

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Методические указания

по выполнению практических работ
по дисциплине «Оценивание состояния электроэнергетических систем»
для студентов направления подготовки /специальности
13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника»,

Магистерская программа «Мониторинг и управление режимами электрических сетей на базе интеллектуальных информационно-измерительных систем и технологий "

(ЭЛЕКТРОННЫЙ ДОКУМЕНТ)

Содержание

Тема 1. Методы повышения достоверности телеизмерений	6
Практическая работа № 1	16
Практическая работа № 2	23
Тема 2. Статическое оценивание состояния	34
Практическая работа №3	41
Практическая работа №4	50
Практическая работа № 5	62
Тема 3. Динамическое оценивание состояния	72
Практическая работа №6.	78
Тема 4. Достоверизация данных	85
Практическая работа № 7	94
Практическая работа № 8	101
Практическая работа № 9	109
Список литературы	117
Приложение. Основы программирования в среде Mathcad	119

ВВЕДЕНИЕ

Дисциплина «Оценивание состояния электроэнергетических систем» призвана формировать профессиональную подготовку магистрантов, обучающихся по направлению 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника», магистерская программа "Мониторинг и управление режимами электрических сетей на базе интеллектуальных информационно-измерительных систем и технологий" в соответствии с Федеральным государственным образовательным стандартом высшего образования. Выполнение практических работ, предусмотренных рабочей программой предназначено для успешного освоения учебного курса и служит основой приобретения профессионализма и повышения компетентности.

В соответствии с целями основной образовательной программы и задачами профессиональной деятельности магистр по направлению 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника», магистерская программа «Мониторинг и управление режимами электрических сетей на базе интеллектуальных информационно-измерительных систем и технологий», практикум направлен на **формирование компетенции ПК-5**: Способен анализировать режимы работы электроэнергетических систем и сетей. Студент должен:

- Знать: методы повышения достоверности телеизмерений ,постановку задачи оценивания состояния ЭЭС и используемые математические модели
- Уметь: применять методы и алгоритмы проверки, количественной оценки качества и синтеза наблюдаемости ЭЭС
- Владеть: навыками расчетов оценок параметров установившихся режимов ЭЭС и повышения достоверности телеизмерений

Необходимо знать и помнить основные математические соотношения, характеризующие работу электроэнергетических систем, знать главные расчётные формулы, векторные диаграммы, иметь представление о смежных технических дисциплинах.

Настоящее учебное пособие предназначено для проведения практических занятий по дисциплине «Оценивание состояния электроэнергетических систем»

и направлено на закрепление и расширение знаний, полученных при изучении теоретических разделов дисциплины.

Задача оценивания состояния имеет тесную связь с задачей расчета установившегося режима. В обеих задачах определяются значение модулей и фаз напряжений в узлах, а с их помощью – остальные параметры режима. Но в задаче оценивания состояния в качестве исходной информации выступают любые измерения параметров режима, в то время, как в задаче расчета установившегося режима – инъекции мощности в узлах (узловые мощности, задающие мощности). Кроме того, в результате решения задачи оценивания состояния находятся характеристики ошибок полученных оценок, т.е. задача решается в вероятностной постановке, в то время как способы решения задачи установившегося режима имеют дело с однозначными данными. И наконец, принципиальное отличие состоит в том, что задача оценивания состояния позволяет увеличить точность получения информации о режиме за счет избыточности измерений и отфильтровать, насколько это возможно, случайные помехи.

В дополнении к материалу, предложенному магистрантам при изучении лекционного курса дисциплины «Оценивание состояния ЭЭС» настоящее пособие дает возможность получения практических навыков применения алгоритмов теории оценивания состояния при расчете и анализе режимов электроэнергетических систем, к числу которых относятся:

- алгоритмы повышения достоверности телеизмерений (тема1),
- алгоритмы исследования статического и динамического оценивания состояния (темы 2,3)
- алгоритмы достоверизации данных(тема 4)

Пособие включает в себя

- **практические занятия №1 «Помехозащищенные коды, используемые в телемеханических системах» и №2 «Помехоустойчивые коды, используемые в телемеханических системах», направленные на**

развитие у студентов навыков повышения достоверности телеизмерений путем использования помехозащищенных кодов различного вида , а именно

- кода с защитой по паритету (четности или нечетности);
- кода с повторениями;
- кода с повторением и инверсией;
- корреляционного (Манчестерского) кода;
- сменно-качественного (код Щукина) кода;
- кода Хэмминга;
- циклического кода;

- практические занятия №3 «Формирование системы уравнений оценивания состояния ЭЭС», №4 «Алгебраический и топологический методы формирования контрольных уравнений» и №5 «Оценивание состояния методом контрольных уравнений», предназначенные для развития навыков оценки параметров установившегося режима электроэнергетической системы путем формирования контрольных уравнений алгебраическим и топологическим методами и их решения методом множителей Лагранжа;

-практическое занятие №6 «Оценивание состояния системы дискретным фильтром Калмана», предназначенное для формирования навыков применения методов динамического оценивания состояния на примере использования фильтра Калмана;

-практические занятия №7 «Достоверизация данных методом контрольных уравнений», №8 «Алгоритм «наибольшего доверия» для поиска «плохих данных» и №9 «Алгоритм «наибольшей подозрительности» для поиска «плохих данных» предназначенные для формирования навыков достоверизации данных телеизмерений методом контрольных уравнений, с использованием:

- алгоритма «наибольшего доверия»;
- алгоритма «наибольшей подозрительности».

Тема 1. Методы повышения достоверности телеизмерений

Помехи и причины их возникновения

Различают две формы представления информации – непрерывную и дискретную. Поскольку носителями информации являются сигналы, то в качестве последних могут использоваться физические процессы различной природы, например, процесс протекания электрического тока в цепи. При этом информация представляется (отражается) значением одного или нескольких параметров физического процесса– (сигнала), либо комбинацией нескольких параметров. Сигнал называется непрерывным, если его параметр в заданных пределах может принимать любые промежуточные значения. Сигнал называется дискретным, если его параметр в заданных пределах может принимать отдельные фиксированные значения.

Для эффективного управления режимами энергосистемы нужно обладать как можно точной и достоверной информацией о параметрах, показывающее нынешнее состояние объекта. При осуществлении многих систем автоматического и автоматизированного диспетчерского управления появляются задачи обработки данных непосредственных измерений, получаемых с первичных датчиков и измерительных преобразователей. В дальнейшем схему состояния энергосистему как объекта управления формируется в виде информации, получаемой на базе средств телемеханики.

Существует и другой весьма важный для АСКУЭ показатель – погрешность передачи информации по линиям связи. Например, при использовании в составе АСКУЭ счетчика электрической энергии, оснащенного телеметрическим выходом, информация об измеряемой электрической энергии передается по линии связи в виде последовательности импульсов, частота следования которых пропорциональна измеряемой электрической мощности. Погрешность передачи информации проявляется в этом случае как погрешность счета импульсов вследствие наличия помех и тепловых шумов в линии связи. В случае передачи измерительной информации в цифровой форме от счетчика электрической энергии с цифровым выводом эта информация кодируется

двоичным кодом. В передаваемом сообщении каждый бит информации представлен соответствующим сигналом. Приемник измерительной информации регистрирует наличие или отсутствие сигнала и тем самым – каждый передаваемый бит сообщения. Вследствие наличия помех и тепловых шумов в линии связи передаваемый сигнал может быть также искажен.

К источникам помех, способных вызвать сбой или отказ устройства, относятся следующие помехи:

- Наносекундные помехи, вызванные срабатыванием механических контактов выключателей и реле. В зарубежной литературе этот вид помех называется EFT – Electric Fast Transients;

- Микросекундные помехи, связанные с работой реактивных элементов в цепях мощных нагрузок (зарядка конденсаторов, а также отдача энергии, накопленной в обмотках моторов, соленоидов, и пр.). В зарубежной литературе этот вид помех называется surge;

- Помехи от электростатических разрядов, в основном – помехи, возникающие при касании «наэлектризованным» человеком различных электрических цепей. В зарубежной литературе этот вид помех называется ESD – Electrostatic Discharge;

- Помехи, вызванные работой близкорасположенных радиопередатчиков;

- Помехи от мощных природных или искусственных источников энергии, прежде всего – от грозových разрядов.

Существуют российские и международные стандарты, оговаривающие требования к электромагнитной совместимости (ЭМС, аккумулирующие многолетний инженерный опыт, и разработанные таким образом, чтобы при испытании устройств имитировались реальные помехи. При этом все помехи делятся на три абстрактных типа:

- НП: Наносекундные помехи;
- МП: Мощные помехи;
- РП: Радиочастотные помехи.

Наносекундные помехи

Этот тип помех является причиной большинства сбоев. При всем своем разнообразии, наносекундные помехи обладают некоторыми общими свойствами:

- Одиночная НП – это почти дельта-функция, у нее чрезвычайно широкий спектр, до гигагерц;
- НП имеет ничтожную энергию, в отличие от МП она, как правило, не «выжигает» радиоэлектронные устройства, а вызывает обратимый сбой;
- Сбоить могут только устройства, обладающие памятью, такие как микропроцессоры, счетчики, и пр. Для чисто комбинационных цифровых схем понятие «сбой» теряет смысл, т.к. они автоматически возвращаются в нужное состояние по окончании НП. Заметим, что аналоговые схемы тоже могут обладать «памятью» в виде емкостей или индуктивностей.

В стандарте МЭК 61000-4-4 (ГОСТ Р 51317.4.4-99) отмечается, что EFT помехи должны имитироваться пачками треугольных импульсов. Длительность переднего фронта у каждого импульса 5 нс, длительность импульса 50 нс на уровне 50%. Внутреннее сопротивление генератора импульсов 50 Ом, генератор должен быть заземлен.

В линии питания и заземления тестовые НП импульсы инжектируются непосредственно, без развязки. С учетом достаточно низкого сопротивления генератора сигналов, величины импульсных токов, протекающих в цепях земли, могут достигать огромных величин.

Импульсные токи НП, протекающие по земляным цепям устройства, создают заметные падения напряжений между различными земляными точками, это может вызвать сбой.

Перекрестные помехи

Помимо внешних источников наносекундных помех, различные узлы внутри устройства сами могут генерировать взаимные помехи.

Обычно более опасными для аппаратуры являются помехи «провод – провод», поскольку они оказываются приложенными так же, как и полезный сигнал. Реальные помехи обычно представляют собой комбинацию помех «провод – провод» и «провод – земля».

Источники помех подразделяются на функциональные и нефункциональные.

Функциональные источники – это источники, которые вырабатывают и передают в окружающую среду электромагнитные волны с целью передачи полезной информации. Это прежде все радиопередатчики, генераторы высокой частоты для медицинских целей, микроволновые печи и др.

Нефункциональные источники – это устройства, при которых электромагнитный сигнал является «побочным продуктом». Помехи возникают в процессе выполнения заданных функций. Сюда относятся: помехи от люминесцентных ламп, сварочных аппаратов, схем выпрямления и др.

Помехи в электрических системах в зависимости от характера их протекания подразделяются на помехи установившегося режима и помехи переходных режимов.

Помехи установившегося режима возникают в нормальном режиме и длительно существуют. Сюда относятся устройства, служащие для производства, передачи и распределения электроэнергии и превращения ее в другие виды энергии, все разнообразие электрических и электронных устройств бытового назначения. Эти помехи носят периодический характер и располагаются в широком диапазоне частот: от нескольких герц до гигагерц.

Помехи переходных режимов возникают при изменении или нарушении нормального режима, могут носить аperiodический характер и существуют ограниченное время. Причинами появления таких помех являются: короткие замыкания, коммутации холостых линий, конденсаторных батарей, трансформаторов и т.д.

Помехи подразделяются по их спектральным характеристикам. Во-первых, помехи делятся на узкополосные и широкополосные. К первым

обычно относятся помехи от систем связи на несущей частоте, систем питания переменным током и т.п. Их отличительной особенностью является то, что характер изменения помехи во времени является синусоидальным или близким к нему. При этом спектр помехи близок к линейчатому (максимальный уровень – на основной частоте, меньший уровень – на частотах гармоник).

Широкополосные помехи имеют существенно несинусоидальный характер и обычно проявляются в виде либо отдельных импульсов, либо их последовательности. Для периодических широкополосных сигналов спектр состоит из большого набора пиков на частотах, кратных частоте основного сигнала. Для аperiodических помех спектр является непрерывным и описывается спектральной плотностью. Типичными широкополосными помехами являются:

- шум, создаваемый в сети питания аппаратуры при работе импульсного блока питания;
- молниевые импульсы;
- импульсы, создаваемые при коммутационных операциях.

На рисунке 1.1 приведена упрощённая схема движения информации, где прослеживается путь и преобразование информации от датчика (Д) до комплекса вычислительных средств.

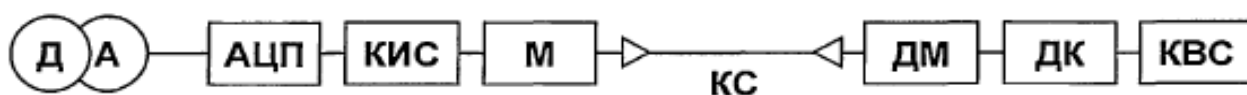


Рисунок 1.1 – Упрощенная схема движения информации

На начальной стадии сбора ТИ, при приеме электрического потенциала, являющегося аналоговым (А) измеряемого параметра, датчики фиксируют небольшую погрешность. Многие датчики устанавливаются на вторичную цепь измерительного трансформатора тока или напряжения, которые имеют свой класс точности, но в нередких случаях они работают не в своем заявленном классе точности.

В случаях передачи информации на длинные расстояния от объекта до КВС и использования ее в цифровых ЭВМ используют аналого-цифровое преобразование (АЦП) непрерывного электрического потенциала в дискретное (цифровое) отображение в виде той или иной кодовой комбинации единиц и нулей. Далее информация проходит через кодоимпульсную систему (КИС), основанную на цифровых двоичных кодах с использованием принципов повышения помехоустойчивости, модуляцию (М), канал связи (КС), демодуляцию (ДМ) и декодирование (ДК). Этапы модуляции, передачи информации по каналу связи и демодуляции предоставляют возможность практического обеспечения полного сохранения данных без потери точности. Это становится, возможно, поскольку используются аппаратные и программные средства поддержания помехоустойчивости кодовой информации.

На этапе АЦП появляется погрешность обработки ТИ, эти погрешности возникают из-за необходимости квантования информации. Квантование может выполняться как по уровню, так и по времени. Точность информации АЦП вычисляется при помощи точности числа разряда двоичного отображения ТИ. В свою очередь число квантов N определяется по формуле:

$$(2^n - 1) \quad (1.1)$$

где n – число разрядов представления числа в памяти ЭВМ. Исходя из этого, в системе телеметрии с n разрядами не предоставляется возможности представить ТИ величиной меньше одного кванта, которые вычисляется по формуле:

$$x_i / 2^n \quad (1.2)$$

где x_i – пропорциональная измеряемая величина. Исходя из этой формулы, можно сделать вывод о появлении погрешности при округлении или квантовании по уровню. В квантовании по уровню присутствуют два типа ошибок, такие как округление и усечение. Ошибка при округлении возникает из-за замены непрерывного сигнала ближайшим его значением, запись которого

возможна в памяти ЭВМ. При ошибке второго типа – тот же сигнал меняют на его самое близкое минимальное значение. Если сравнивать эти два типа квантования, то тип усечения проще, но простота этого способа влечет за собой больше количества ошибок, чем при типе округления.

