного обеспечения комплекса задач идентификации параметров распредсетей**

На основе теоретических результатов и соответствующих алгоритмов решения задачи параметрической идентификации трехфазной РЭС, описанных в разделе 3.2, разработан комплекс программных средств с использованием программной системы Matlab [40], структура которого показана на рис.4.1.1.

В соответствии с предложенным методом общая задача параметрической идентификации, описанная в 3.2, состоит из взаимосвязанных между собой подзадач. Реализация алгоритмов последних осуществляется в виде процедур – функций (M-файлов). Их назначения приведены в табл.4.1.1.

Таблица 4.1.1 – Назначения программных модулей

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **№пп** | **Процедура - функция** | **Назначение**  **процедур - функций** |
| 1 | RES | Программа управления программными модулями (процедурами (М-файлами)) |
| 2 | Z\_nagruzka | Процедура (М-файл) представления сопротивлений нагрузок в комплексной форме |
| 3 | Zekvivalent | Процедура (М-файл) вычисления общего эквивалентного сопротивления фаз распредсети |
| 4 | OPTIMIZASIA\_Alfa | Процедура (М-файл) |
| 5 | RaschetKonechKontur | Подпрограмма вычисления межабонентских токов |
| 6 | RaschetPolnoiSeti | Подпрограмма оценки комплексных коэффициентов , , , () по формулам (3.17) и (3.19) |

Главная программа идентификации параметров **RES**

Процедура (М-файл)

Znagruzka

Процедура (М-файл)

OPTIMIZASIA

Процедура (М-файл)

Z0\_soprotivlenie

Процедура (М-файл)

LAMBDA

Процедура (М-файл)

IMAY

Процедура (М-файл)

abc\_1

Процедура (М-файл)

abc\_2

Рис.4.1.1. Структура программного комплекса

Вызов подпрограмм (М-файлов) осуществляется в соответствии с табл. 4.1.2.

Таблица 4.1.2 – Обращение к процедурам (М-файлам)

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **№пп** | **Имя процедуры (М-файла)** | **Обращение к процедуре**  **(М-файлу)** |
| 1 | Z\_nagruzka | *function [ZNagMod, ZNag, ZNagB, ZNagM] = Z\_nagruzka(I, U, cf, N);* |
| 2 | Z0\_soprotivlenie | *function [Z0, Z0B, Z0Mod] = Z0\_soprotivlenie(IT, UT, cfT)* |
| 3 | abc\_1 | *function [a, b, bb, bm, cb, cm, Z1k] = abc\_1(ZNag, Z0, IT, I)* |
| 4 | OPTIMIZASIA | *function [x, El] = OPTIMIZASIA\_3(bb, bm, cb, cm, q)* |
| 5 | LAMBDA | *function [Lambda, zb, zm, zMod, Z1k, Z1kMod] = LAMBDA\_3(v, x, a, b, Z0)* |
| 6 | IMAY | *function [IT] = IMAY(v, IT, I, Lambda)* |
| 7 | abc\_2 | *function [bb, bm, cb, cm, a, b, v] = abc\_2(v, ZNag, I, IT, Z1k)* |

Тексты модулей программного обеспечения идентификации РЭС приведены в Приложении. Соответствия математических переменных и идентификаторов программных модулей приведены в табл.4.3.

Таблица 4.1.3 - Соответствия математических переменных и идентификаторов программных модулей

|  |  |
| --- | --- |
| **Идентификаторы программ** | **Математические переменные** |
| ***I(k,v)*** |  |
| ***U(k,v)*** |  |
| ***IT(k)*** |  |
| ***UT(k)*** |  |
| ***cf(k,v)*** |  |
| ***Fi(k,v)*** |  |
| ***v*** |  |
| ***k*** | *k* |
| ***N*** | *n* |
| ***ZNagMod*** |  |
| ***ZNag*** |  |
| ***ZNagB*** |  |
| ***ZNagM*** |  |
| ***a*** |  |
| ***b*** |  |
| ***bb, bm*** | , |
| ***cb, cm*** | , |
| ***Z1k*** |  |
| ***Z0*** |  |
| ***f*** | , , |
| ***El*** |  |
| ***Lambda*** |  |
| ***zb*** |  |
| ***zm*** |  |
| ***zMod*** |  |
| ***Z1kMod*** |  |

Оценка комплексных сопротивлений межабонентских участков трехфазной РЭС по формулам (3.14)-(3.17).

Исходными данными для решения задачи параметрической идентификации распредсети являются:

* действующие значения токов и напряжений на нагрузках сети;
* коэффициенты мощности , определяемые фазовыми сдвигами между соответствующими напряжениями и токами ().

Эти данные в программных модулях комплекса задаются в виде следующих матриц и векторов:

*, , ,*

где , – идентификаторы в программных модулях, обозначающие действующие значения токов и напряжений на входах й фазы распредсети, а также соответствующие коэффициенты мощности .

**4.2. Прикладные расчеты по идентификации параметров межабонентских участков распредсети**

В целях проверки работоспособности и эффективности разработанного в 2.3.2 метода выполнены прикладные расчеты по решению модельной задачи идентификации параметров (сопротивлений) межабонентских участков трехфазной распредсети с использованием программного комплекса, описание которого изложено в 4.1. При этом считается, что в результате опроса абонентских счетчиков электроэнергии распредсети получены исходные данные задачи, которые представлены в виде следующих матриц и векторов:

Эти исходные данные представлены также в табл.4.1.1, 4.1.2 и на рис.4.1.1, 4.1.2. Результаты идентификации параметров РЭС приведены в табл.4.1.3-4.1.5, а также на рис.4.1.3 и 4.1.4. На основе полученных результатов можно определелить уровень износа проводов межабонентских участков магистральной линии распредсети, т.е. диагностировать их состояние по методике, изложенной в 3.2.