Самым большим источником погрешности при получении ТИ является несинхронность от разных датчиков. На один КС последовательно по времени присоединяются несколько датчиков, опрос которых осуществляется циклом, образующих квант времени T . При циклическом опросе, получение ТИ колеблется от 5 до 20 секунд, а спорадическая посылка информации приводит к задержке ТИ до нескольких минут. Так же перегрузка канала связи может влиять на задержку при передаче данных. Вследствие несинхронности исходных данных увеличивается погрешность оценки параметров режима, что приводит снижению эффективности управления.

Для передачи в канал связи сообщения преобразуются в сигналы. Символы, при помощи которых создаются сообщения, образуют первичный алфавит, при этом каждый символ характеризуется вероятностью его появления в сообщении. Каждому сообщению однозначно соответствует сигнал, представляющий определенную последовательность элементарных дискретных символов, называемых кодовыми комбинациями.

Кодирование – это преобразование сообщений в сигнал, т.е. преобразование сообщений в кодовые комбинации.

Классификация помехоустойчивых кодов

В непрерывных кодах передаваемая информационная последовательность не разделяется на блоки. Избыточные элементы размещаются в определенном порядке между информационными. Равномерные блочные коды делятся на делимые и неделимые. В делимых кодах элементы информационной и проверочной частей кодовой комбинации всегда стоят на определенных местах. В неделимых кодах деление на информационные и проверочные разряды отсутствует.

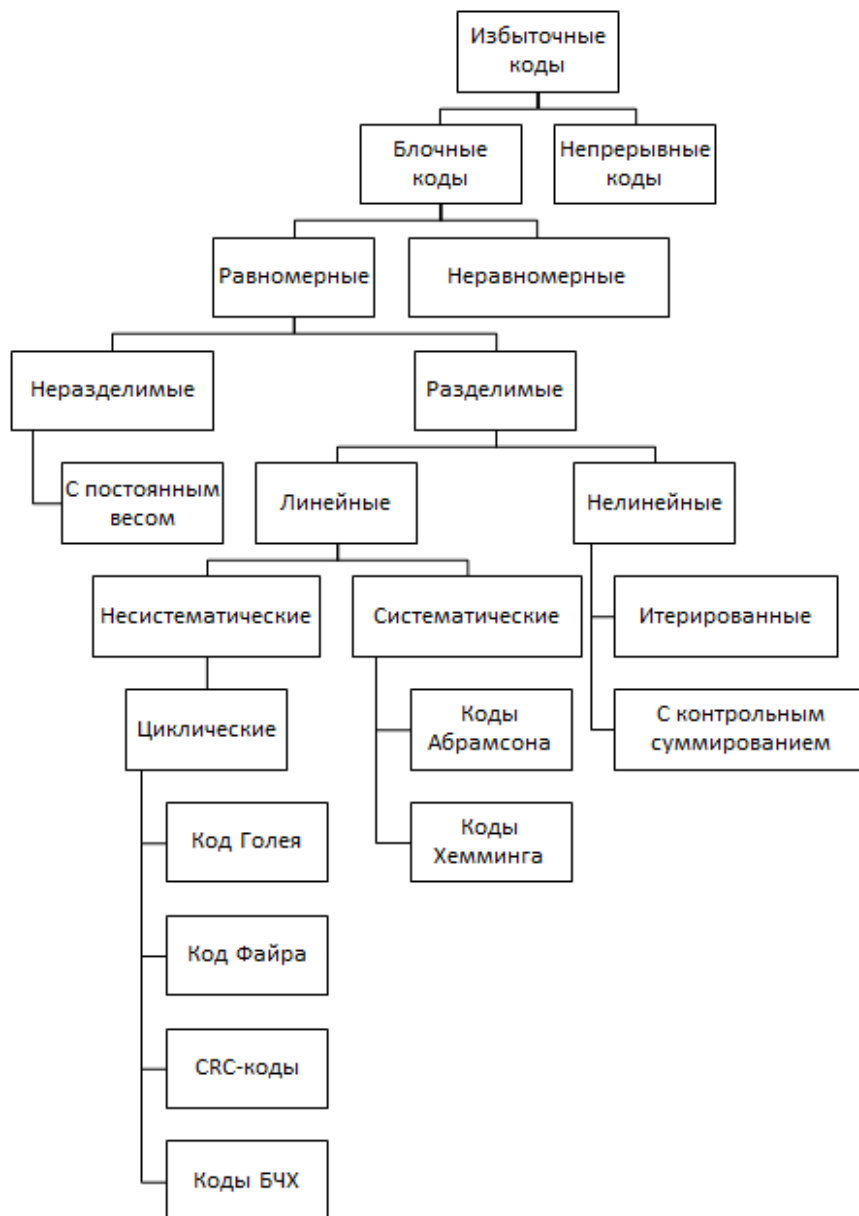


Рисунок 1.2 – Классификация избыточных кодов

Помехоустойчивое кодирование предполагает введение в передаваемое сообщение, наряду с информационными, так называемых проверочных разрядов, формируемых в устройствах защиты от ошибок (кодерах—на передающем конце, декодерах — на приемном). Избыточность позволяет отличить разрешенную и запрещенную (искаженную за счет ошибок) комбинации при приеме, иначе одна разрешенная комбинация переходила бы в другую.

Существующие помехоустойчивые коды можно разделить на ряд групп, только часть из которых используется для обнаружения ошибок в передаваемых по сети пакетах. В группе систематических (линейных) кодов общим свойством является то, что любая разрешенная комбинация может быть получена в результате линейных операций над линейно–независимыми векторами.

Простейшими систематическими кодами являются биты четности/нечетности. Они не позволяют обнаружить ошибки четной кратности (т.е. ошибки одновременно в двух, четырех и т.д. битах) и поэтому используются при невысоких требованиях к верности принимаемых данных (или при малой вероятности ошибок в линии передачи).

Помехоустойчивость кодирования обеспечивается за счет введения избыточности в кодовые комбинации, т.е. за счет того, что не все символы в кодовых комбинациях используются для передачи информации. Все помехоустойчивые коды можно разделить на два основных класса: блочные и непрерывные (рекуррентные или цепные).

В настоящее время решением проблемы недостоверности и недостаточности данных является внедрение качественно новых систем мониторинга и управления режимами сетей: «Интеллектуальных сетей» (в зарубежной литературе — Smart Grid) и входящих в их состав систем мониторинга переходных режимов (СМПП) (аналог зарубежных WAMS/WACS систем). Особенностью WAMS/WACS, в отличие от существующих систем телеметрии, является жесткая временная синхронизация измеряемых параметров режима на базе принимаемых с навигационных спутников сигналов точного времени, что позволяет измерять фазовые углы токов и напряжений в разных точках сети. В качестве измерительных органов в WAMS/WACS используются специальные устройства Phasor Measurement Units (PMU), устанавливаемые на электростанциях и подстанциях и подключаемые к измерительным трансформаторам тока (ТТ) и напряжения (ТН).

Устройства синхронизированных векторных измерений или PMU (phasor measurement unit) — это приборы, которые измеряют комплексные величины

напряжения и тока. Рассматриваемые устройства в большей степени подходят по свойствам к требованиям современных ИЭУ:

- быстрота и точность синхронных измерений,
- высокая степень достоверности контроля параметров режима энергосистемы в условиях интенсивных электромагнитных и электромеханических переходных процессов.

При наличии достоверных измерений, полученных от PMU и достаточных для выполнения расчета потокораспределения, процедуру оценивания состояния можно заменить расчетом установившегося режима.

Помехозащищенные коды, используемые в телемеханических системах

Цель и содержание: Развитие у студентов знаний о методах повышения достоверности телеизмерений.

Знания: методы повышения достоверности телеизмерений

Умения: применять методы и алгоритмы проверки достоверности телеизмерений

Владения: навыками повышения достоверности телеизмерений

Краткие теоретические сведения

Для снижения погрешности при передаче информации используется помехозащищенное кодирование сообщений. Сообщения передаются специально выбранным способом записи сведений. Для этого используется некоторый набор исходных символов, посредством которых каждому дискретному сообщению ставится в соответствие определенная последовательность (комбинация) символов. Формирование слов с помощью исходных символов называется кодированием. Код – это множество построенных по определенному правилу последовательностей символов, называемых кодовыми комбинациями. Для построения кода чаще всего используют цифры одной из систем счисления.

При передаче сообщения по каналу связи каждая кодовая комбинация несет полученную информацию. Однако из-за внешних воздействий на канал связи (электромагнитные наводки, электрические разряды и т.д.) и внутренних сбоев в работе аппаратуры передачи появляются помехи, искажающие кодовые комбинации. В одной кодовой комбинации может быть искажено несколько сигналов, однако вероятность двойного (и более) искажения одной кодовой комбинации чрезвычайно мала, поэтому часто отстройка от таких помех не осуществляется.

Помехозащищенное кодирование – кодирование сигнала, позволяющее восстановить без искажений исходный сигнал при ограниченных искажениях

кодированной последовательности бит. Это может быть достигнуто только передачей дополнительных бит, т.е. помехозащищенный сигнал всегда длиннее, чем исходный сигнал.

Код с защитой по паритету (четности или нечетности).

Простой двоичный код делится защитным разрядом, дополняющим число единиц до четности (или нечетности)

Таблица 1.2 – Кодирование с защитой по паритету

Число	0	1	2	3	4	5	6	7
Простой код	000	001	010	011	100	101	110	111
Код с защитой по четности	0000	0011	0101	0110	1001	1010	1100	1111

Такой код позволяет обнаруживать все ложные комбинации с одной, тремя, пятью (нечетными) ошибками.

Код с повторениями.

Каждая комбинация двоичного кода повторяется. Приемник фиксирует совпадение значений принятых значений в первой и второй части кода. Например:

$$3 = 011_2 = 011011_{\text{код}}$$

Такой код обнаруживает все ошибки нечетной кратности и значит часть ошибок нечетной кратности.

Код с повторением и инверсией.

В зависимости от четности числа единиц в исходном двоичном коде он либо просто повторяется, либо при повторении инвертируется.

Таблица 1.3 – Кодирование с повторением и инверсией

Число	0	1	2	3	4	5
Простой код	000	001	010	011	100	101
Код с повторением и инверсией	000000	001110	010101	011011	100011	101101

Корреляционный код (Манчестер код)

Каждый разряд двоичного кода записывается в виде двух символов: если в разряде двоичного кода стоит 0, то в корреляционном коде этот разряд записывается как 01. Если 1 – то символами 10. при этом приемное устройство на каждом такте должно зафиксировать переход от единицы до нуля или наоборот. Например:

$$0 = 000_2 = 010101$$

$$1 = 001_2 = 010110$$

$$5 = 101_2 = 100110$$

Сменно–качественные коды (код Щукина)

Это коды с обязательной сменой символов в соседних разрядах, т.е. размещенные рядом символы не могут быть одинаковыми. При этом число символов кода (алфавит) должно быть больше или равно 3 (0,1,2). Здесь комбинации 012, 010, 201 являются разрешенными, а комбинации 001, 011, 220 запрещенными. Т.е. СК–коды являются не двоичными и для их передачи нужны сигналы с числом информационных признаков не менее трех. Часто для этих целей используется дискретная широтно–импульсная модуляция (ДШИМ)

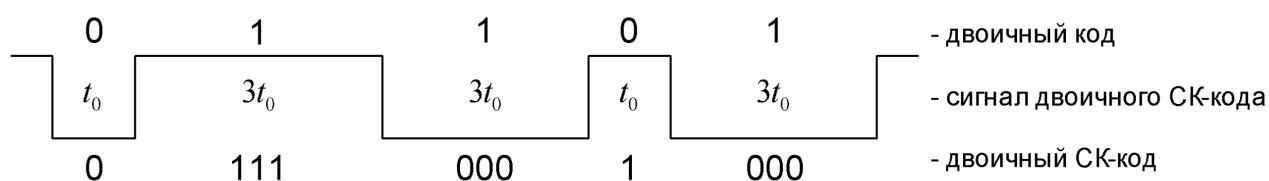


Рисунок 1.3 – Дискретная широтно–импульсная модуляция

Оборудование и материалы

Для выполнения лабораторной работы необходим персональный компьютер со следующими характеристиками: процессор Intel Pentium с тактовой частотой не менее 800 МГц, оперативная память – не менее 64 Мбайт, свободное дисковое пространство – не менее 250 Мбайт, устройство для чтения

компакт-дисков, монитор типа Super VGA (число цветов – 256) с диагональю не менее 15”. Программное обеспечение – операционная система WINDOWS 2000 / XP / Vista / 7 и выше.

Указания по технике безопасности

Техника безопасности при выполнении лабораторной работы совпадает с общепринятой для пользователей персональных компьютеров: самостоятельно не производить ремонт персонального компьютера, установку и удаление программного обеспечения; в случае неисправности персонального компьютера сообщить об этом обслуживающему персоналу лаборатории (оператору, администратору); соблюдать правила техники безопасности при работе с электрооборудованием; не касаться электрических розеток металлическими предметами; рабочее место пользователя персонального компьютера должно содержаться в чистоте; не разрешается возле персонального компьютера принимать пищу, напитки.

Задание для практического расчета

1. В соответствии со своим вариантом получить числа, которые необходимо представить в виде кодовой комбинации (таблица 1.4)
2. Представить эти числа в двоичной системе счисления. (таблица 1.4)
3. Представить эти числа в виде соответствующего кода (таблица 1.4)
4. В соответствии со своим вариантом декодировать числа из соответствующих кодов (таблица 1.5, 1.6)
5. Доказать, что данные системы кодирования распознают не все возможные ошибки.

Таблица 1.4 – Исходные данные и форма для выполнения заданий 1–3

Вар.	Число	Двоичное число (9 разрядов)	Код с защитой по паритету	Код с повторением	Манчестер код	Код Щукина	Код с повторением и инверсией
1	230						
	318						
2	235						
	335						
3	215						
	355						

Вар.	Число	Двоичное число (9 разрядов)	Код с защитой по паритету	Код с повторением	Манчестер код	Код Щукина	Код с повторением и инверсией
4	218						
	328						
5	222						
	333						
6	240						
	321						
7	246						
	312						
8	220						
	315						
9	243						
	319						
10	226						
	314						
11	219						
	341						
12	227						
	343						
13	240						
	318						
14	225						
	337						
15	219						
	327						

Таблица 1.5 – Исходные данные и форма для выполнения задания 4

Вар.	Манчестер код	Двоичный код	Числ о	Код Щукина	Двоичны й код	Число
1	010110101001			1110001010111000		
	101010010101			1110111010001000		
2	101010100101			1110001110001000		
	101001010110			0001110101000111		
3	010101101001			000101011100010		
	100101010110			00011100010111000		
4	100101101010			101011100011101		
	011010011001			111000101011101		
5	100110100101			1011100010111000		
	101010010110			1110001110001010		
6	101001010110			11101110101110		
	101010011010			101110001010111		
7	101001011010			1010111000111010		
	100101011010			1110111010001000		
8	100110011010			10001000101000		
	011010011001			111010001000101		
9	100101011010			111010101000		

Вар.	Манчестер код	Двоичный код	Число	Код Щукина	Двоичный код	Число
	010101100101			1110001010111000		
10	100101010110			11101010001110		
	101001010110			1110001010111000		
11	100110101001			10111000101110001		
	101001101010			101110111000101		
12	101010011010			11101010001000		
	101001010101			00010001011101		
13	010110100110			0001110101000111		
	010110101001			0001010101110		
14	011010100101			1110001010111000		
	100101011010			11101110001010		
15	101010010101			11101010001110		
	101001010110			0001010111010		

Таблица 1.6 – Исходные данные и форма для выполнения задания 4

Вар.	Код с защитой по паритету	Число	Код с повторением	Число	Код с повторением инверсией	Число
1	0110100001		110010110010		100001011110	
	1001110110		101101101101		100011011100	
2	1010010111		011001011001		111001000110	
	0111001000		110100110100		110011001100	
3	1010101110		101101101101		100111011000	
	0111000100		111000111000		101001010110	
4	0111000111		100011100011		110001001110	
	1010001010		101001101001		100111011000	
5	1010001100		110011110011		110011001100	
	0111000001		101110101110		101110010001	
6	0111000111		111001111001		100110011001	
	1010001010		110001110001		101111010000	
7	1010100001		101011101011		110010001101	
	0110111111		111001111001		101101010010	
8	0110110011		101100101100		011001100110	
	1010001111		101111101111		110100001011	
9	1010000011		100001100001		101101010010	
	0110100111		100011100011		111000000111	
10	0110100010		111001111001		100011011100	
	1010001100		110011110011		101001010110	
11	1010010010		100111100111		110011001100	
	0111001011		101001101001		101110010001	
12	0110011011		110001110001		111001000110	
	1010100100		100111100111		110001001110	
13	1010101101		110011110011		101011010100	
	0111001110		101110101110		111001000110	
14	1010000110		100110100110		101100010011	
	0111010011		101111101111		101111010000	

Вар.	Код с защитой по паритету	Число	Код с повторением	Число	Код с повторением и инверсией	Число
15	0111001000		110000110000		100001011110	
	1010010001		111001111001		100011011100	

Требования к отчету:

Отчет должен содержать:

- 1) Заполненный фрагмент таблицы 1.4, содержащий строки своего варианта
- 2) Заполненные фрагменты таблиц 1.5 и 1.6, содержащие строки своего варианта
- 3) Примеры кодов, сформированных для решения задания 5.

Контрольные вопросы

1. Назовите основные источники помех
2. Назовите свойства наносекундных помех
3. Назовите причины возникновения перекрестных помех
4. Что называется функциональным источником помех?
5. Что относится к нефункциональным источникам помех?
6. Назовите виды помех в электрических системах
7. Опишите схему движения информации от датчика до комплекса вычислительных средств
8. Какие коды называются помехоустойчивыми?
9. За счет чего обеспечивается помехоустойчивость кодирования?
10. Опишите особенности помехозащищенных кодов
11. Какие ошибки не позволяет обнаружить код с защитой по паритету?
12. В чем преимущество сменно-качественных кодов?
13. Опишите алгоритм формирования сменно-качественного кода
14. Опишите алгоритм формирования кода Щукина
15. Опишите алгоритм формирования кода с повторением и инверсией

Рекомендуемая литература

6, 9, 11

Помехоустойчивые коды, используемые в телемеханических системах

Цель и содержание: Развитие у студентов знаний о методах повышения достоверности телеизмерений.

Знания: методы повышения достоверности телеизмерений

Умения: применять методы и алгоритмы проверки достоверности телеизмерений

Владения: навыками повышения достоверности телеизмерений

Краткие теоретические сведения

Помехоустойчивым кодированием называют кодирование, предназначенное для передачи данных по каналам с помехами и обеспечивающее исправление возможных ошибок передачи вследствие помех. Для обнаружения ошибок используют коды обнаружения ошибок, для исправления –помехоустойчивые коды.

Чаще всего используются 2 типа кодов:

- коды Хэмминга
- циклические коды

Коды Хэмминга – наиболее известные и, вероятно, первые из самоконтролирующихся и самокорректирующихся кодов. Построены они применительно к двоичной системе счисления.

Код Хэмминга состоит из двух частей:

Первая часть кодирует исходное сообщение, вставляя в него в определённых местах контрольные биты (вычисленные особым образом).

Вторая часть получает входящее сообщение и заново вычисляет контрольные биты (по тому же алгоритму, что и первая часть). Если все вновь вычисленные контрольные биты совпадают с полученными, то сообщение получено без ошибок. В противном случае, выводится сообщение об ошибке и при возможности ошибка исправляется.

Пример:

Исходное сообщение 0100 0100 0011 1101 состоит из 16 бит

16. Добавление контрольных бит

Прежде всего, необходимо вставить контрольные биты. Они вставляются в строго определённых местах – это позиции с номерами, равными степеням двойки. В данном случае (при длине информационного слова в 16 бит) это будут позиции 1, 2, 4, 8, 16. Соответственно, получилось 5 контрольных бит (выделены красным цветом):

0000 1000 0100 0010 1110 1

Таким образом, длина всего сообщения увеличилась на 5 бит. До вычисления самих контрольных бит, им присвоили значение «0».

2) Вычисление контрольных бит.

Значение каждого контрольного бита зависит от значений информационных бит, но не от всех, а только от тех, которые этот контрольных бит контролирует.

Контрольный бит с номером N контролирует все последующие N бит через каждые N бит, начиная с позиции N.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	
0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1	1	1	0	1	
X		X		X		X		X		X		X		X		X		X		X	1
	X	X			X	X			X	X			X	X			X	X			2
			X	X	X	X					X	X	X	X					X	X	4
							X	X	X	X	X	X	X	X							8
															X	X	X	X	X	X	16

Рисунок 1.4 – Пример вычисления

Здесь знаком «X» обозначены те биты, которые контролирует контрольный бит, номер которого справа. То есть, к примеру, бит номер 12 контролируется битами с номерами 4 и 8. Чтобы узнать какими битами контролируется бит с номером N надо просто разложить N по степеням двойки.

Для каждого контрольного бита определяется, сколько среди контролируемых им битов единиц. Если их нечетное количество, то контрольный бит равен 1, иначе – 0.

Высчитав контрольные биты для нашего информационного слова получаем следующее:

1001 1000 0100 0010 1110 1 – это закодированное сообщение

17. Декодирование и исправление ошибок.

Допустим, после передачи сообщение пришло с ошибкой в 11 бите:

1001 1000 0110 0010 1110 1

Вся вторая часть алгоритма заключается в том, что необходимо заново вычислить все контрольные биты (так же как и в первой части) и сравнить их с контрольными битами, которые получили при кодировании. Так, посчитав контрольные биты с неправильным 11–ым битом получаем сообщение:

0101 1001 0110 0010 1110 1

Контрольные биты под номерами: 1, 2, 8 не совпадают с такими же контрольными битами, которые получили. При кодировании.

Для получения позиции ошибки достаточно сложить номера ошибочных контрольных бит: $1+2+8=11$. Следовательно, ошибка в 11 бите.

Данный алгоритм позволяет обнаружить единичную ошибку. Для обнаружения большего количества ошибок используют усложненные коды Хэмминга.

Циклический избыточный код (англ. Cyclic redundancy code, CRC) – алгоритм вычисления контрольной суммы, предназначенный для проверки целостности передаваемых данных. Алгоритм CRC обнаруживает все одиночные ошибки, двойные ошибки и ошибки в нечетном числе битов. Понятие циклических кодов достаточно широкое, однако на практике его обычно используют для обозначения только одной разновидности, использующей циклический контроль (проверку) избыточности. В связи с этим в англоязычной литературе CRC часто расшифровывается как Cyclic Redundancy Check.

Основная идея вычисления CRC заключается в следующем. Исходная последовательность битов, которой могут быть и огромный файл, и текст размером несколько слов и даже символов, представляется единой

последовательностью битов. Эта последовательность делится на некоторое фиксированное двоичное число (полином, CRC–полином, генераторный полином, англ. Generator polynomial). Интерес представляет остаток от этого деления, который и является значением CRC. Все, что теперь требуется, – это некоторым образом запомнить его и передать вместе с исходной последовательностью. Приемник данной информации всегда может таким же образом выполнить деление и сравнить его остаток с исходным значением CRC. Если они равны, то считается, что исходное сообщение не повреждено, и т. д.

Степенью CRC–полинома W называют позицию самого старшего единичного бита. Например, степенью полинома 10011_2 равна 4.

Для вычисления CRC используют специальную т.н. полиномиальную арифметику. Вместо представления делителя, делимого (сообщения), частного и остатка в виде положительных целых чисел, можно представить их в виде полиномов с двоичными коэффициентами или в виде строки бит, каждый из которых является коэффициентом полинома.

Например, десятичное число 23 в двоичной системе будет иметь вид: 10111_2 , что совпадает с полиномом: $1 \cdot x^4 + 0 \cdot x^3 + 1 \cdot x^2 + 1 \cdot x^1 + 1 \cdot x^0$ или упрощенно $x^4 + x^2 + x^1 + x^0$.

И сообщение, и делитель могут быть представлены в виде полиномов, с которыми можно выполнять любые арифметические действия.

Сложение двух чисел в CRC арифметике полностью аналогично обычному арифметическому действия за исключением отсутствия переносов из разряда в разряд. Это означает, что каждая пара битов определяет результат своего разряда вне зависимости от результатов других пар. Например:

$$\begin{array}{r} + \quad 10011011 \\ \quad 11001010 \\ \hline \quad 01010001 \end{array} \quad \begin{array}{r} - \quad 10011011 \\ \quad 11001010 \\ \hline \quad 01010001 \end{array}$$

Рисунок 1.5 – Пример сложение двух чисел в CRC

Т.е. и при сложении и при вычитании над каждым битом в отдельности выполняется операция, аналогичная операции XOR, поэтому в CRC арифметике две арифметические операции (сложение и вычитание) заменяются операцией XOR.

Умножение, как и в обычной арифметике, считается суммой значений первого сомножителя, сдвинутых в соответствии со значением второго сомножителя. Причем при суммировании так же используется CRC сложение. Например:

$$\begin{array}{r}
 1101 \\
 1011 \\
 \hline
 1101 \\
 1101. \\
 0000.. \\
 1101... \\
 \hline
 1111111
 \end{array}$$

Рисунок 1.6 – Пример умножения двух чисел в CRC

Деление в CRC арифметике определяется аналогично с учетом того, что вычитание выполняется по правилам CRC арифметики (рис.1.7).

Перед началом вычисления CRC исходное сообщение следует дополнить W нулями справа и выполнить деление по правилам CRC-арифметики. Рассмотрим пример:

Исходное сообщение: 1101011011

Генераторный полином: 10011

Сообщение, дополненное W битами: 11010110110000

$$\begin{array}{r}
 1\ 1\ 0\ 1\ 0\ 1\ 1\ 0\ 1\ 1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ | \ 1\ 0\ 0\ 1\ 1 \\
 1\ 0\ 0\ 1\ 1 \\
 \hline
 1\ 0\ 0\ 1\ 1 \\
 1\ 0\ 0\ 1\ 1 \\
 \hline
 0\ 0\ 0\ 0\ 1 \\
 0\ 0\ 0\ 0\ 0 \\
 \hline
 0\ 0\ 0\ 1\ 0 \\
 0\ 0\ 0\ 0\ 0 \\
 \hline
 0\ 0\ 1\ 0\ 1 \\
 0\ 0\ 0\ 0\ 0 \\
 \hline
 0\ 1\ 0\ 1\ 1 \\
 0\ 0\ 0\ 0\ 0 \\
 \hline
 1\ 0\ 1\ 1\ 0 \\
 1\ 0\ 0\ 1\ 1 \\
 \hline
 0\ 1\ 0\ 1\ 0 \\
 0\ 0\ 0\ 0\ 0 \\
 \hline
 1\ 0\ 1\ 0\ 0 \\
 1\ 0\ 0\ 1\ 1 \\
 \hline
 0\ 1\ 1\ 1\ 0 \\
 0\ 0\ 0\ 0\ 0 \\
 \hline
 1\ 1\ 1\ 0 = \text{Остаток}
 \end{array}$$

Рисунок 1.7 – Пример деления чисел в CRC

$$\begin{array}{r}
 1\ 1\ 0\ 1\ 0\ 1\ 1\ 0\ 1\ 1 \leftarrow \text{Исходное сообщение} \\
 1\ 1\ 0\ 1\ 0\ 1\ 1\ 0\ 1\ 1 + 0\ 0\ 0\ 0 \leftarrow \text{Выровненное сообщение} \\
 \downarrow \\
 \begin{array}{r}
 1\ 1\ 0\ 1\ 0\ 1\ 1\ 0\ 1\ 1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ | \ 1\ 0\ 0\ 1\ 1 \leftarrow \text{Полином} \\
 1\ 0\ 0\ 1\ 1 \\
 \hline
 1\ 0\ 0\ 1\ 1 \\
 1\ 0\ 0\ 1\ 1 \\
 \hline
 0\ 0\ 0\ 0\ 1 \\
 0\ 0\ 0\ 0\ 0 \\
 \hline
 0\ 0\ 0\ 1\ 0 \\
 0\ 0\ 0\ 0\ 0 \\
 \hline
 0\ 0\ 1\ 0\ 1 \\
 0\ 0\ 0\ 0\ 0 \\
 \hline
 0\ 1\ 0\ 1\ 1 \\
 0\ 0\ 0\ 0\ 0 \\
 \hline
 1\ 0\ 1\ 1\ 0 \\
 1\ 0\ 0\ 1\ 1 \\
 \hline
 0\ 1\ 0\ 1\ 0 \\
 0\ 0\ 0\ 0\ 0 \\
 \hline
 1\ 0\ 1\ 0\ 0 \\
 1\ 0\ 0\ 1\ 1 \\
 \hline
 0\ 1\ 1\ 1\ 0 \\
 0\ 0\ 0\ 0\ 0 \\
 \hline
 1\ 1\ 1\ 0 = \text{Остаток} = \text{Контрольная сумма!}
 \end{array}
 \end{array}$$

$\uparrow$
 Частное (оно отбрасывается, т.к. не представляет интереса)

Рисунок 1.8 – Пример вычисления CRC

Как видно, контрольная сумма (CRC) в этом примере равна 1110. Как правило, контрольная сумма добавляется к исходному сообщению (в нашем примере передаваемое сообщение будет равно 11010110111110) и полученное расширенное сообщение передается через канал связи.

На другом конце канала приемник может сделать одно из возможных действий (оба варианта совершенно равноправны):

1. Выделить текст собственно сообщения, вычислить для него контрольную сумму (не забыв при этом дополнить сообщение W битами), и сравнить ее с переданной.

2. Вычислить контрольную сумму для всего переданного сообщения (без добавления нулей), и посмотреть, получится ли в результате нулевой остаток.

Поскольку исходное сообщение может быть очень большим (до нескольких Мбайтов) и так же из-за того, что для получения CRC используется CRC-арифметика, использовать обычную компьютерную операцию деления нельзя.

Оборудование и материалы

Для выполнения лабораторной работы необходим персональный компьютер со следующими характеристиками: процессор Intel Pentium с тактовой частотой не менее 800 МГц, оперативная память – не менее 64 Мбайт, свободное дисковое пространство – не менее 250 Мбайт, устройство для чтения компакт-дисков, монитор типа Super VGA (число цветов – 256) с диагональю не менее 15". Программное обеспечение – операционная система WINDOWS 2000 / XP / Vista / 7 и выше.

Указания по технике безопасности

Техника безопасности при выполнении лабораторной работы совпадает с общепринятой для пользователей персональных компьютеров: самостоятельно не производить ремонт персонального компьютера, установку и удаление программного обеспечения; в случае неисправности персонального компьютера сообщить об этом обслуживающему персоналу лаборатории (оператору,

администратору); соблюдать правила техники безопасности при работе с электрооборудованием; не касаться электрических розеток металлическими предметами; рабочее место пользователя персонального компьютера должно содержаться в чистоте; не разрешается возле персонального компьютера принимать пищу, напитки.