Таблица 4.2.1 – Измеренные данные, полученные

со счетчиков абонентов

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Наименование  фаз | Номер  абонента нагрузки | ,  А | ,  В |  |
| Фаза А | =1 | 1.4 | 228 | 0.83 |
| =2 | 2.5 | 227 | 0.9 |
| =3 | 2.4 | 226.8 | 0.85 |
| =4 | 2.0 | 226 | 0.9 |
| =5 | 2.5 | 225.9 | 0.85 |
| =6 | 2.6 | 225 | 0.82 |
| =7 | 2.8 | 224 | 0.83 |
| =8 | 1.3 | 222 | 0.9 |
| =9 | 2.4 | 220 | 0.89 |
| =10 | 2.0 | 218 | 0.91 |
| =11 | 2.3 | 209.6 | 0.88 |
| =12 | 2.2 | 208.5 | 0.82 |
| Фаза В  ) | =1 | 4.2 | 228 | 0.9 |
| =2 | 3.8 | 227 | 0.92 |
| =3 | 4.4 | 226.8 | 0.79 |
| =4 | 3.0 | 226 | 0.91 |
| =5 | 1.7 | 225.9 | 0.9 |
| =6 | 3.0 | 225 | 0.85 |
| =7 | 2.8 | 224 | 0.82 |
| =8 | 3.3 | 222 | 0.95 |
| =9 | 2.8 | 220 | 0.93 |
| =10 | 2.0 | 217.2 | 0.91 |
| =11 | 4.9 | 210.6 | 0.9 |
| =12 | 3.3 | 209.5 | 0.85 |
| Фаза С | =1 | 5.2 | 228 | 0.95 |
| =2 | 4.8 | 227 | 0.93 |
| =3 | 2.1 | 226.8 | 0.91 |
| =4 | 3.9 | 226 | 0.9 |
| =5 | 2.7 | 225.9 | 0.85 |
| =6 | 3.0 | 225 | 0.82 |
| =7 | 2.8 | 224 | 0.95 |
| =8 | 1.7 | 222 | 0.93 |
| =9 | 3.8 | 220 | 0.91 |
| =10 | 2.5 | 216 | 0.85 |
| =11 | 2.8 | 211.7 | 0.88 |
| =12 | 1.6 | 210.5 | 0.82 |

Таблица 4.2.2 – Данные трехфазного счетчика, установленного в трансформаторной подстанции (ТП)

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Наименование  фаз | Показания трехфазного счетчика | | |
| ,  А | ,  В |  |
| Фаза А | 60.6 | 230.0 | 0.9 |
| Фаза В | 73.5 | 230.0 | 0.9 |
| Фаза С | 71.0 | 230.0 | 0.9 |

Таблица 4.2.3 – Оценка комплексных сопротивлений нагрузок трехфазной сети

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Наименование  фаз | Номер  абонента (нагрузки ) РЭС | ,  градус | ,  Ом | ,  Ом | Ом |
| Фаза А  ( | =1 | 36 | 58.3 | 46.6 | 34.4 |
| =2 | 32.8 | 45 | 37.8 | 24.3 |
| =3 | 23 | 79.5 | 73.14 | 31 |
| =4 | 28.5 | 53.7 | 46.7 | 26.3 |
| =5 | 20 | 30 | 28.2 | 10.2 |
| =6 | 0 | 62.2 | 62.2 | 0 |
| =7 | 33.9 | 38.85 | 29.7 | 21.5 |
| =8 | 23 | 41 | 37.7 | 16 |
| =9 | 29.5 | 30.3 | 26.4 | 14.8 |
| =10 | 25.8 | 55.5 | 44.4 | 22.2 |
| =11 | 36.9 | 35.4 | 28.3 | 15.6 |
| =12 | 20 | 33.7 | 31.7 | 11.5 |
| Фаза В | =1 | 23 | 41.2 | 37.7 | 16 |
| =2 | 33.9 | 74.7 | 62 | 41.8 |
| =3 | 23 | 53.8 | 49.5 | 21 |
| =4 | 14 | 21.79 | 21 | 5.2 |
| =5 | 11.5 | 25.9 | 25.4 | 5.2 |
| =6 | 28.36 | 32.8 | 28.9 | 15.7 |
| =7 | 8.1 | 31 | 30.7 | 4.3 |
| =8 | 24.5 | 22.7 | 21.3 | 7.7 |
| =9 | 19.9 | 38.4 | 35.3 | 14.9 |
| =10 | 33.9 | 28.2 | 23.4 | 15.8 |
| =11 | 23 | 68.5 | 63 | 26.7 |
| =12 | 36.87 | 45.6 | 36.5 | 27.36 |
| Фаза С | =1 | 35.9 | 42 | 34.02 | 24.78 |
| =2 | 0 | 49.8 | 49.8 | 0 |
| =3 | 25.8 | 27.6 | 25.9 | 11.9 |
| =4 | 20 | 28.7 | 27 | 9.8 |
| =5 | 23 | 45 | 41.4 | 17.6 |
| =6 | 29.5 | 68.6 | 59.7 | 33.6 |
| =7 | 28.4 | 28.8 | 25.3 | 13.5 |
| =8 | 0 | 44.4 | 44.4 | 0 |
| =9 | 33.9 | 31.7 | 26.3 | 17.8 |
| =10 | 23 | 35.5 | 32.7 | 13.8 |
| =11 | 29.5 | 35.3 | 30.7 | 17.3 |
| =12 | 25.8 | 22.6 | 20.3 | 9.9 |

Таблица 4.2.4 - Идентифицированные действующие значения токов на участках фазных проводов

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Номера межабонентских участков трехфазной сети | Действующие значения токов   (А) на участках фазных проводов | | |
| Фаза А  ( | Фаза В | Фаза С |
| =1 | 60.6 | 73.5 | 71.4 |
| =2 | 56.8 | 68 | 66 |
| =3 | 51.8 | 65 | 61.5 |
| =4 | 49 | 60.9 | 53.5 |
| =5 | 44.9 | 50.9 | 45.9 |
| =6 | 37.6 | 42.6 | 41.1 |
| =7 | 34.1 | 36.1 | 38 |
| =8 | 28.1 | 29.3 | 30.7 |
| =9 | 22.9 | 20.1 | 26 |
| =10 | 15.9 | 14.7 | 19.5 |
| =11 | 12.1 | 7.4 | 13.7 |
| =12 | 6.2 | 4.5 | 9.9 |

Таблица 4.2.5 - Идентифицированные параметры (сопротивления) межабонентских участков трехфазной сети