Задание для практического расчета

1. В соответствии со своим вариантом закодировать числа с помощью кода Хэмминга (таблица 1.7).
2. Найти в полученном сообщении ошибку, исправить ее (если есть) и определить, какое число передавалось (таблица 1.8).
3. В соответствии со своим вариантом закодировать и декодировать числа с помощью CRC–кода (таблица 1.9).

Таблица 1.7 – Исходные данные и форма для выполнения задания 1

Вариант	Число	Передаваемое сообщение
1	230	
	318	
2	235	
	335	
3	215	
	355	
4	218	
	328	
5	222	
	333	
6	240	
	321	
7	246	
	312	
8	220	
	315	
9	243	
	319	
10	226	
	314	
11	219	
	341	
12	227	
	343	
13	240	

	318	
14	225	
	337	
15	219	
	327	

Таблица 1.8 – Исходные данные и форма для выполнения задания 2

Вариант	Передаваемое сообщение	Число
1	001110100101	
	111100100100	
2	111010100111	
	111111110011	
3	011010110111	
	111011101010	
4	101010111101	
	111001110101	
5	011110110101	
	101110111100	
6	011100110101	
	011100100111	
7	001111100001	
	111101000111	
8	111100100100	
	101010100110	
9	111111110011	
	001110100101	
10	111011101010	
	011010110111	
11	111001110101	
	101010111101	
12	101110111100	
	011110110101	
13	011100100111	
	011100110101	
14	111101000111	
	001111100001	
15	101010100110	
	111100100100	

Таблица 1.9 – Исходные данные и форма для выполнения задания 3

Вариант	Число	Генераторный полином	Передаваемое сообщение	Раскодированное число
1	860	10011		
	755	11111		
2	730	11001		
	911	10011		

Вариант	Число	Генераторный полином	Передаваемое сообщение	Раскодированное число
3	1002	11111		
	822	11001		
4	655	10011		
	731	11111		
5	940	11001		
	712	10011		
6	988	11111		
	612	11001		
7	750	10011		
	911	11111		
8	640	11001		
	923	10011		
9	877	11111		
	711	11001		
10	980	10011		
	622	11111		
11	974	11001		
	745	10011		
12	690	11111		
	870	11001		
13	842	10011		
	740	11111		
14	902	11001		
	1005	10011		
15	862	11111		
	1002	11001		

Требования к отчету:

Отчет должен содержать:

- 1) Заполненный фрагмент таблицы 1, содержащий строки своего варианта и ход решения задания 1.
- 2) Заполненный фрагмент таблицы 2, содержащий строки своего варианта и ход решения задания 2.
- 2) Заполненный фрагмент таблицы 3, содержащий строки своего варианта и ход решения задания 3.

Контрольные вопросы

1. Какое кодирование называют помехоустойчивым?
2. Поясните принцип работы кода Хэмминга

3. К какой группе кодов относится код Хэмминга?
4. Что используется для обнаружения ошибки в коде Хэмминга?
5. Как рассчитываются контрольные биты в коде Хэмминга?
6. Какие ошибки позволяет обнаружить код Хэмминга?
7. К какой группе кодов относится код CRC?
8. Что используется для обнаружения ошибки в CRC?
9. Поясните принцип работы CRC
10. Что называется CRC–полиномом?
11. Как вычисляется контрольная сумма в CRC?
12. Какие ошибки позволяет обнаружить CRC?

Рекомендуемая литература

6,9,11

ТЕМА 2. СТАТИЧЕСКОЕ ОЦЕНИВАНИЕ СОСТОЯНИЯ

Одним из основных требований, которым должна удовлетворять система энергетики, является надежность ее функционирования. Повышение надежности функционирования обеспечивается как увеличением надежности элементов основной системы, их резервированием и т.д. (то есть надежности объекта управления), так и увеличением надежности системы управления. Уровень надежности системы в значительной мере определен качеством исходной информации, используемой при управлении.

При создании автоматизированной системы диспетчерского управления электроэнергетической системой, базирующейся на использовании ЭВМ, совершенствование качества и надежности управления обычно сопровождается увеличением сложности моделей, используемых для решения задач управления. Как правило более точные модели и алгоритмы требуют более точной исходной информации. В ряде случаев они перестают быть работоспособными при случайном исчезновении некоторых компонент исходных данных; грубые ошибки в исходной информации могут приводить к резким искажениям решения.

Возможности для построения алгоритмов, увеличивающих надежность и качество исходных данных, определяются следующими условиями:

- обычно имеет место определенная избыточность исходных данных в результате получения одних и тех же сведений из нескольких источников, а также из-за повторного опроса;
- ряд показателей функционирования системы, передаваемых в качестве исходных данных для управления, связан физическими, логическими, экономическими закономерностями друг с другом;
- имеется статистический материал, накопленный в результате функционирования системы, который позволяет установить статистические характеристики и взаимосвязи получаемых данных и распределения отдельных показателей;

- имеется информация о плановых значениях показателей функционирования системы, допустимых границах их изменения.

В комплексе задач автоматизированной системы диспетчерского управления электроэнергетической системой (ЭЭС) важное место занимают алгоритмы обработки исходной информации, обеспечивающие повышение достоверности данных, поступающих от измерительной системы и дают возможность получения недостающей исходной информации путем анализа ретроспективных сведений. Эти алгоритмы можно условно разделить на алгоритмы оценивания текущего состояния и алгоритмы идентификации.

Целью алгоритмов обработки исходной информации является повышение достоверности поступающих сведений путем фильтрации помех, получение недостающих данных на основе статистического анализа ретроспективных показателей, включая знание физических соотношений между параметрами режима в ЭЭС в каждый момент времени и законов изменения процессов во времени.

Можно выделить две основные подсистемы алгоритмов обработки исходной информации:

- 1) Оценивание текущего и будущего состояния системы, где основными оцениваемыми параметрами являются параметры режима ЭЭС, включая нагрузку потребителей.

- 2) Оценивание (идентификация) моделей ЭЭС, используемых при оценивании состояния и принятии решения. Оцениваемые параметры – это параметры элементов схемы замещения системы (сопротивления, проводимости, статические характеристики нагрузок и т.д.) либо параметры, входящие как константы моделей динамики системы и ее элементов, например, параметры уравнений, по которым осуществляется прогноз нагрузки и которые отражают изменение нагрузок во времени [1].

Задача оценивания состояния (ОС) заключается в определении установившегося режима энергосистемы, характеризуемого «вектором состояния» (компонентами которого служат модули и фазы узловых

напряжений) по данным ТИ, ПИ и других измерений параметров режима. Поскольку все измерения содержат некоторые погрешности, вектор состояния дает лишь оценку реального режима, причем оценка тем точнее, чем больше избыточность и меньше погрешности измерений. Кроме того, точность оценки зависит от соответствия расчетной схемы реальной схеме энергосистемы. При введении в состав оцениваемых переменных параметров модели (например, сопротивлений эквивалентной схемы сети) задача оценивания состояния превращается в задачу идентификации.

Обычные статистические методы оценивания состояния эффективны, когда производится ряд независимых наблюдений одного и того же состояния объекта. Для ЭЭС такой подход не пригоден, так как состояние объекта непрерывно меняется и потому два наблюдения в последовательные моменты времени далеко не всегда позволяют отличить ошибки от действительного изменения процесса. Выход состоит в использовании того факта, что измерения отдельных параметров режима в один и тот же момент времени зависимы, поскольку измеряемые величины связаны между собой физическими соотношениями типа законов Ома и Кирхгофа. Это обстоятельство и позволяет минимизировать ошибки измерений и повысить надежность получаемой информации, т.е. произвести так называемое статическое оценивание состояния. Дополнительные возможности для увеличения надежности информации возникают при наличии информации о динамике изменения системы (или внешних воздействий на нее) и соответственно при рассмотрении последовательных моментов времени [1].

Математическая модель ЭЭС

Режим ЭЭС определяется значениями активных и реактивных мощностей станций и нагрузок потребителей в узлах, перетоками активной и реактивной мощности по линиям электропередач и другим элементам системы, токами в них, модулями напряжений в узлах, изменяемыми в процессе управления параметрами элементов, среди которых в первую очередь следует отметить регулируемые коэффициенты трансформации. Набор всех этих параметров,

представляющих собой наиболее быстроизменяющуюся информацию об ЭЭС, будем ниже называть параметрами режима и обозначать их совокупность вектором $\mathbf{Z}$. Остальная исходная информация, характеризующая параметры элементов ЭЭС (сопротивления, проводимости, нерегулируемые под нагрузкой коэффициенты трансформации и т. д.), меняется относительно медленнее. Совокупность параметров элементов системы будет ниже обозначаться вектором $\mathbf{D}$.

Дополнительной информацией об ЭЭС можно считать уравнения, связывающие параметры режима и параметры элементов ЭЭС, – это известные уравнения законов Кирхгофа и Ома (или вытекающие из них другие соотношения типа уравнений узловых потенциалов или контурных величин).

Режим электроэнергетической системы может быть описан уравнениями баланса активной и реактивной мощности в каждом узле (формула 2.1 и рисунок 2.1):

$$\begin{aligned} -P_{Gi} + P_{Hi} + P_i &= 0 \\ -Q_{Gi} + Q_{Hi} + Q_i &= 0 \end{aligned} \tag{2.1}$$

$$i = 1, \dots, N$$

где P_{Gi} , P_{Hi} , P_i – соответственно активные мощности источника, нагрузки и мощность, отдаваемая в сеть из узла с номером i (инъекция); Q_{Gi} , Q_{Hi} , Q_i – то же для реактивных мощностей, N – число узлов в сети.

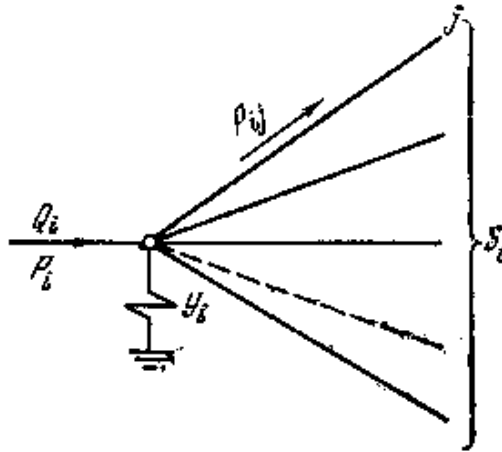


Рисунок 2.1 – Общий вид узла электрической сети

В свою очередь сетевые мощности (инъекции) определяются как сумма мощностей ветвей, инцидентных данному узлу (рисунок 2.1).

$$P_i = \sum_{j \in \omega_i} P_{ij} + U_i^2 g_i \quad (2.2)$$

$$Q_i = \sum_{j \in \omega_i} Q_{ij} + U_i^2 b_i$$

где ω_i – множество индексов узлов, смежных i -му; P_{ij} и Q_{ij} – перетоки мощности по ветви $i - j$; U_i – модуль напряжения в узле i ; g_i и b_i – активная и реактивная проводимости в узле i .

Совокупность уравнений (2.1) будем в векторном виде обозначать

$$W(Z, D) = 0. \quad (2.1a)$$

Число уравнений в (2.1) обычно значительно меньше, чем число параметров режима. Например, если в качестве математической модели ЭЭС используются уравнения узловых потенциалов, то число уравнений равно $2(N-1)$ – для каждого узла, кроме балансирующего, составляются уравнения балансов активного и реактивного токов (или мощностей), а число узловых параметров режима, входящих в эти уравнения – $4(N-1)$: для каждого узла в качестве параметров режима выступают фаза и модуль напряжения в узле и узловые активные и реактивные мощности (инъекции), поступающие из узла в сеть. Наличие регулируемых коэффициентов трансформации только

увеличивает этот избыток. Превышение числа параметров режима над числом уравнений определяет число *степеней свободы* системы. Совокупность параметров режима, определяющих степени свободы, будем обозначать вектором Y .

Чтобы однозначно вычислить установившийся режим ЭЭС, необходимо зафиксировать значения степеней свободы. Обычно при расчете установившегося режима считают заданными все инъекции, кроме балансирующей активной и реактивной мощности, а также одну фазу и один модуль напряжения (не обязательно совмещенные в одном узле) и коэффициенты трансформации. Возможны и другие варианты фиксации степеней свободы, например, часто фиксируют модули напряжений в узлах с источниками реактивной мощности и т. д.

После фиксации степеней свободы остальные параметры режима, так называемые зависимые, обозначаемые вектором X , определяются из уравнений установившегося режима (2.1a).

При изменении значений компонент вектора Y (ниже его будем называть вектором независимых параметров) изменяются значения вектора зависимых параметров X , т. е.

$$X = X(Y), \quad (2.2)$$

причем эта неявная зависимость определяется наличием уравнений (2.1a).

Зависимости $X(Y)$ становятся явными, если в состав вектора Y вошли все комплексы напряжений в узлах ЭЭС.

О текущем состоянии ЭЭС диспетчер может судить по данным телеизмерений. В качестве последних могут выступать передаваемые по телеканалам от соответствующих датчиков сведения о значениях параметров режима: токов, мощностей и модулей напряжений узлов или некоторых функций от них (например, может передаваться суммарная нагрузка отдельных районов).

Вектор значений телеизмерений $\bar{V}$ – передаваемых на диспетчерский пункт, можно представить в виде суммы истинных значений контролируемых

величин, являющихся функцией текущего значения параметров режима $V(Z)$, и вектора ошибок ξ_V . Ошибки телеизмерений возникают из-за ошибок датчиков, помех в каналах телепередачи и неодновременности снятия измерений. Итак,

$$\bar{V} = V(Z) + \xi_V \quad (2.3)$$

а с учетом (3.10), которое позволяет считать определяющими только компоненты вектора Y ,

$$\bar{V} = V(Y) + \xi_V \quad (2.4)$$

Зависимость $V(Y)$ также явная, если Y образуют модули и фазы напряжения узлов (их совокупности обозначаются соответственно векторами U и δ).

Сведения о текущем значении параметров режима поступают только в виде измеренных значений $\bar{V}$. Поэтому естественно подбирать такие значения компонент вектора $Y = \hat{Y}$, при которых вычисленные значения $V(\hat{Y})$ были бы по возможности ближе к измеренным $\bar{V}$. Но сам термин «ближе», понятный для одномерного случая, требует пояснения для многомерной ситуации. Задача оценивания состояния по существу сводится к решению нелинейной системы уравнений относительно вектора Y .

$$\bar{V} - V(\hat{Y}) = 0 \quad (2.5)$$

Если число компонент вектора Y больше, чем число измеряемых величин, то задача имеет бесчисленное множество решений. Другими словами, измеренным значениям параметров режима могут соответствовать различные режимы ЭЭС.

Однозначное решение возможно только в случае, когда n – размерность вектора Y не меньше m – размерности вектора $\bar{V}$. Это необходимое, но недостаточное условие однозначного решения даже для линейных систем, не говоря уже о многозначности, связанной с наличием нелинейности. Если же число измеренных величин превышает число компонент вектора состояния, то

найти такие компоненты вектора $Y = \hat{Y}$, которые одновременно удовлетворяли бы всем уравнениям в системе (2.5), в общем случае не удастся.

Но именно эта ситуация позволяет уточнить измеренные значения. В самом деле, когда $n > m$, какие бы ошибки ни содержали измеренные значения, найденный вектор $\hat{Y}$ даст значения $\bar{V} = V(\hat{Y})$. При избыточном числе измерений ($n < m$) ошибки в измерениях будут взаимно компенсировать друг друга, т. е. избыточность позволяет повысить точность.

Решение переопределенной системы (2.5) сводится к минимизации некоторого критерия близости – нормы разности векторов $\|\hat{\xi}_V\| = \|\bar{V} - V(\hat{Y})\|$. Этот подход приводит к методу взвешенных наименьших квадратов.

Формирование системы уравнений оценивания состояния ЭЭС

Цель и содержание: Развитие у студентов знаний о задаче оценивания состояния ЭЭС и используемых математических моделях

Знания: постановку задачи оценивания состояния ЭЭС и используемые математические модели

Умения: применять методы и алгоритмы проверки, количественной оценки качества и синтеза наблюдаемости ЭЭС

Владения: навыками расчетов оценок параметров установившихся режимов ЭЭС

Краткие теоретические сведения

Метод контрольных уравнений (КУ) был разработан в Институте систем энергетики им Л.А. Мелентьева СО РАН. Система КУ формируется из системы уравнений состояния, связывающих переменные режима, такие как мощности, напряжения, токи и т.д. Переменные, входящие в систему, могут быть измеренными и неизмеренными, источником измерений является система телеметрии. Метод КУ позволяет учесть топологическую структуру сети, что значительно повышает количество измерений, которые можно проверить, по сравнению с использованием только уравнений балансов узлов.

Контрольным называется уравнение, в состав которого входят только измеряемые переменные. Небаланс (невязка) КУ равен нулю только в случае, когда все измерения равны истинным значениям измеряемых параметров, то есть не содержат погрешностей, вероятность «наложения» ошибок игнорируется.

Очевидно, что измеренные значения переменных режима в каждый момент времени должны удовлетворять законам электрических цепей, а именно законам Кирхгофа и Ома:

$$w(y, z) = 0, \quad (2.6)$$

где w – вектор уравнений электрических цепей, связывающих измеряемые переменные режима y и неизмеряемые z .

Они могут быть получены при исключении неизмеренных переменных x из уравнений установившегося режима ЭЭС.

Это означает, что существует такое разбиение (2.6) на две подсистемы

$$w^{(1)}(y, z) = 0; \quad (2.7)$$

$$w^{(2)}(y, z) = 0, \quad (2.8)$$

что

$$\left| \frac{dw^{(1)}}{dz} \right| \neq 0 \quad (2.9)$$

Вектор z может быть определен из (2.7) как функция y и подставлен в (2.8). Тогда подсистема (2.8) будет зависеть только от измеренных переменных:

$$w^{(2)}(y) = 0. \quad (2.10)$$

Подсистема (2.7) может быть названа базисной, а полученная система (2.10) – контрольной, так как по невязкам уравнений системы (2.10) можно судить о наличии ошибок в измерениях, в частности грубых ошибок.

Так, система контрольных уравнений может быть получена и делением измерений y на базисные и избыточные:

$$y_{\bar{6}} - y_{\bar{6}}(x) = 0 \quad (2.11)$$

$$\bar{y}_u - y_u(x) = 0 \quad (2.12)$$

так что

$$\left| \frac{dy_{\bar{6}}}{dx} \right| \neq 0 \quad (2.13)$$

Линеаризуя (2.11) и (2.12) в точке $x = x_0$, находим:

$$\bar{y}_{\bar{6}} - y_{\bar{6}}(x_0) = \frac{dy_{\bar{6}}}{dx} (x - x_0)$$

$$y_u - y_u(x_0) = \frac{dy_u}{dx}(x - x_0)$$

С учетом (2.13)

$$(x - x_0) = \left(\frac{dy_6}{dx} \right)^{-1} (\bar{y}_6 - y_6(x_0)) \quad (2.14)$$

и

$$\bar{y}_u - y_u(x_0) = \frac{dy_u}{dx} \left(\frac{dy_6}{dx} \right)^{-1} \cdot (\bar{y}_6 - y_6(x_0)) = D(\bar{y}_6 - y_6(x_0)) \quad (2.15)$$

или

$$\Delta \bar{y}_u = D \Delta \bar{y}_6 \quad (2.16)$$

где: $\Delta \bar{y}_6 = \bar{y}_6 - y_6(x_0)$; $\Delta \bar{y}_u = \bar{y}_u - y_u(x_0)$.

Исключение переменных z из $w^{(1)}$ и представление z как явной функции y , т.е. $z(y)$, в общем случае возможно лишь для линейных соотношений относительно z . Линеаризуем (2.7) и (2.8) в точке $z = z_0$:

$$w^{(1)}(y, z_0) + \frac{dw^{(1)}}{dz}(z - z_0) = 0 \quad (2.17)$$

$$w^{(2)}(y, z_0) + \frac{dw^{(2)}}{dz}(z - z_0) = 0 \quad (2.18)$$

Отсюда имеем

$$z - z_0 = - \left(\frac{dw^{(1)}}{dz} \right) w^{(1)}(y, z_0) \quad (2.19)$$

Подставляя $z - z_0$ в (2.18), запишем систему контрольных уравнений,

$$w^{(2)}(y, z_0) - \frac{dw^{(2)}}{dz} \left(\frac{dw^{(1)}}{dz} \right)^{-1} w^{(1)}(y, z_0) \quad (2.20)$$

которую в дальнейшем будем обозначать w_k .

Ясно, что нет необходимости обращать матрицу $\frac{dw^{(1)}}{dz}$ достаточно получить решение $z - z_0$ из (2.19), например методом Гаусса.

Общее количество КУ, которое можно получить, определяется количеством избыточных измерений.

При этом возможны три варианта:

1) n – число компонентов вектора неизмеренных переменных равно l – числу уравнений (2.6) и

$$\left| \frac{dw}{dz} \right| \neq 0 \quad (2.21)$$

т.е. при $y = \bar{y}$ уравнение (2.6) разрешимо относительно z . Понятно, что в этом случае *наиболее близки* к $\bar{y}$ такие оценки y , которые равны самим измерениям: $\hat{y} = \bar{y}$.

2) n – число компонентов вектора z меньше числа уравнений, т.е. $n < l$ но ранг матрицы $\frac{dw}{dz}$ равен n .

$$\text{rank} \frac{dw}{dz} = n \quad (2.22)$$

Тогда оценки $\hat{y}$ находятся исходя из условия близости $\hat{y}$ к $\bar{y}$ в смысле какого-либо критерия, т.е.

$$\varphi = \|\bar{y} - \hat{y}\| \quad (2.23)$$

при соблюдении ограничения (2.6).

Чаще всего в качестве критерия близости используется взвешенная сумма наименьших квадратов

$$\varphi = (\bar{y} - \hat{y})^T R^{-1} (\bar{y} - \hat{y}) \quad (2.24)$$

где R^{-1} – весовая диагональная матрица, на диагонали R – априори заданные дисперсии ошибок измерений соответствующих компонентов вектора y . Однако можно использовать в качестве критерия φ взвешенную сумму модулей и другие функции. Здесь мы не будем обсуждать предпочтительность того или другого критерия;

3) число и состав компонентов вектора z таково, что $n > l$, т.е. $n \geq \text{rank} \frac{dw}{dz}$

В этом случае по крайней мере часть компонентов вектора z не может быть определена из уравнений (2.6) по измеренным значениям $y = \bar{y}$. Такие компоненты называются ненаблюдаемыми.

Поскольку общее число переменных режима, образующих векторы z и y , во всех трех случаях остается неизменным (за счет измерений перераспределяется только их состав между y и z), каждый случай в конечном счете определяется набором измеряемых компонентов, т.е. составом вектора y . В первом случае – это минимальное число компонентов y , обеспечивающих соблюдение (2.6) или (2.7). Такой состав является базисным и обозначается y_6 . Второй случай соответствует наличию избыточного числа измерений по сравнению с минимально необходимым.

Таким образом, для получения оценок измеренных параметров необходимо следовать следующему алгоритму (рисунок 2.2):

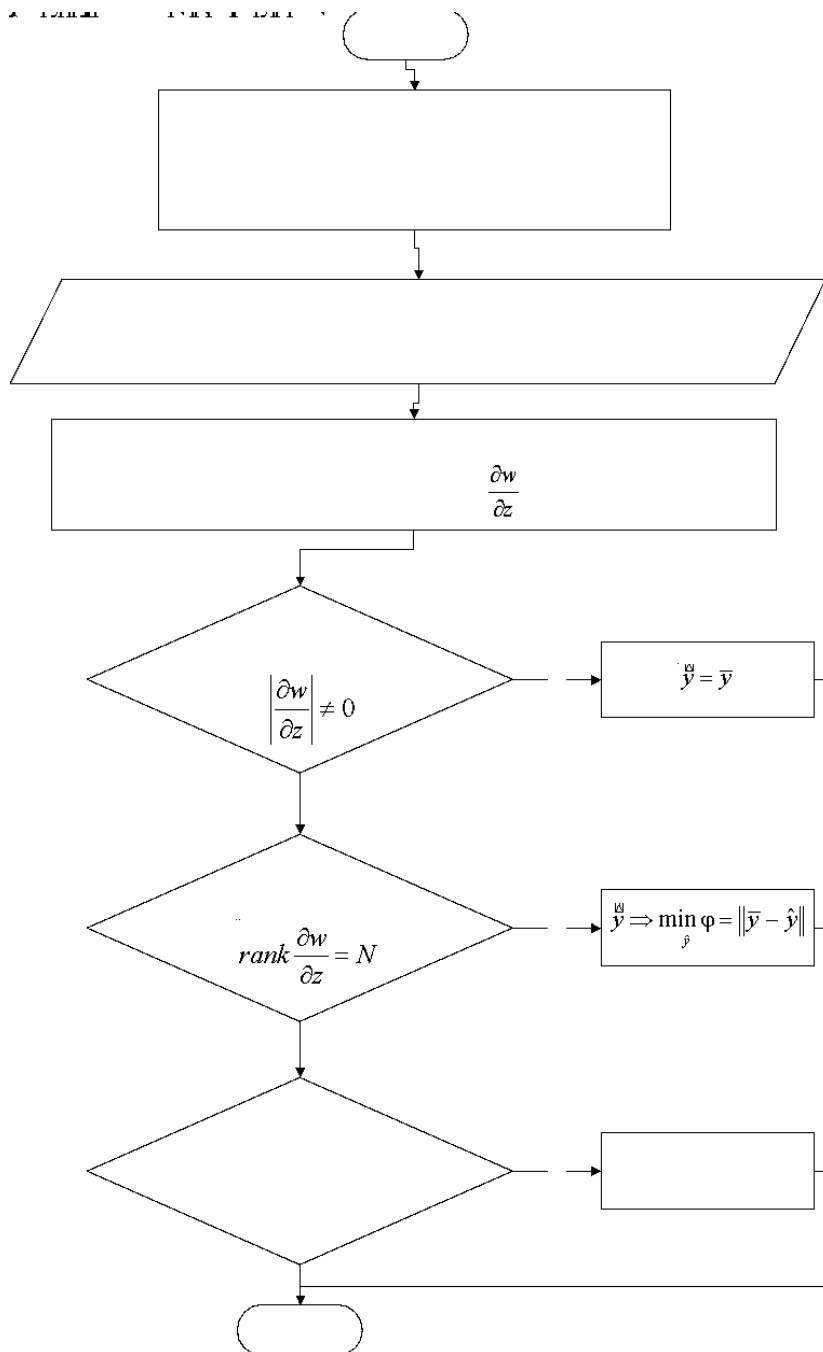


Рисунок 2.2 – Блок–схема алгоритма получения оценок измеренных параметров

Пример.

На рис. 1 представлена тестовая схема № 1, на которой показаны рассматриваемые методы формирования КУ. Для иллюстрации метода рассмотрим упрощенную активную модель для этой схемы, в которой активные потери в линиях приняты нулевыми.

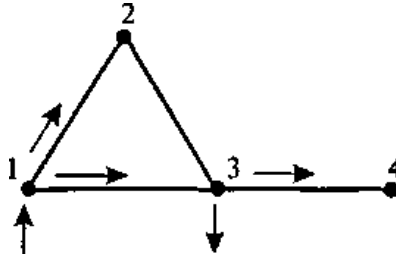


Рисунок 2.3 – Тестовая схема с измерениями активной мощности (узел 4 – базисный).

В данном случае в качестве уравнений установившегося режима используются уравнения балансов активной мощности в узлах, кроме базисного узла 4, и линеаризованное контурное уравнение. Система уравнений запишется так:

$$\begin{aligned} w_1 &= -P_1 + P_{1-2} + P_{1-3} \\ w_2 &= -P_2 - P_{1-2} + P_{2-3} \\ w_3 &= -P_3 - P_{1-3} - P_{2-3} + P_{3-4} \\ w_4 &= -P_{1-2}x_{1-2} + P_{2-3}x_{2-3} + P_{1-3}x_{1-3} \end{aligned}$$

Векторы y и z включают в себя следующие переменные режима:

$$\begin{aligned} y &= (P_1, P_{1-2}, P_{1-3}, P_3, P_{3-4}) \\ z &= (P_2, P_{2-3}) \end{aligned}$$

Матрица $\frac{dw}{dz}$ и вектор $w(y, z_0)$ в точке $z_0 = 0$ имеют вид $P_2 P_{2-3}$

$$\frac{\partial w}{\partial z} = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ -1 & 1 \\ 0 & -1 \\ 0 & x_{2-3} \end{pmatrix} \quad w(y) = \begin{pmatrix} -P_1 + P_{1-2} + P_{1-3} \\ -P_{1-2} \\ -P_3 - P_{1-3} + P_{3-4} \\ P_{1-2}x_{1-2} - P_{1-3}x_{1-3} \end{pmatrix}$$

Очевидно, что в таком случае разбиение матрицы $\frac{dw}{dz}$ на подматрицы

$\frac{dw^{(1)}}{dz}$ и $\frac{dw^{(2)}}{dz}$ можно выполнить, не проводя никаких численных преобразований.

В подматрицу $\frac{dw^{(1)}}{dz}$ войдут уравнения w_2 и w_4 , а w_1 и w_3 – в $\frac{dw^{(2)}}{dz}$,

$$\frac{dw^{(1)}}{dz} = \begin{pmatrix} - & 11 & 0 & x_{2-3} \end{pmatrix}; \frac{dw^{(2)}}{dz} = \begin{pmatrix} 00 & 0 & - & 1 \end{pmatrix}.$$

Из уравнения w_4 можно определить P_{2-3} :

$$P_{2-3} = -\frac{P_{1-2}x_{1-2} - P_{1-3}x_{1-3}}{x_{2-3}}$$

а из $w_2 - P_2$, но поскольку эта переменная не входит больше ни в одно уравнение системы, то необходимости в этом нет.

Уравнение w_1 входящее в подсистему $w^{(2)}$, не содержит неизмеренных переменных, т.е. является первым КУ:

$$w_{k1} = -P_1 + P_{1-2} + P_{1-3} = 0$$

Подставляя найденное по формуле выражение для P_{2-3} в уравнение w_3 , получим второе КУ для заданной схемы:

$$w_{k2} = -P_3 - \left(1 + \frac{x_{1-3}}{x_{2-3}}\right)P_{1-3} + \frac{x_{1-2}}{x_{2-3}}P_{1-2} + P_{3-4} = 0$$

Оборудование и материалы

Для выполнения лабораторной работы необходим персональный компьютер со следующими характеристиками: процессор Intel Pentium с тактовой частотой не менее 800 МГц, оперативная память – не менее 64 Мбайт, свободное дисковое пространство – не менее 250 Мбайт, устройство для чтения компакт-дисков, монитор типа Super VGA (число цветов – 256) с диагональю не менее 15". Программное обеспечение – операционная система WINDOWS 2000 / XP / Vista / 7 и выше.