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Номера межабонентских участков (МАУ) сети | Вещественная и мнимая части сопротивления | | Модуль сопротивления , Ом |
|  |  |
| =1 | 0.235 | 0.018 | 0.2369 |
| =2 | 0.221 | 0.015 | 0.2369 |
| =3 | 0.224 | 0.018 | 0.2466 |
| =4 | 0.231 | 0.017 | 0.2369 |
| =5 | 0.243 | 0.021 | 0.2369 |
| =6 | 0.241 | 0.021 | 0.2466 |
| =7 | 0.240 | 0.021 | 0.2466 |
| =8 | 0.242 | 0.022 | 0.2466 |
| =9 | 0.236 | 0.017 | 0.2466 |
| =10 | 0.234 | 0.015 | 0.2369 |
| =11 | 0.242 | 0.021 | 0.2466 |
| =12 | 0.244 | 0.023 | 0.2466 |

Рис.4.1.1. Измеренные токи нагрузок абонентов

Рис.4.1.2. Измеренные напряжения нагрузок абонентов

Рис.4.1.3.Действующие токи в межабонентских участках МЛ

Рис.4.1.4.Идентифицированные параметры (сопротивления) межабонентских участков трехфазной сети

**Выводы.** В главе 4на основе теоретических результатов и соответствующих алгоритмов решения задачи параметрической идентификации трехфазной РЭС, описанных в предыдущей главе, предложены методы решения задач параметрической идентификации с помощью программных средств, выполненных в среде программирования Matlab. Описан разработанный программный комплекс, состоящий из взаимосвязанных между собой подзадач в виде процедур – функций (M-файлов).

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Диссертационная работа посвящена задачам параметрической идентификации технических объектов. Решение этих задач осуществляется на основе критериального условия, полученного для целей идентификации. Применение предложенного критериального соотношения позволило разработать методы и алгоритмы построения моделей объектов управляемых технических систем.

Основные научные результаты работы заключаются в следующем:

1. Получено новое критериальное условие для целей параметрической идентификации динамических объектов управления.
2. Разработаны алгоритмы идентификации моделей линейных стационарных объектов управления, описываемых импульсными переходными функциями и разностными уравнениями.
3. Предложены методы и алгоритмы идентификации параметров распределительных электрических сетей, функционирующих в условиях несимметрии токов и напряжений.
4. Разработаны модели и методы идентификации недоступных для измерения и контроля переменных состояния трехфазной распределительной сети.
5. Разработана методика идентификации и мониторинга потерь электроэнергии трехфазной распределительной сети.

По результатам исследований опубликовано 23 научные работы в периодических изданиях, включенных в международные базы цитирования (РИНЦ, Scopus, Web of Science). Методы и алгоритмы, полученные в диссертационной работе, применены для идентификации моделей управляемых объектов, описываемых импульсными переходными функциями и разностными уравнениями. На основе результатов диссертации разработан комплекс программных средств, который использован для идентификации параметров межабонентских участков трехфазной распределительной сети напряжением 0,4 кВ в условиях несимметрии токов и напряжений. Разработанные модели и алгоритмы использованы в ОАО «Северэлектро» и учебном процессе Кыргызского государственного технического университета им. И. Раззакова.

Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на:

* XXVIII Международной научно-практической конференции «Научная дискуссия: вопросы технических наук», г. Москва, 2014г.;
* Международной конференции «Современное состояние и перспективы развития горнодобывающей отрасли» (КГТУ им.И.Раззакова), г.Бишкек, 2014г.;
* Международной научно-практической конференции «Строительное образование и наука Кыргызстана: перспективы интеграции, инновации и партнерства» (КГУСТА), г.Бишкек, 2014г.;
* Международной научно-практической конференции «Актуальные вопросы современной техники и технологии», г.Липецк, 2015;
* Международной конференции «Инновации в науке, производстве и образовании», г.Калининград, 2015;
* Международной конференции «Информационные технологии и математическое моделирование в науке, технике и образовании» (КГТУ им.И.Раззакова), г.Бишкек, 2016г;
* XXVI Международной научно-практической конференции [«Актуальные проблемы в современной науке и пути их решения»](http://euroasia-science.ru/ru/conference/), г.Москва, 2016г.
* XIII Международной научно-технической конференции «Виртуальные и интеллектуальные системы», г. Барнаул, 2018г.

**СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ**

* + - 1. Александров, А.Г. Оптимальные и адаптивные системы [Текст] / А.Г. Александров. – М.: Высш. шк., 1989. – 263 с.
      2. Техническая кибернетика. Теория автоматического регулирования [Текст] / под ред. В.В. Солодовникова. – М.: Машиностроение, 1967. – Кн.1: Математическое описание, анализ устойчивости и качества автоматического регулирования. – 768 с.; Кн. 2: Анализ и синтез линейных непрерывных и дискретных систем автоматического регулирования. – 679 с. – (Сер. инженерных монографий).
      3. Солодовников, В.В. Статистическая динамика линейных систем автоматического управления [Текст] / В.В. Солодовников. – М.: Физматгиз, 1960. – 656 с.
      4. Андреев, Ю.Н. Управление конечномерными линейными объектами [Текст] / Ю.Н. Андреев. – М.: Наука, 1976. – 424 с.
      5. Квакернак, Х. Линейные оптимальные системы управления [Текст] / Х. Квакернак, Р. Сиван. – М.: Мир, 1977. – 650 с.
      6. Спиди, К. Теория управления (идентификация и оптимальное управление) [Текст] / К. Спиди, Р. Браун, Дж. Гудвин. – М.: Мир, 1973. – 248 с.
      7. Методы классической и современной теории автоматического управления [Текст]: в 5 т. / под ред. К.А. Пупкова, Н.Д. Егупова. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – Т. 2: Статическая динамика и идентификация систем автоматического управления. – 646 с.
      8. Дмитриев, А.Н. Спектральные методы анализа, синтеза и идентификации систем управления [Текст] / А.Н.Дмитриев, Н.Д. Егупов, Ж.Ш. Шаршеналиев. – Фрунзе: Илим, 1986. – 234 с.
      9. Автоматическое управление [Текст]: сб. ст. / – М.: Машиностроение, 1978. – 350 с.
      10. Залманзон, Л.А. Преобразования Фурье, Уолша, Хаара и их применение в управлении, связи и других областях [Текст] / Л.А. Залманзон. – М.: Наука, 1989. – 496 с.
      11. Суетин, П.К. Классические ортогональные многочлены [Текст] / П.К. Суетин. – М.: Наука, 1976. – 328 с.
      12. Современные методы идентификации [Текст] / под ред. П.М. Эйкхгоффа. –М.: Наука, 1983. – 400 с.
      13. Сейдж, Э.П. Идентификация систем управления [Текст] / Э.П.Сейдж, Дж.Л. Мелc. – М.: Наука, 1974. – 248 с.
      14. Справочник по теории автоматического управления [Текст] / под ред. А.А. Красовского. – М.: Наука, 1987. – 712 с.
      15. Гинсберг, К.С. Концепция научного проектирования инженерного моделирования для слабо изученных объектов управления: новый подход к проблемам структурной идентификации [Текст] / К.С. Гинсберг // Труды IX  Междунар. конф. «Идентификация систем и задачи управления» (SICPRO ‘2012. Москва). – М., 2012. – С. 802-828.
      16. Грачев, А.Н. Структурная и параметрическая идентификация линейных динамических объектов корреляционными методами [Текст] /А.Н. Грачев, В.М. Понятский, Во Конг Ту // XII Всерос. совещ. по проблемам управления. ВСПУ-2014. – М., 2014. – С. 2926-2935.
      17. Кучеренко, П.А. Алгоритмы нелинейной фильтрации в задаче структурной идентификации многоструктурных стохастических объектов [Текст] / П.А. Кучеренко, С.В. Соколов // Мехатроника, Автоматизация, Управление. – 2014. – № 6. – С. 3-7.
      18. Солодовников, В.В. Принцип сложности в теории управления [Текст] / В.В. Солодовников, В.Ф. Бирюков, В.И. Тумаркин. – М.: Наука, 1977. – 344 с.
      19. Солодовников, В.В. Теория сложности [Текст] / В.В. Солодовников, В.И. Тумаркин. – М.: Наука, 1987. – 286 с.
      20. Дилигенская, А.Н. Идентификация объектов управления [Текст] / А.Н. Дилигенская. – Самара: СГТУ, 2009. – 136 с.
      21. Граничин, О. Н. Поисковые алгоритмы стохастической аппроксимации с рандомизацией на входе [Текст] / О. Н. Граничин // Автоматика и телемеханика. – 2015. – № 5. – С.43-59.
      22. Солодовников, В.В. Спектральные методы расчета и проектирования систем управления [Текст] / В.В. Солодовников, А.Н. Дмитриев, Н.Д. Егупов. – М.: Машиностроение, 1986. – 440 с.
      23. Шатов, Д.В. Идентификация запаздывания одномерных линейных объектов конечно-частотным методом [Текст] / Д.В. Шатов // Проблемы управления. –2015. – № 3. – С. 2-8.
      24. Шумихин, А. Г. Идентификация сложного объекта управления по частотным характеристикам, полученным экспериментально на его нейросетевой динамической модели [Текст] / А. Г. Шумихин, А.С. Бояршинова // Автоматика и телемеханика. – 2015. – № 4. – С.124-134.
      25. Аоки, М. Введение в методы оптимизации [Текст] / М. Аоки. – М.: Наука, 1977. – 334 с.
      26. Бахвалов, Н.С. Численные методы [Текст] / Н.С. Бахвалов, Н.П. Жидков, Г.М. Кобельков. – М.: Лаб. базовых знаний, 2002. – 632 с.
      27. Метод оврагов в задачах рентгеноструктурного анализа [Текст] / И.М. Гельфанд, Е.Б. Вул, С.А. Гинзбург [и др.]. – М.: Наука, 1966. – 98 с.
      28. Трушкова, Е. А. Алгоритмы глобального поиска оптимального управления [Текст] / Е. А. Трушкова // Автоматика и телемеханика. – 2011. – № 6. –С.151-159.
      29. Оморов, Т.Т. [Теория и методы синтеза систем автоматического управления на основе концепции допустимости](https://elibrary.ru/item.asp?id=27372007) [Текст] / Т.Т. Оморов // Изв. Нац. АН Кырг. Респ. – 2009. – [№ 4](https://elibrary.ru/contents.asp?issueid=1681542&selid=27372007). – С. 121-128.
      30. Оморов, Т.Т. Синтез законов управления взаимосвязанными электроприводами [Текст] / Т.Т. Оморов, Г.А. Кожекова // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2009. – №10. – С.10-13.
      31. Оморов, Т.Т. [Синтез адаптивного регулятора многомерной системы управления в условиях параметрической неопределенности](https://elibrary.ru/item.asp?id=27345752) [Текст] / Т.Т. Оморов, Г.А. Кожекова // [Изв. Нац. АН Кырг. Респ](https://elibrary.ru/contents.asp?issueid=1680349). – 2010. – [№ 2](https://elibrary.ru/contents.asp?issueid=1680349&selid=27345752). – С. 64-67.
      32. Оморов, Т.Т. [Методологические основы синтеза систем автоматического управления с использованием принципа гарантируемой динамики](https://elibrary.ru/item.asp?id=27372060) [Текст] / Т.М. Жолдошов, Г.А. Кожекова // [Изв. Нац. АН Кырг. Респ](https://elibrary.ru/contents.asp?issueid=1681544). – 2012. – [№ 4](https://elibrary.ru/contents.asp?issueid=1681544&selid=27372060). – С. 35-40.
      33. Оморов, Т.Т. Синтез системы управления синхронным генератором [Текст] / Т.Т. Оморов, Г.А. Кожекова // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2011. – № 1. – С. 5-9.
      34. Оморов, Т.Т. Синтез систем стабилизации по заданным критериальным ограничениям [Текст] / Т.Т. Оморов, Б.О. Джолдошов // Вестн. Евраз. Нац. ун-та имени Л.Н. Гумилева. – 2005. – № 2(42). – С. 18-28.
      35. Курманалиева, Р.Н. [К проблеме идентификации модели управляемой системы по экспериментальным данным](https://elibrary.ru/item.asp?id=23649336) [Текст] / Р.Н. Курманалиева, Т.Т. Оморов, Р.Ч. Осмонова // [Universum: техн. науки](https://elibrary.ru/contents.asp?issueid=1400313). – 2015. – [№ 6 (18)](https://elibrary.ru/contents.asp?issueid=1400313&selid=23649336). – С. 3.