Указания по технике безопасности

Техника безопасности при выполнении лабораторной работы совпадает с общепринятой для пользователей персональных компьютеров: самостоятельно не производить ремонт персонального компьютера, установку и удаление программного обеспечения; в случае неисправности персонального компьютера

сообщить об этом обслуживающему персоналу лаборатории (оператору, администратору); соблюдать правила техники безопасности при работе с электрооборудованием; не касаться электрических розеток металлическими предметами; рабочее место пользователя персонального компьютера должно содержаться в чистоте; не разрешается возле персонального компьютера принимать пищу, напитки.

Задание для практического расчета

1. Решить предложенную задачу, если векторы y и z включают в себя следующие переменные режима:

$$Y=(P_2, p_{2-3}, P_3, P_{3-4})$$

$$Z=(P_1, p_{1-2}, p_{1-3})$$

2. Решить предложенную задачу, если векторы y и z включают в себя следующие переменные режима:

$$Y=(P_1, p_{1-2}, p_{1-3}, P_2)$$

$$Z=(p_{2-3}, P_3, P_{3-4})$$

Требования к отчету:

Отчет должен содержать:

- 1) Решение задачи из примера
- 2) Решение задач 1 и 2.

Контрольные вопросы

1. Какими векторами представляется информация об ЭЭС?
2. Чем определяется число степеней свободы системы?
3. Каким образом можно зафиксировать значения степеней свободы?
4. Что входит в вектор независимых переменных?
5. Что входит в вектор зависимых переменных?
6. Как представляется вектор телеизмерений?
7. Что является критерием близости вычисленных значений к измеренным?
8. В каком случае возможно однозначное решение задачи оценивания состояния?

9. Назовите подходы к решению задачи оценивания состояния
10. Опишите принцип решения задачи оценивания состояния методом контрольных уравнений
11. В каком случае решение, полученное методом контрольных уравнений, однозначно?
12. В каком случае невозможно получить решение задачи оценивания состояния методом контрольных уравнений?
13. Назовите шаги алгоритма решения задачи оценивания состояния методом контрольных уравнений
14. Каким образом может быть получена система контрольных уравнений?

Рекомендуемая литература

1,2,8,13

**Алгебраический и топологический методы формирования
контрольных уравнений**

Цель и содержание: Развитие у студентов знаний о задаче оценивания состояния ЭЭС и используемых математических моделях

Знания: постановку задачи оценивания состояния ЭЭС и используемые математические модели

Умения: применять методы и алгоритмы проверки, количественной оценки качества и синтеза наблюдаемости ЭЭС

Владения: навыками расчетов оценок параметров установившихся режимов ЭЭС

Краткие теоретические сведения

Между задачами статического оценивания состояния и задачей потокораспределения имеется хорошо просматриваемая связь. Напомним обычно используемую постановку задачи потокораспределения. Заданы уравнения установившегося режима, активные и реактивные узловые мощности (инъекции) во всех узлах, кроме одного – балансирующего. Определить нужно напряжения и фазы во всех узлах, кроме базисного, потоки мощности по элементам схем, в том числе мощности балансирующего узла. Другими словами, фиксируются все компоненты вектора Y , в качестве которых выбираются инъекции всех узлов, кроме балансирующего, и модуль и фаза напряжения базисного узла. Такая постановка более соответствует расчету планируемого режима, а не оперативного, когда в качестве исходных данных о текущем режиме выступают измерения его параметров. В задаче статического оценивания состояния исходными данными являются измерения, а результаты расчета включают те, что получаются при расчете установившегося режима. В частности, в качестве измеряемых параметров могут быть те величины,

которые фиксируются при расчете установившегося режима в обычном варианте.

Еще одна особенность характерна для задачи оценивания – исходные данные для нее не детерминированные, а случайные величины, что больше соответствует реальной ситуации расчета. Поэтому и результаты расчета – также случайные величины, для которых определяются оценки и указывается точность полученных оценок.

Итак, статическое оценивание состояния может рассматриваться как задача расчета установившегося режима при случайном характере исходных данных – измерений параметров режима или псевдоизмерений (информации, получаемой не непосредственно от датчиков параметров режима, а другим путем).

Можно показать и связь с задачей оптимизации режима. Только здесь минимизируемый функционал определяется величиной помех (шумов), а в задаче оптимизации – издержками на производство электроэнергии. В обеих задачах – одни и те же ограничения в виде уравнений установившегося режима и принципиально похожие ограничения в виде неравенств.

Правда, следует отметить, что ограничения в виде неравенств для задачи оценивания состояния, как правило, определяют значительно более «широкую» допустимую область, так что решение задачи почти никогда не будет находиться на границах. Это позволяет значительно меньше уделять внимания учету ограничений, чем в задаче оптимизации режима.

Если интервалы времени между поступлением порций информации имеют порядок, близкий к постоянному времени переходного процесса в ЭЭС, то задача динамического оценивания состояния может быть интерпретирована как статистическая задача расчета переходного процесса в реальном масштабе времени по данным измерений, поступающим в течение переходного процесса [8].

Алгебраический метод

В алгебраических методах формирования КУ из системы уравнений состояния алгебраическими методами, например методом Гаусса, исключаются все неизмеренные переменные. Таким образом, процесс получения системы КУ из полной системы уравнений состояния становится формализованным. Поскольку в состав системы уравнений состояния энергораспределения (ЭР) входят две системы балансов ЭЭ: в ветвях электрической схемы и в узлах схемы сети, объединив две системы в одну, проведя алгебраические перестановки таким образом, чтобы в правой части уравнения получить ноль, в итоге получим систему из $NN+MM$ линейных уравнений с $NN+2MM$ переменными:

$$DD \cdot \mathcal{E} = 0, \quad (2.26)$$

где DD – матрица коэффициентов при переменных; $\mathcal{E}$ – вектор потоков ЭЭ, в состав которого входят потоки по началам и концам ветвей, а также узловые инъекции ЭЭ.

Поскольку переменные, входящие в объединенную систему (2.26), рассматриваются как равноправные, к данной системе может быть применен метод Гауссовского исключения по отношению ко всем неизмеренным потокам ЭЭ. Таким образом, в матричном виде соответствующие неизмеренным потокам ЭЭ столбцы матрицы DD переносятся в левую часть матрицы. В результате проведенной процедуры вид матрицы DD стал трапецеидальным. Количество и состав измерений влияет на наличие, либо отсутствие КУ, а также на наблюдаемость ЭР. Возможны три варианта (рисунок 2.3):

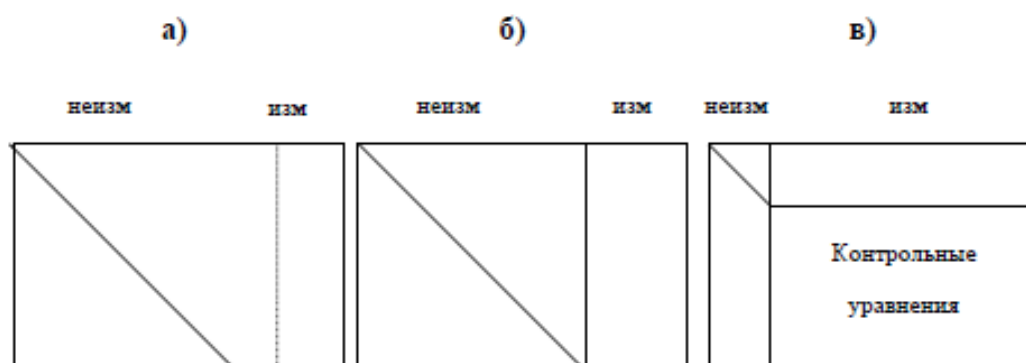


Рисунок 2.3 – Варианты матрицы Гаусса

1. КУ уравнений нет, ЭР не наблюдаемо. Данная ситуация имеет место в случае, если в процессе исключения уже приняли участие все уравнения из системы, а неизмеренные переменные в системе уравнений состояния еще остались (рисунок 2.3,а).

2. КУ нет, ЭР наблюдаемо, избыточных измерений нет. В данной ситуации вид матрицы DD является точно трапецеидальным. Процесс исключения затронул все уравнения, неизмеренных потоков ЭЭ не осталось (рисунок 2.3,б).

3. КУ могут быть сформированы, ЭР наблюдаемо, есть избыточные измерения. Третья ситуация возможна в случае, если в процессе Гауссовского исключения остались уравнения, которые не использовались для приведения матрицы коэффициентов к трапецеидальному виду, а неизмеренных переменных уже не осталось. Уравнения, полученные в процессе этого исключения, содержащие в своем составе только измеренные потоки ЭЭ, и есть КУ (рисунок 2.3,в).

Данный метод формирования КУ из системы уравнений состояния позволяет одновременно определить, является ли система наблюдаемой и есть ли избыточные измерения.

В иллюстрации ниже приведен процесс формирования системы КУ для фрагмента сети. На рисунке 2.4 представлен пятиузловой фрагмент кольцевой сети.

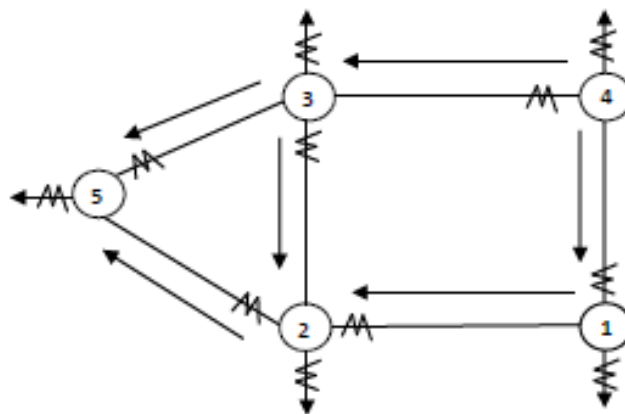


Рисунок 2.4 – Фрагмент сети

Места измерений ЭЭ обозначены символом $\mathbb{W}$. Узловое измерение, соответствующее нагрузке, имеет отрицательный знак, генерации – положительный. Направление потоков энергии указано стрелками. Технические потери в линиях схемы приняты равными нулю. На практике возможно применение так называемого «разнесения» технических потерь в ближайшие узлы. В этом случае узловые и линейные измерения корректируются на величину доли технических потерь, отнесенных к данному измерению.

Система узловых балансов для приведенного фрагмента выглядит следующим образом:

$$-\underline{\mathcal{Q}}_1 = -\underline{\mathcal{Q}}_{1-2} + \underline{\mathcal{Q}}_{1-4},$$

$$-\underline{\mathcal{Q}}_2 = -\underline{\mathcal{Q}}_{1-2} + \underline{\mathcal{Q}}_{2-3} - \underline{\mathcal{Q}}_{2-5},$$

$$-\underline{\mathcal{Q}}_3 = \underline{\mathcal{Q}}_{3-4} - \underline{\mathcal{Q}}_{2-3} - \underline{\mathcal{Q}}_{3-5},$$

$$-\underline{\mathcal{Q}}_4 = -\underline{\mathcal{Q}}_{1-4} - \underline{\mathcal{Q}}_{3-4},$$

$$-\underline{\mathcal{Q}}_5 = \underline{\mathcal{Q}}_{3-5} + \underline{\mathcal{Q}}_{2-5}$$

Подчеркивание в системе означает, что поток ЭЭ – измеряемая величина. В данной системе все переменные являются измеряемыми. Система уравнений состояния полностью соответствует системе КУ. Присутствует пять избыточных измерений, возможно составление пяти КУ.

Рассмотрим пример, фрагмент сети представлен на рисунке 2.5:

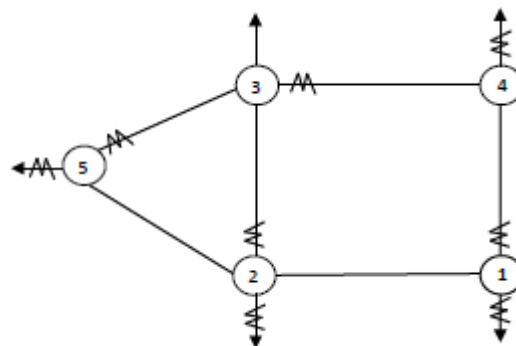


Рисунок 2.5 – Фрагмент сети

$$\underline{\underline{\mathcal{Q}}}_1 = -\underline{\mathcal{Q}}_{12} + \underline{\mathcal{Q}}_{14}$$

$$\underline{\underline{\mathcal{Q}}}_2 = \underline{\mathcal{Q}}_{12} + \underline{\mathcal{Q}}_{23} - \underline{\mathcal{Q}}_{25}$$

$$-\underline{\mathcal{Q}}_3 = \underline{\mathcal{Q}}_{34} - \underline{\mathcal{Q}}_{23} - \underline{\mathcal{Q}}_{35}$$

$$-\underline{\mathcal{Q}}_4 = -\underline{\mathcal{Q}}_{14} - \underline{\mathcal{Q}}_{34}$$

$$-\underline{\mathcal{Q}}_5 = \underline{\mathcal{Q}}_{35} + \underline{\mathcal{Q}}_{25}$$

Первое КУ очевидно – это уравнение (4)

Сложим уравнения 1 и 2:

$$-\underline{\mathcal{Q}}_1 - \underline{\mathcal{Q}}_2 = -\underline{\mathcal{Q}}_{14} + \underline{\mathcal{Q}}_{23} - \underline{\mathcal{Q}}_{25}$$

$$-\underline{\mathcal{Q}}_3 = \underline{\mathcal{Q}}_{34} - \underline{\mathcal{Q}}_{23} - \underline{\mathcal{Q}}_{35}$$

$$-\underline{\mathcal{Q}}_4 = -\underline{\mathcal{Q}}_{14} - \underline{\mathcal{Q}}_{34}$$

$$-\underline{\mathcal{Q}}_5 = \underline{\mathcal{Q}}_{35} + \underline{\mathcal{Q}}_{25}$$

Сложим уравнения 1 и 5:

$$-\underline{\mathcal{Q}}_1 - \underline{\mathcal{Q}}_2 - \underline{\mathcal{Q}}_5 = \underline{\mathcal{Q}}_{14} + \underline{\mathcal{Q}}_{23} + \underline{\mathcal{Q}}_{35}$$

$$-\underline{\mathcal{Q}}_4 = -\underline{\mathcal{Q}}_{14} - \underline{\mathcal{Q}}_{34}$$

Получаем 2 КУ.

Топологический метод

Топологический подход к формированию системы КУ основан на исследовании состава измерений и их местоположения на схеме сети. Поскольку в КУ не должно быть неизмеренных переменных, из системы уравнений состояния ЭР необходимо каким-либо образом исключить все неизмеренные потоки энергии. Процесс составления системы КУ построен следующим образом: каждый неизмеренный поток энергии в системе уравнений состояния выражается и вычисляется через измеренные. Как только в уравнении все переменные либо являются измеренными, либо уже вычислены через измеренные, это уравнение является КУ.

Предлагается следующий подход к топологическому формированию систему КУ. Строится трехцветный граф, вершины первого цвета в котором будут соответствовать уравнениям, вершины второго цвета – измеряемым переменным, вершины третьего цвета – не измеряемым переменным. Если переменная (измеряемая или не измеряемая) входит в уравнение, то этот факт отражается на графе построением соответствующего ребра уравнение – переменная. На следующем шаге составляется такое парасочетание, чтобы

каждой вершине, относящейся к уравнению состояния, ставилась в соответствие только одна вершина – неизмеренная переменная. Парасочетание, в котором использованы все вершины типа уравнение или неизмеренная переменная, называется максимальным. Вариантов максимального парасочетания в общем случае может быть несколько. Результатом попытки определения максимального парасочетания может быть три варианта:

- Все вершины – уравнения поставлены в соответствии вершинам – неизмеренным переменным, а неизмеренные переменные остались. Эти переменные рассчитать невозможно, они являются ненаблюдаемыми. КУ нет.
- Все вершины – уравнения поставлены в соответствие всем вершинам – неизмеренным переменным. Состав измерений достаточен для наблюдаемости, но КУ нет.
- Все вершины – неизмеренные переменные поставлены в соответствие вершинам – уравнениям, а уравнения остались. Все переменные являются наблюдаемыми. Количество оставшихся уравнений соответствует числу КУ.