      36. Оморов, Т.Т. Идентификация передаточной функции стационарного объекта управления [Текст] / Т.Т. Оморов, Р.Н. Курманалиева, Р.Ч. Осмонова // Изв. Кырг. гос. техн. ун-та им. И. Раззакова. – 2014. – № 33. – С. 592-595.
      37. Оморов, Т.Т. Параметрическая идентификация линейного дискретного объекта управления [Текст] / Т.Т. Оморов, Р.Н. Курманалиева, Р.Ч. Осмонова // Вестн. науки и образования Северо-запада России. – 2015. – Т. 1, № 3. – С. 68-73.
      38. Математическая теория оптимальных процессов [Текст] / Л.С. Понтрягин, В.Г. Болтянский, Р.В. Гамкрелидзе [и др.]. – М.: Наука, 1976. – 392 с.
      39. Сейдж, Э.П. Теория оценивания и ее применение в связи и управлении [Текст] / Э.П. Сейдж, Дж. Мэлс. – М.: Наука. 1974. – 248 с.
      40. Simulink: Инструмент моделирования динамических систем [Электронный ресурс] / И.В. Черных. – Режим доступа: <http://matlab.exponenta.ru/simulink/book1/index.php>. – Загл. с экрана.
      41. Щуров, В.М. Состояние и перспективы развития АСКУЭ в энергосистемах [Текст] / В.М. Щуров // Метрология электрических измерений в энергетике: сб. науч. тр. – М., 2001. – С. 143-148.
      42. Еремина, М.А. Развитие автоматических систем коммерческого учета энергоресурсов (АСКУЭ) [Текст] / М.А. Еремина // Молодой ученый. – 2015. – № 3.– С. 135-138.
      43. Якушев, К.В. Автоматизированная система коммерческого учета электроэнергии для розничного рынка // Информатизация и системы управления в промышленности. – 2009. – № 3(23) [Электронный ресурс] / К.В. Якушев. – Режим доступа: https://www.isup.ru>journals>3-23-2009. – Загл. с экрана.
      44. Система АСКУЭ – расшифровка и назначение [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [onlineelektrik.ru › euchet › sistema-askue-rasshifrovka-i-naznachenie. – Загл. с экрана.](http://onlineelektrik.ru/elaboratoriya/euchet/sistema-askue-rasshifrovka-i-naznachenie.html)
      45. Тубинис, В.В. АСКУЭ бытовых потребителей. Преимущества PLC технологии связи [Текст] / В.В. Тубинис // Новости электротехники. – 2005. – № 2(32). – С. 43-44.
      46. Системы коммерческого учета потребления электроэнергии на базе PLC технологий с передачей данных по сети GCM [Текст]: техн. описание. – М.: Группа компаний ТЭСС, 2004. – 16 с.
      47. Quartus II Web Edition v12.1-Intel [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.altera.com/downloads/software/quartus-ii-we/121.html. – Загл. с экрана.
      48. Вакансии – НПО «Мир [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.mir-omsk.ru/stuff/career/vacancies>. – Загл. с экрана.
      49. Ningo San[ing Electric [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.sanxingelectric.com>. – Загл. с экрана.
      50. Пономаренко, О.И. Влияние несимметричных режимов на потери мощности в электрических сетях распределенных систем электроснабжения [Текст] / О.И. Пономаренко, И.Х. Холиддинов // Энергетик. – 2015. – № 12. – С.6-8.
      51. Железко, Ю.С. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии [Текст] / Ю.С. Железко. – М.: ЭНАС, 2009. – 456 с.
      52. Косоухов, Ф.Д. Снижение потерь от несимметрии токов и повышение качества электрической энергии в сетях 0,38 кВ с коммунально-бытовыми нагрузками [Текст] / Ф.Д. Косоухов, Н.В. Васильев, А.О. Филиппов // Электротехника. – 2014. – № 6. – С. 8-12.
      53. Оморов, Т.Т. [Оценка влияния несимметрии токов и напряжений на потери электроэнергии в распределительной сети с использованием АСКУЭ](https://elibrary.ru/item.asp?id=29939034) [Текст] / Т.Т. Оморов // [Электричество](https://elibrary.ru/contents.asp?id=34533090). – 2017. – [№ 9](https://elibrary.ru/contents.asp?id=34533090&selid=29939034). – С. 17-23.
      54. Национальный энергохолдинг [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.energo.gov.kg/>. – Загл. с экрана.
      55. Сапронов, А.А. Оперативное выявление неконтролируемого потребления электроэнергии в электрических сетях напряжением до 1 кВ [Текст] / А.А. Сапронов, С.Л. Кужеков, В.Г. Тынянский // Изв. вузов. Электромеханика. 2004. – № 1. – С.55-58.
      56. Оморов, Т.Т. Идентификация и мониторинг потерь электроэнергии в распределительной сети в составе АСКУЭ [Текст] / Т.Т. Оморов, Б.К. Такырбашев // Электричество. – 2016. – №11. – С.4-11.
      57. Оморов, Т.Т. Идентификация состояния распределительной электрической сети в системах автоматизации учета и управления энергопотреблением [Текст] / Т.Т. Оморов, Б.К. Такырбашев // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2016. – №10. – С. 651-656.
      58. Идентификация утечек тока в распределительных сетях по данным АСКУЭ [Текст] / Т.Т. Оморов, Б.К. Такырбашев, Р.Ч. Осмонова, Т.Ж. Койбагаров // [Вестн. Южно-Урал. гос. ун-та. Сер.: Энергетика](https://elibrary.ru/contents.asp?id=34467586). – 2018. – Т. 18, [№](https://elibrary.ru/contents.asp?id=34467586&selid=28863146)2. – С. 48-54.
      59. Оморов, Т.Т. К проблеме локализации несанкционированного отбора электроэнергии в распределительных сетях в составе АСКУЭ [Текст] / Т.Т. Оморов // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2017. – № 7. – С. 27-32.
      60. Арутюнян, А.Г. О расчете дополнительных потерь мощности в трехфазных четырехпроводных сетях [Текст] / А.Г. Арутюнян // Электричество. – 2015. – № 10. – С.55-58.
      61. Шклярский, Я.Э. [Влияние энергетических характеристик нелинейной нагрузки на определение параметров электрической сети](https://elibrary.ru/item.asp?id=18360555) [Текст] / Я.Э. Шклярский, В.С. Добуш // [Научно-технические ведомости С.-петерб. гос. политехн. ун-та](https://elibrary.ru/contents.asp?id=33802279). – 2012. – [№ 4 (159)](https://elibrary.ru/contents.asp?id=33802279&selid=18360555). – С. 77-80.
      62. Оморов, Т.Т. Диагностика состояний электрических линий распределительных сетей в составе АСКУЭ [Текст] / Т.Т. Оморов, Б.К. Такырбашев // Контроль. Диагностика. – 2017. – № 5. – С.44-48.
      63. Беляев, А.В. Выбор аппаратуры, защит и кабелей в сетях 0,4 кВ [Текст] / А.В. Беляев. – Л.: Энергоатомиздат, 1988. – 176 с.
      64. Система защиты электрической сети напряжением 380В от обрывов воздушной линии [Текст] / А.М. Ершов, О.В. Филатов, А.В. Молоток [и др.] // Электрический ст. – 2016. – № 5. – С.28-33.
      65. Клочков, А.Н. [Устройство для обнаружения трехфазных сетей с обрывом фазного провода](https://elibrary.ru/item.asp?id=15589627) [Текст] / А.Н. Клочков // [Вестн. Краснояр. гос. аграр. ун-та](https://elibrary.ru/contents.asp?issueid=927789). – 2011. – [№ 1](https://elibrary.ru/contents.asp?issueid=927789&selid=15589627). – С. 221-223.
      66. Оморов, Т.Т. К проблеме диагностики обрывов электрических линий трехфазных распределительных сетей в составе АСКУЭ [Текст] / Т.Т. Оморов, Б.К. Такырбашев, К.Э. Закиряев // Электричество. – 2018. – № 8. – С. 24-28.
      67. Авербух, М.А. О потерях электроэнергии в системах электроснабжения индивидуального жилищного строительства [Текст] / М.А. Авербух, Е.В. Жилин // Энергетик. – 2016. – № 6. – С. 54-56.
      68. Коровкин, Н.В. [Управление установившимися режимами энергосистем с использованием векторного критерия качества](https://elibrary.ru/item.asp?id=22882665) [Текст] / Н.В. Коровкин, М.В. Одинцов, О.В. Фролов // [Электричество](https://elibrary.ru/title_about.asp?id=9289). – 2015. – № 1. – C.13-19.
      69. Дулепов, Д.Е. Снижение потерь электрической энергии при несимметричных режимах в сельских распределительных электрических сетях 0,38 КВ [Текст] / Д.Е. Дулепов, Т.Е. Кондраненкова // Дальневосточный аграр. вестн. – 2017. – № 2 (42). – С. 139-145.
      70. Солопов, Р.В.[Критериальная комплексная оптимизация в электроэнергетических системах](https://elibrary.ru/item.asp?id=29079033) [Текст] / Р.В. Солопов // [Электротехника](https://elibrary.ru/title_about.asp?id=8295).  – 2017. – № 5. – С.41-45.
      71. Omorov, T.T.Synthesis of the managing director of the subsystem for optimization of the operating mode of the distributive electric network [Теxt] / T.T. Omorov, B. K. Takyrbashev, R.Ch.Osmonova // Engineering Studies. – 2016. – №3. – P. 606-615.
      72. Оморов, Т.Т. К проблеме оптимизации несимметричных режимов работы распределительных сетей [Текст] / Т.Т. Оморов, Б.К. Такырбашев // Приборы и системы: Управление, контроль, диагностика. – 2016. – № 6. – С.11-15.
      73. Киселев, М.Г. Симметрирование токов в сетях электроснабжения силовым электрическим регулятором неактивной мощности [Текст] / М.Г. Киселев, М.Г. Лепанов // Электротехника. – 2018. – №11. – С.63-70.
      74. Пат. № 2490768 Российская Федерация. Симметрирующее устройство для трехфазных сетей с нулевым проводом [Текст] / И.В. Наумов, Д.А. Иванов, С.В. Подъячих, Гантулга Дамдинсурэн; опубл. 20.08.2013, Бюл. № 23.
      75. Оморов, Т.Т. Симметрирование распределенной электрической сети методом цифрового регулирования [Текст] / Т.Т. Оморов // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2018. – Т. 19, № 3. – С. 194-200.
      76. Пат. № 2249286 Российская Федерация. Способ автоматизированного активного контроля уровня несимметрии напряжений и токов [Текст] / Г.А. Большанин; опубл. 27.03.2005, Бюл. № 9.
      77. Пат. № 2102 Кыргызская Республика. Способ симметрирования фазных токов распределительной сети 0,4кВ и устройство его осуществления [Текст] / Т.Т. Оморов, А.В. Новиков, А. Боронин; опубл. 31.01.2018, Бюл. №10. – С. 16-17.
      78. Зеленский, Е.Г. [Идентификация параметров распределительных сетей по синхронизированным измерениям токов и напряжений](https://elibrary.ru/item.asp?id=26135530) [Текст] / Е.Г. Зеленский, Ю.Г. Кононов, И.И. Левченко // [Электротехника](https://elibrary.ru/title_about.asp?id=8295). – 2016. – № 7. – С. 3-8.
      79. Степанов, А.С. [Идентификация параметров моделей элементов электрических сетей на основе теоремы Теллегена](https://elibrary.ru/item.asp?id=26135531) [Текст] / А.С. Степанов, С.А. Степанов, С.С. Костюкова // [Электротехника](https://elibrary.ru/title_about.asp?id=8295). – 2016. – № 7. – C. 8-11.
      80. Будникова, И.К. [Компьютерное моделирование параметров распределительной электрической сети](https://elibrary.ru/item.asp?id=22857477) [Текст] / И.К. Будникова, Е.С. Белашова // [Изв. Высш. учеб. зав. Проблемы энергетики](https://elibrary.ru/contents.asp?id=34047122). – 2014. – [№ 9/10](https://elibrary.ru/contents.asp?id=34047122&selid=22857477). – С. 75-81.
      81. Ягуп, В.Г. [Идентификация параметров трехфазной линейной нагрузки для компенсации реактивной мощности с помощью поисковой оптимизации](https://elibrary.ru/item.asp?id=38239466)  
          [Текст] / В.Г. Ягуп, Е.В. Ягуп // [Технiчна електродинамiка](https://elibrary.ru/contents.asp?id=38239457). – 2019. – [№ 3](https://elibrary.ru/contents.asp?id=38239457&selid=38239466). – С. 67-73.
      82. Шелюг, С.Н. [Методы адаптивной идентификации параметров схемы замещения элементов электрической сети](https://elibrary.ru/item.asp?id=19161691) [Текст]: дис. … канд. техн. наук / С.Н. Шелюг. – Екатеринбург, 2000. – 181 с.
      83. Оморов, Т.Т. Определение параметров распределительных сетей 0,4 кВ по данным АСКУЭ [Текст] / Т.Т. Оморов, Б.К. Такырбашев, Р.Ч. Осмонова // Энергетик. – 2017. – № 6. – С. 37-40.
      84. [Идентификация параметров распределительной сети в системах автоматизации процессов энергопотребления](https://elibrary.ru/item.asp?id=26009055)  
          [Текст] / Р.Ч. Осмонова, Б.К. Такырбашев, Ы.С. Дуйшенкулова, Т.Т. Оморов // [Наука, новые технологии и инновации Кыргызстана](https://elibrary.ru/contents.asp?id=34237449). – 2016. – [№ 3](https://elibrary.ru/contents.asp?id=34237449&selid=26009055). – С. 15-19.
      85. Оморов, Т.Т. Параметрическая идентификация распределительной сети в составе АСКУЭ [Текст] / Т.Т. Оморов, Р.Ч. Осмонова, Т.Ж. Койбагаров // [Вестн. Южно-Урал. гос. ун-та. Сер.: Энергетика](https://elibrary.ru/contents.asp?id=34841901). – 2018. – Т. 18, [№ 1](https://elibrary.ru/contents.asp?id=34841901&selid=32767704). – С. 46-52.
      86. Сапронов, А.А. Анализ эффективности мероприятий по снижению коммерческихпотерь электроэнергии в электрических сетях напряжением 0,4кВ [Текст] /А.А. Сапронов // Энергосбережения и водоподготовка. – 2006. – № 5. – С.57-58.
      87. Демирчян, К.С. Теоретические основы электротехники [Текст] / К.С. Демирчян, Л.Р. Нейман, А.В. Коровкин. – СПб.: Питер, 2009. – Т. 1. – 512 c.
      88. Корн, Г. Справочник по математике [Текст] / Г. Корн, Т. Корн. – М.: Наука, 1974. – 832 с.
      89. Реклейтис, Г. Оптимизация в технике [Текст] / Г. Реклейтис, А. Рейвиндран, К. Рэгсдел. – М.: Мир, 1986. – Кн. 2. – 320 с.
      90. [К проблеме построения математической модели трехфазной распределительной электрической сети](https://elibrary.ru/item.asp?id=36470564) [Текст] / Т.Т. Оморов, Р.Ч. Осмонова, Т.Ж. Койбагаров, Б.О. Джолдошев *//* [Ползуновский альманах](https://elibrary.ru/contents.asp?id=36470553). – 2018. – [№ 4](https://elibrary.ru/contents.asp?id=36470553&selid=36470564). – С. 48-52.
      91. Оморов Т.Т. [К проблеме идентификации неизмеряемых параметров распределительной сети по данным АСКУЭ](https://elibrary.ru/item.asp?id=37213909) [Текст] / Т.Т. Оморов, Р.Ч. Осмонова, К.Э. Закиряев // [Вестн. Южно-Урал. гос. ун-та. Сер.: Энергетика](https://elibrary.ru/contents.asp?id=37213906). –2019. – Т. 19, [№ 1](https://elibrary.ru/contents.asp?id=37213906&selid=37213909). – С. 26-34.