Рассмотрим пятиузловой фрагмент сети, представленный на рисунке 2.5. Наличие измерения обозначено символом W.

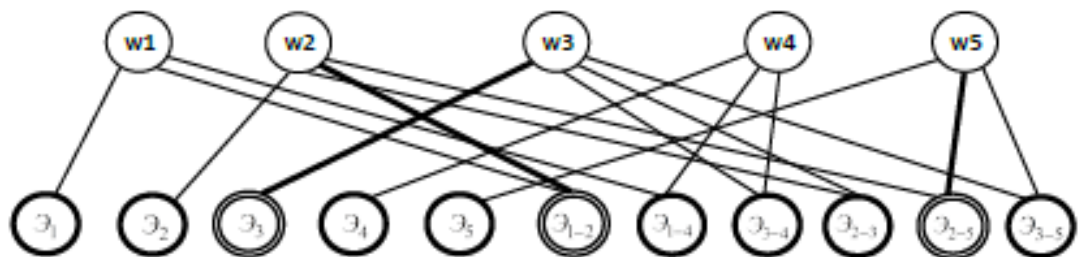


Рисунок 2.5 – Пятиузловой фрагмент сети

Количество уравнений состояния системы равно пяти, вершины графа, обозначенные «w». Всего переменных одиннадцать, из них три не измеряемые, вершины «n»; восемь – измеряемые, вершины «i».

Вершины, соответствующие измеренным переменным:
 $(i_1, i_2, i_4, i_5, i_{1-4}, i_{3-4}, i_{2-3}, i_{3-5})$.

Вершины, соответствующие неизмеренным переменным: $(\mathcal{E}_3, \mathcal{E}_{1-2}, \mathcal{E}_{2-5})$.

Максимальное парасочетание: $(\omega_2 - \mathcal{E}_{1-2}, \omega_3 - \mathcal{E}_3, \omega_5 - \mathcal{E}_{2-5})$.

Таким образом, при данной топологии сети, подобное количество и расстановка измерений обеспечивает наблюдаемость ЭР, а также наличие двух КУ.

Структура одного из КУ понятна сразу: уравнение баланса для узла 4 связывает узловое измерение $\mathcal{E}_4$ и два линейных измерения: $\mathcal{E}_{1-4}$ и $\mathcal{E}_{3-4}$. Второе КУ будет сформировано из уравнения баланса для узла 1, в которое входят узловое измерение $\mathcal{E}_1$ и два линейных – $\mathcal{E}_{1-4}$ и $\mathcal{E}_{1-2}$. Среди данных трех потоков энергии неизмеренным является только линейный $\mathcal{E}_{1-2}$, таким образом, этот поток надо исключить из уравнения для получения КУ. Процедура исключения состоит в выражении неизмеренного потока энергии через измеренные.

Алгоритм исключения лишнего потока строится следующим образом: производится последовательное исключение всех «сильных» ребер, входящих в парасочетание, в процессе исключения образуются новые ребра–связи уравнений и переменных. В рассматриваемом примере необходимо произвести аналогичную процедуру.

Сначала удаляется ребро $\omega\omega_5 - \mathcal{E}_{2-5}$, при этом из графа удаляются все ребра, инцидентные вершинам $\omega\omega_5$ и $\mathcal{E}_{2-5}$: $\omega\omega_5 - \mathcal{E}_{2-5}$, $\omega\omega_5 - \mathcal{E}_5$, $\omega\omega_5 - \mathcal{E}_{3-5}$. Поскольку неизмеренная переменная $\mathcal{E}_{2-5}$ связана с вершиной $\omega\omega_2$, образуются новые ребра: $\omega\omega_2 - \mathcal{E}_{3-5}$ и $\omega\omega_2 - \mathcal{E}_5$.

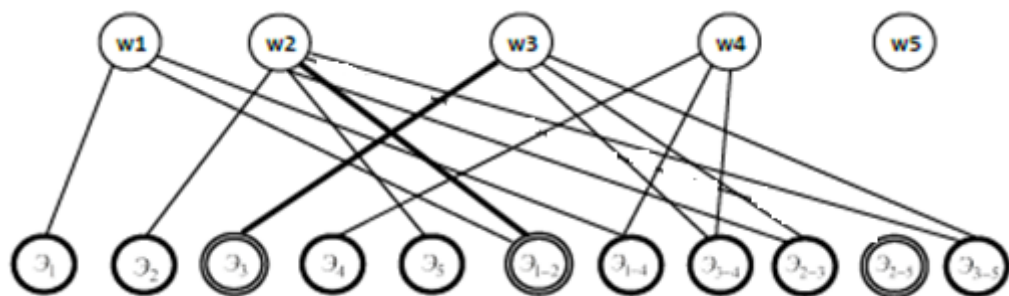


Рисунок 2.6 – Удаление ребра $\omega\omega_5 - \mathcal{E}_{2-5}$

Далее необходимо произвести исключение «сильного» ребра $\omega\omega_3-\mathcal{E}_3$. Из графа исключаются ребра $\omega\omega_3-\mathcal{E}_3$, $\omega\omega_3-\mathcal{E}_{3-4}$, $\omega\omega_3-\mathcal{E}_{2-3}$ и $\omega\omega_3-\mathcal{E}_{3-5}$. Новых ребер не добавляется, поскольку вершина $\mathcal{E}_3$ дополнительных связей не имеет. Граф после второго шага исключения представлен на рисунке 2.7.

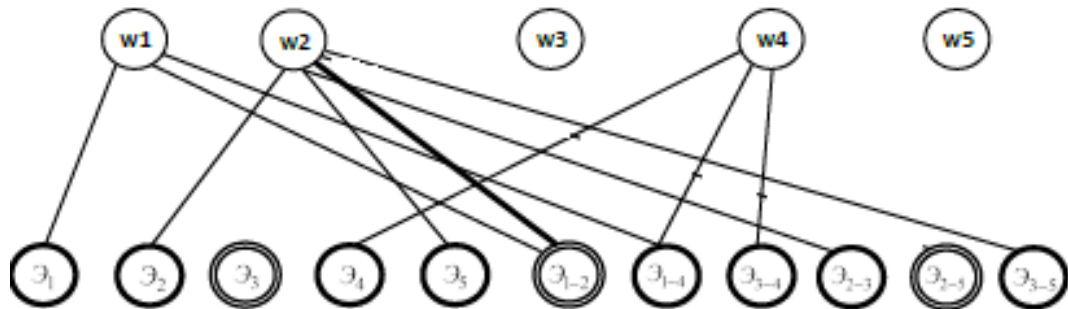


Рисунок 2.7 – Удаление ребра $\omega\omega_3-\mathcal{E}_3$

Последним этапом будет исключение из структуры «сильного» ребра $\omega\omega_2-\mathcal{E}_{1-2}$. Из графа удаляются ребра, инцидентные этим вершинам: $\omega\omega_2-\mathcal{E}_2$, $\omega\omega_2-\mathcal{E}_5$, $\omega\omega_2-\mathcal{E}_{1-2}$, $\omega\omega_2-\mathcal{E}_{2-3}$, $\omega\omega_2-\mathcal{E}_{2-5}$. Поскольку вершина $\mathcal{E}_{1-2}$ имеет связь с $\omega\omega_1$, в граф вводятся новые ребра: $\omega\omega_1-\mathcal{E}_2$, $\omega\omega_1-\mathcal{E}_5$, $\omega\omega_1-\mathcal{E}_{2-3}$ и $\omega\omega_1-\mathcal{E}_{3-5}$.

Анализ получившейся структуры графа, представленной на рисунке, позволяет получить итоговую структуру системы КУ.

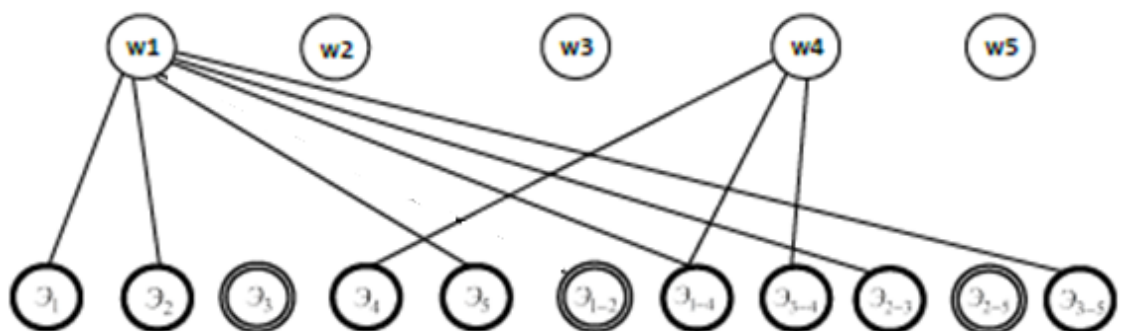


Рисунок 2.8 – Удаление ребра $\omega\omega_2-\mathcal{E}_{1-2}$

При данном количестве измерений и их размещении на графе сети из системы уравнений состояния ЭР можно получить два КУ. При выбранном

парасочетании их структура будет следующей: $(\omega_1 - \mathcal{E}_1, \mathcal{E}_2, \mathcal{E}_5, \mathcal{E}_{2-3}, \mathcal{E}_{1-4}, \mathcal{E}_{3-5}),$
 $(\omega_4 - \mathcal{E}_4, \mathcal{E}_{1-4}, \mathcal{E}_{3-4}).$

$$-\mathcal{E}_1 - \mathcal{E}_2 - \mathcal{E}_5 = \mathcal{E}_{14} + \mathcal{E}_{23} + \mathcal{E}_{35}$$

$$-\mathcal{E}_4 = -\mathcal{E}_{14} - \mathcal{E}_{34}$$

Оборудование и материалы

Для выполнения лабораторной работы необходим персональный компьютер со следующими характеристиками: процессор Intel Pentium с тактовой частотой не менее 800 МГц, оперативная память – не менее 64 Мбайт, свободное дисковое пространство – не менее 250 Мбайт, устройство для чтения компакт-дисков, монитор типа Super VGA (число цветов – 256) с диагональю не менее 15". Программное обеспечение – операционная система WINDOWS 2000 / XP / Vista / 7 и выше.

Указания по технике безопасности

Техника безопасности при выполнении лабораторной работы совпадает с общепринятой для пользователей персональных компьютеров: самостоятельно не производить ремонт персонального компьютера, установку и удаление программного обеспечения; в случае неисправности персонального компьютера сообщить об этом обслуживающему персоналу лаборатории (оператору, администратору); соблюдать правила техники безопасности при работе с электрооборудованием; не касаться электрических розеток металлическими предметами; рабочее место пользователя персонального компьютера должно содержаться в чистоте; не разрешается возле персонального компьютера принимать пищу, напитки.

Задание для практического расчета

1. Рассмотрим ситуацию, когда измерение по ветви между вторым и третьим узлами отсутствует. Система балансов в узлах будет прежней, но измерение $\mathcal{E}_{2-3}$ не будет подчеркнутым

Первое, третье и четвертое уравнения системы уравнений состояния уже являются КУ, поскольку содержат все измеренные переменные. Еще

одно КУ возможно получить путем сложения второго и третьего уравнения системы, это позволит исключить неизмеренный линейный поток:

$$\Theta_2 + \Theta_3 = -\Theta_{1-2} + \Theta_{2-5} - \Theta_{3-4} + \Theta_{3-5}$$

В этой ситуации в схеме есть три избыточных измерения, возможно составить три КУ.

2. Удалить еще три измерения, например, перетоки по линиям 3–4, 2–5 и 1–4.

Анализ системы показывает, что в состав каждого из уравнений состояния системы входят неизмеренные переменные. В этом случае, путем сложения всех четырех уравнений, будет получено единственное КУ:

$$\Theta_1 + \Theta_2 + \Theta_3 + \Theta_4 + \Theta_5 = 0,$$

которое соответствует уравнению баланса ЭЭ, количество выработанной ЭЭ равно объему потребленной. Т.е. одно избыточное измерение позволяет сформировать только одно КУ.

3. Если в исходной схеме будет удалено еще одно измерение ЭЭ, например, узловое измерение Θ_4 , система узловых балансов ЭЭ.

Состав измерений позволяет рассчитать все потоки ЭЭ, то есть ЭР является наблюдаемым, но поскольку нет избыточных измерений, составить КУ и проверить достоверность данных нет возможности. Данный состав измерений является вариантом базисного. При дальнейшей потере хотя бы одного из измерений, наблюдаемость ЭР будет потеряна.

Требования к отчету:

Отчет должен содержать:

1. Результаты решения задач алгебраическим методом
2. Результаты решения задач топологическим методом
3. Выводы по возможностям применения рассмотренных методов

Контрольные вопросы

1. Какими уравнениями может быть описан режим электроэнергетической системы?

2. Приведите математическую формулировку задачи оценивания состояния
3. Что называется контрольными уравнениями?
4. Поясните принцип алгебраического метода формирования контрольных уравнений
5. Что называется Гауссовским исключением?
6. В каком случае нет возможности составить контрольные уравнения алгебраическим методом?
7. В каком случае имеется возможность составить контрольные уравнения алгебраическим методом?
8. Каким должен быть вид матрицы контрольных уравнений, чтобы система была наблюдаемой?
9. Для чего используются избыточные контрольные уравнения?
10. Поясните принцип топологического метода формирования контрольных уравнений
11. Назовите элементы графа, используемого при топологическом методе формирования контрольных уравнений
12. Назовите шаги алгоритма топологического метода формирования контрольных уравнений
13. Каким образом использование топологического метода позволяет оценить наблюдаемость ЭР?

Рекомендуемая литература

1,2,8,13

Оценивание состояния методом контрольных уравнений

Цель и содержание: Развитие у студентов знаний о задаче оценивания состояния ЭЭС и используемых математических моделях

Знания: постановку задачи оценивания состояния ЭЭС и используемые математические модели

Умения: применять методы и алгоритмы проверки, количественной оценки качества и синтеза наблюдаемости ЭЭС

Владения: навыками расчетов оценок параметров установившихся режимов ЭЭС

Краткие теоретические сведения

Задачу оценивания состояния ЭЭС можно в общем случае сформулировать следующим образом. Задан вектор $y \in R^n$ измеренных переменных режима, диагональная матрица R размера n погрешности (дисперсий) измерений. Необходимо определить оценки значений параметров режима, включающие вектор измеряемых параметров $u \in R^n$ и неизмеряемых параметров $x \in R^m$.

Переменные величины рассматриваемой модели составляют векторы измеряемых параметров $u \in R^n$ и неизмеряемых параметров $x \in R^m$ при некоторых натуральных n и m .

Модель представляется в виде системы линейных уравнений:

$$Ax + By = b \quad (2.27)$$

Заданными являются вектор $b \in R^r$ при некотором натуральном r , матрицы A – размера $r \times m$, B – размера $r \times n$.

Имеется также вектор $y \in R^n$, состоящий из набора полученных измерений. Считается, что измерения могут быть неточными и избыточными. В силу чего они могут быть противоречивыми. Задача оценки параметров системы формулируется как проблема минимизации суммы взвешенных квадратов отклонений

$$\frac{1}{2} \sum h_j (\bar{y}_j - \hat{y}_j)^2 \rightarrow \min \quad (2.28)$$

Здесь h_j положительные заданные величины, составляющие вектор весовых коэффициентов $h \in R^n$. Весовые коэффициенты h_{ij} , являются величинами, обратными погрешностям измерений в целевой функции

$$J(y) = (\bar{y} - \hat{y})^T R^{-1} (\bar{y} - \hat{y}) \quad (2.29)$$

Пусть H – диагональная матрица размера n , состоящая из компонент вектора h (дисперсий соответствующих измерений).