**Приложение**

Текст управляющего программного модуля

%ГЛАВНАЯ ПРОГРАММА ИДЕНТИФИКАЦИИ ПАРАМЕТРОВ RES

%получение данных с абонентских счетчиков

I=[1.4 2.5 2.4 2.0 2.5 2.6 2.8 1.3 2.4 2.0 2.3 2.2; 4.2 3.8 4.4 3.0 1.7 3.0 2.8 3.3 2.8 2.0 4.9 3.3; 5.2 4.8 2.1 3.9 2.7 3.0 2.8 1.7 3.8 2.5 2.8 1.6];

U=[228 227 226.8 226 225.9 225 224 222 220 218 209.6 208.5; 228 227 226.8 226 225.9 225 224 222 220 217.2 210.6 209.5; 228 227 226.8 226 225.9 225 224 222 220 216 211.7 210.5];

cf=[0.83 0.9 0.85 0.9 0.85 0.82 0.83 0.9 0.89 0.91 0.88 0.82; 0.9 0.92 0.79 0.91 0.9 0.85 0.82 0.95 0.93 0.91 0.9 0.85; 0.95 0.93 0.91 0.9 0.85 0.82 0.95 0.93 0.91 0.85 0.88 0.82];

IT=[12.9 12.9 12.9]; %получение данных с трансформатора

UT=[226 226 226];

cfT=[0.9 0.93 0.92];

N=12; %количество абонентов на каждой фазе

for v=1:N

ZV(v)=ZVB(v)+j\*ZVM(v);

end

[ZNagMod, ZNag, ZNagB, ZNagM] = Z\_nagruzka(I, U, cf, N); %процедуры (М-файлы) вычисления параметров

[Z0, Z0B, Z0Mod] = Z0\_soprotivlenie(IT, UT, cfT)

[a, b, bb, bm, cb, cm, Z1k] = abc\_1(ZNag, Z0, IT, I);

q(1)=0.1; q(2)=0.1; q(3)=0.07;

[x, El] = OPTIMIZASIA\_3(bb, bm, cb, cm, q) %процедура (М-файл) оптимизации

for v=1:N

while El>=0.0005

q(1)=x(1); q(2)=x(2); q(3)=x(3);

[x, El] = OPTIMIZASIA\_3(bb, bm, cb, cm, q)

end

[Lambda, zb, zm, zMod, Z1k, Z1kMod] = LAMBDA\_3(v, x, a, b, Z0)

[IT] = IMAY(v, IT, I, Lambda)

[bb, bm, cb, cm, a, b, v] = abc\_2(v, ZNag, I, IT, Z1k)

end

%ОБРАЩЕНИЯ К ПРОЦЕДУРАМ (М-ФАЙЛАМ)

function [ZNagMod, ZNag, ZNagB, ZNagM] = Z\_nagruzka(I, U, cf, N)

j=sqrt(-1);

for k=1:3

for v=1:N

Fi(k,v)=acos(cf(k,v));

ZNagMod(k,v)=U(k,v)/I(k,v);

ZNagB(k,v)= ZNagMod(k,v)\*cf(k,v);

ZNagM(k,v)= ZNagMod(k,v)\*sin(Fi(k,v));

ZNag(k,v)=ZNagB(k,v)+j\*ZNagM(k,v);

end

end

end

function [Z0, Z0B, Z0Mod] = Z0\_soprotivlenie(IT, UT, cfT)

for k=1:3

FiT(k)=acos(cfT(k));

Z0Mod(k)=UT(k)/IT(k);

Z0B(k)=Z0Mod(k)\*cfT(k);

Z0M(k)=Z0Mod(k)\*sin(FiT(k));

Z0(k)=Z0B(k)+j\*Z0M(k);

end

end

function [a, b, bb, bm, cb, cm, Z1k] = abc\_1(ZNag, Z0, IT, I)

for k=1:3

a(k)=Z0(k)/2;

Z1k(k)=I(k,1)\*ZNag(k,1)/IT(k);

b(k)=Z1k(k)/2;

bb(k)=real(b(k)); bm(k)=imag(b(k));

end

c(1)=a(2)-a(1);

c(2)=a(3)-a(1);

cb(1)=real(c(1)); cm(1)=imag(c(1));

cb(2)=real(c(2)); cm(2)=imag(c(2));

end

function [x, El] = OPTIMIZASIA\_3(bb, bm, cb, cm, q)

Gamma=-100;

h=0.00005;

E(1)=bm(2)\*cos(q(2))+bb(2)\*sin(q(2))-bm(1)\*cos(q(1))-bb(1)\*sin(q(1))-cm(1);

E(2)=bb(3)\*cos(q(3))-bm(3)\*sin(q(3))-bb(2)\*cos(q(2))+bm(2)\*sin(q(2))-cb(2)+cb(1);

E(3)=bm(3)\*cos(q(3))+bb(3)\*sin(q(3))-bm(1)\*cos(q(1))-bb(1)\*sin(q(1))-cm(2);

y(1)=Gamma\*(E(1)\*(bm(1)\*sin(q(1))-bb(1)\*cos(q(1)))+E(3)\*(bm(1)\*sin(q(1))-bb(1)\*cos(q(1))));

y(2)=Gamma\*(E(1)\*(bb(2)\*cos(q(2))-bm(2)\*sin(q(2)))+E(2)\*(bb(2)\*sin(q(2))+bm(2)\*cos(q(2))));

y(3)=Gamma\*(-E(2)\*(bb(3)\*sin(q(3))+bm(3)\*cos(q(3)))+E(3)\*(bb(3)\*cos(q(3))-bm(3)\*sin(q(3))));

x(1)=q(1)+h\*y(1);

x(2)=q(2)+h\*y(2);

x(3)=q(3)+h\*y(3);

q(1)=x(1);

q(2)=x(2);

q(3)=x(3);

Ex(1)=bm(2)\*cos(q(2))+bb(2)\*sin(q(2))-bm(1)\*cos(q(1))-bb(1)\*sin(q(1))-cm(1);

Ex(2)=bb(3)\*cos(q(3))-bm(3)\*sin(q(3))-bb(2)\*cos(q(2))+bm(2)\*sin(q(2))-cb(2)+cb(1);

Ex(3)=bm(3)\*cos(q(3))+bb(3)\*sin(q(3))-bm(1)\*cos(q(1))-bb(1)\*sin(q(1))-cm(2);

El=Ex(1)^2+Ex(2)^2+Ex(3)^2;

end

function [Lambda, zb, zm, zMod, Z1k, Z1kMod] = LAMBDA\_3(v, x, a, b, Z0)

j=sqrt(-1);

Lambda(1)=x(1);

Lambda(2)=x(2);

Lambda(3)=x(3);

fb(1)=cos(Lambda(1));

fm(1)=sin(Lambda(1));

f(1)=fb(1)+j\*fm(1);

z(v)=a(1)-b(1)\*f(1);

zb(v)=real(z(v)); zm(v)=imag(z(v));

zMod(v)=abs(z(v));

for k=1:3

Z1k(k)=Z0(k)-2\*z(v);

Z1kMod(k)=abs(Z1k(k));

end

end

function [IT] = IMAY(v, IT, I, Lambda)

for k=1:3

IT(k)= sqrt(IT(k)^2+I(k,v)^2-2\*IT(k)\*I(k,v)\*cos(Lambda(k)));

end

end

function [bb, bm, cb, cm, a, b] = abc\_2(v, ZNag, I, IT, Z1k)

for k=1:3

Z0k(k)=ZNag(k,v)\*Z1k(k)/(ZNag(k,v)-Z1k(k));

Z0kMod(k)=abs(Z0k(k));

a(k)=Z0k(k)/2;

v1=v+1;

IT1(k)=IT(k);

Z1k(k)=I(k,v1)\*ZNag(k,v1)/IT(k);

b(k)=Z1k(k)/2;

bb(k)=real(b(k)); bm(k)=imag(b(k));

end

c(1)=a(2)-a(1);

c(2)=a(3)-a(1);

cb(1)=real(c(1)); cm(1)=imag(c(1));

cb(2)=real(c(2)); cm(2)=imag(c(2));

end