Исключив из целевой функции (2.28) постоянную составляющую получаем, что задача (2.27), (2.28) равносильна следующей:

$$\frac{1}{2} y^T H y - \bar{y}^T H y \rightarrow \min \quad (2.30)$$

при условии (2.27). Значения векторов переменных, получаемых в результате решения рассматриваемой задачи, будем обозначать $\hat{y}, \hat{x}$ [13].

Оборудование и материалы

Для выполнения лабораторной работы необходим персональный компьютер со следующими характеристиками: процессор Intel Pentium с тактовой частотой не менее 800 МГц, оперативная память – не менее 64 Мбайт, свободное дисковое пространство – не менее 250 Мбайт, устройство для чтения компакт-дисков, монитор типа Super VGA (число цветов – 256) с диагональю не менее 15". Программное обеспечение – операционная система WINDOWS 2000 / XP / Vista / 7 и выше.

Указания по технике безопасности

Техника безопасности при выполнении лабораторной работы совпадает с общепринятой для пользователей персональных компьютеров: самостоятельно не производить ремонт персонального компьютера, установку и удаление программного обеспечения; в случае неисправности персонального компьютера сообщить об этом обслуживающему персоналу лаборатории (оператору, администратору); соблюдать правила техники безопасности при работе с электрооборудованием; не касаться электрических

розеток металлическими предметами; рабочее место пользователя персонального компьютера должно содержаться в чистоте; не разрешается возле персонального компьютера принимать пищу, напитки.

Задание для самостоятельного выполнения:

Задание 1.

Для расчетов используется активная модель 3-узловой схемы, представленной на рисунке 2.9. В этой схеме: узел 1 – генераторный (балансирующий узел), узел 3 – нагрузочный, узел 2 – транзитный ($P_2=Q_2=0$). Измерения узловых инъекций в узлах 1, 3 не заданы.

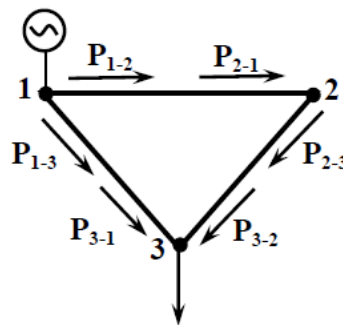


Рисунок 2.9 – 3-х узловая тестовая схема сети

Вектор измерений состоит из перетоков активной мощности по концам линий и псевдоизмерения нулевой инъекции активной мощности в узле 2:

$$y = (P_{1-2}, P_{2-1}, P_{1-3}, P_{3-1}, P_{2-3}, P_{3-2}, P_2)$$

Дисперсии перетоков SCADA для всех измерений одинаковые $\sigma_j^2=10$, дисперсия псевдоизмерения P_2 равна нулю.

В этом варианте расчета в качестве уравнений электрической цепи были использованы уравнения балансов активной мощности в узлах:

$$P_i = \sum_{j \in \omega i} P_{ij} + P_{\text{ш}i} \quad (2.31)$$

и уравнения балансов активной мощности в линиях.

$$P_{ij} + P_{ji} - \Delta P_{ij} = 0 \quad (2.32)$$

Контурное уравнение не использовалось.

Полученные уравнения (2.33) – это уравнения баланса мощности в линиях:

$$\begin{aligned}\bar{P}_{1-2} + \bar{P}_{2-1} &= \Delta p_{1-2} \\ \bar{P}_{1-3} + \bar{P}_{3-1} &= \Delta p_{1-3} \\ \bar{P}_{2-3} + \bar{P}_{3-2} &= \Delta p_{2-3}\end{aligned}\tag{2.33}$$

и уравнение баланса мощности в узле 2:

$$\bar{P}_2 + \bar{P}_{2-1} - \bar{P}_{2-3} = 0\tag{2.34}$$

где элементы вектора b для первых трех уравнениях равны потерям в линиях Δp_{ij} , для последнего уравнения – равен нулю.

Элементы матрицы B равны коэффициентам уравнений (2.33)–(2.34). Поскольку в исследуемых алгоритмах нельзя задавать измерениям нулевые дисперсии, а значение P_2 равно нулю, его можно просто исключить из уравнения (2.34).

Обозначим u вектор R^r множителей Лагранжа ограничений (2.33) поставленной задачи.

Необходимые и достаточные условия этой задачи представляются в виде системы линейных уравнений относительно трех векторов x , y и u :

$$\begin{aligned}Ax + By &= b \\ A^T u &= 0 \\ B^T u - Hy &= -H\bar{y}\end{aligned}\tag{2.35}$$

Найдя любым способом решение этой системы, получим не только требуемые векторы $\hat{y}$, $\hat{x}$, но и очень важный во многих отношениях вектор $\hat{u}$, являющийся конкретным значением априори неопределенного вектора множителей Лагранжа. Вектор множителей Лагранжа может, в частности, эффективно использоваться при анализе и интерпретации полученных решений.

В данном случае, когда нет неизмеренных переменных, то есть $x=0$, и отсутствует второе уравнение системы (2.35), задача сводится к решению уравнения относительно вектора u :

$$(BH^{-1}B^T)u = b - B\bar{y} \quad (2.36)$$

Найдя решение этой системы $\hat{u}$, затем можно вычислить:

$$\begin{aligned} \hat{z} &= B^T \hat{u} + H\bar{y} \\ \hat{y} &= H^{-1} \hat{z} \end{aligned} \quad (2.37)$$

Порядок работы

1. Составить таблицу 2.1, заполнить 1 и 2 столбцы «эталонными» значениями по своему варианту (табл. 2.2):

Таблица 2.1 – Результаты оценивания параметров

Измеряемый параметр	Эталон $y_{\text{эт}}$	Измерения $\bar{y}$	$\Delta = \frac{ \bar{y} - y_{\text{эт}} }{\sigma}$	Оценки $\hat{y}$	$\Delta = \frac{ \hat{y} - \bar{y} }{\sigma}$	$\Delta = \frac{ \hat{y} - y_{\text{эт}} }{\sigma}$
P ₁₋₂						
P ₂₋₁						
P ₁₋₃						
P ₃₋₁						
P ₂₋₃						
P ₃₋₂						
Ср. значения отклонений	-	-				

2. Заполнить 3 столбец. Для этого к значениям измеренных параметров, полученных при расчете установившегося режима (эталонный режим), добавить случайные нормально распределенные ошибки с нулевым матожиданием и заданной дисперсией. Для этого случайные числа с распределением $N(0,1)$, генерируемые с помощью датчика, умножатся на среднеквадратичные отклонения соответствующих измерений

3. Рассчитать 4 столбец по заданной для столбца формуле.
4. Для получения оценок измеряемых параметров составить матрицы B , H по уравнениям 2.33, 2.34.
5. Получить оценки измеряемых параметров в столбце 5. Для этого составить и решить систему уравнений (2.36) и (2.37) (см. Примечание).
6. Рассчитать 6 и 7 столбцы по заданным для них формулам.
7. Рассчитать средние значения отклонений от эталона, сделать вывод.

Примечание:

Для решения систем уравнений, заданных в матричном виде, в пакете Mathcad можно воспользоваться функцией $lsolve$. Для системы уравнений, записанной в матричном виде как $Ax=B$, где A – матрица коэффициентов при неизвестных параметрах, B – правые части соответствующих уравнений, x – столбце искомых неизвестных, функция $Lsolve$ запишется как:

$Lsolve(A,B)$

и возвращает вектор решения x такой, что $Ax = B$.

Задание 2.

Добавьте к уравнениям (2.33), (2.34) контурное уравнение:

$$K_1 \bar{P}_{1-3} + K_2 \bar{P}_{3-2} + K_3 \bar{P}_{2-1} = 0$$

Коэффициенты K_1 , K_2 , K_3 выберите согласно варианту по таблице 2.3. Получите таблицу, аналогичную таблице к заданию 1, сделайте выводы.

Задание 3.

К измерениям первого примера добавлены:

- активная нагрузка первого узла P_1
- реактивная нагрузка Q_1
- напряжение второго узла U_2

- напряжение третьего узла U_3
- перетоки реактивной мощности $Q_{12}, Q_{21}, Q_{13}, Q_{31}, Q_{23}, Q_{32}$.

В балансирующем узле 1 было задано и зафиксировано напряжение $U_1=220\text{кВ}$.

Дисперсии измерений: $\sigma_{U_i}^2 = 5$; $\sigma_{P_i}^2 = 10$; $\sigma_{Q_i}^2 = 100$; $\sigma_{Q_{i-j}}^2 = 25$.

В качестве ограничений использовались уравнения баланса активной и реактивной мощности в узлах и линиях, контурное уравнение и уравнения падения напряжения в ветвях 1–2 и 1–3:

$$\begin{aligned}
 P_{1-2} + P_{2-1} &= \Delta P_{1-2} \\
 P_{1-3} + P_{3-1} &= \Delta P_{1-3} \\
 P_{2-3} + P_{3-2} &= \Delta P_{2-3} \\
 -P_{1-2} - P_{1-3} + P_1 &= 0 \\
 -P_{2-3} - P_{2-1} &= 0 \\
 K_1 P_{1-3} + K_2 P_{2-1} + K_3 P_{3-2} &= 0 \\
 Q_{1-2} + Q_{2-1} &= \Delta Q_{1-2} \\
 Q_{1-3} + Q_{3-1} &= \Delta Q_{1-3} \\
 Q_{2-3} + Q_{3-2} &= \Delta Q_{2-3} \\
 -Q_{1-2} - Q_{1-3} + Q_1 &= 0 \\
 -Q_{2-3} - Q_{2-1} &= 0 \\
 220 - U_2 - \Delta U_{1-2} &= 0 \\
 220 - U_3 - \Delta U_{1-2} &= 0
 \end{aligned}$$

Рисунок 2.10 – Ограничения

Решите задачу оценивания состояния: дополните таблицу 2.1 недостающими измеряемыми параметрами, используя данные своего варианта из таблицы 2.4.

Таблица 2.2 - Варианты для выполнения задания 1

№ вар.	P_{1-2}	P_{2-1}	P_{1-3}	P_{3-1}	P_{2-3}	P_{3-2}	Вектор b
1	221,2	-220,5	252,8	-251,6	220,6	-220,1	$[0,7 \ 1,2 \ 0,5 \ 0]^T$
2	220,7	-221,3	253,2	-251,8	221,1	-220,6	$[-0,6 \ 1,4 \ 0,5 \ 0]^T$
3	221,3	-220,8	251,8	-250,4	220,8	-220,1	$[0,5 \ 1,4 \ 0,7 \ 0]^T$

4	221,2	-220,6	252,7	-251,5	220,7	-220,3	$[0,6 \ 1,2 \ 0,4 \ 0]^T$
5	221,3	-220,8	252,5	-251,3	220,4	-220,3	$[0,5 \ 1,2 \ 0,1 \ 0]^T$
6	221,3	-220,6	252,6	-251,3	220,4	-220,2	$[0,7 \ 1,3 \ 0,2 \ 0]^T$
7	221,3	-220,4	252,5	-251,3	221,4	-220,8	$[0,9 \ 1,2 \ 0,6 \ 0]^T$
8	221,1	-220,4	252,2	-251,3	220,4	-220,1	$[0,7 \ 0,9 \ 0,3 \ 0]^T$
9	221,3	-220,8	251,8	-250,4	220,8	-220,1	$[0,5 \ 1,4 \ 0,7 \ 0]^T$
10	221,2	-220,6	252,7	-251,5	220,7	-220,3	$[0,6 \ 1,2 \ 0,4 \ 0]^T$
11	220,7	-221,3	253,2	-251,8	221,1	-220,6	$[-0,6 \ 1,4 \ 0,5 \ 0]^T$
12	221,2	-220,6	252,7	-251,5	220,7	-220,3	$[0,6 \ 1,2 \ 0,4 \ 0]^T$
13	221,3	-220,6	252,6	-251,3	220,4	-220,2	$[0,7 \ 1,3 \ 0,2 \ 0]^T$
14	221,1	-220,4	252,2	-251,3	220,4	-220,1	$[0,7 \ 0,9 \ 0,3 \ 0]^T$

Таблица 2.3 - Варианты для выполнения задания 2

№ вар.	K ₁	K ₂	K ₃
1	0,799	0,397	0,52
2	0,6917	0,397	0,3954
3	0,693	0,397	0,395
4	0,691	0,397	0,395
5	0,692	0,397	0,395
6	0,6916	0,397	0,3954
7	0,692	0,397	0,395
8	0,692	0,3972	0,3952
9	0,6932	0,3968	0,3949
10	0,6916	0,3973	0,3954
11	0,6917	0,397	0,3954
12	0,691	0,397	0,395
13	0,6916	0,397	0,3954
14	0,692	0,3972	0,3952

Таблица 2.3 - Варианты для выполнения задания 3

№ вар.	1	2	3	4	5
Параметр					
P ₁₋₂	221,2	220,7	221,3	221,2	221,3
P ₂₋₁	-220,5	-221,3	-220,8	-220,6	-220,8
P ₁₋₃	252,8	253,2	251,8	252,7	252,5
P ₃₋₁	-251,6	-251,8	-250,4	-251,5	-251,3
P ₂₋₃	220,6	221,1	220,8	220,7	220,4

P_{3-2}	-220,1	-220,6	-220,1	-220,3	-220,3
P_1	474,08	473,98	473,18	473,9	473,8
Q_{1-2}	114,7	111,9	111,9	111,9	113,9
Q_{2-1}	-90,2	-88,4	-89,4	-87,4	-87,4
Q_{1-3}	121,2	119,1	119,1	119,1	119,1
Q_{3-1}	-81,709	-89,4	-89,4	-89,4	-89,4
Q_{2-3}	89,98	89,98	89,91	87,91	87,91
Q_{3-2}	-62,32	-64,3	-64,3	-64,3	-64,3
Q_1	235,997	231,8	231,1	230,9	232,9
U_2	210,537	210,537	210,537	210,537	210,537
U_3	201,526	201,526	201,526	201,526	201,526
Вектор b	$\begin{bmatrix} 0,7 & 1,2 & 0,5 \\ 0 & 0 & 0 & 24,5 \\ 39,491 \\ 27,66 & 0 & 0 \\ -210,02 \\ -205,55 \end{bmatrix}^T$	$\begin{bmatrix} -0,6 & 1,4 \\ 0,5 & 0 & 0 & 0 \\ 23,5 \\ 29,7 & 25,68 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ -210,02 \\ -205,55 \end{bmatrix}^T$	$\begin{bmatrix} 0,5 & 1,4 & 0,7 \\ 0 & 0 & 0 & 22,5 \\ 29,7 & 25,61 \\ 0 & 0 & -210,02 \\ -205,55 \end{bmatrix}^T$	$\begin{bmatrix} 0,6 & 1,2 & 0,4 \\ 0 & 0 & 0 & 24,5 \\ 29,7 & 23,61 \\ 0 & 0 & -210,02 \\ -205,55 \end{bmatrix}^T$	$\begin{bmatrix} 0,5 & 1,2 \\ 0,1 & 0 & 0 & 0 \\ 26,5 & 29,7 \\ 23,61 & 0 & 0 \\ -210,02 \\ -205,55 \end{bmatrix}^T$

Продолжение таблицы 2.3

№ вар.	6	7	8	9	10
Параметр					
P1-2	221,3	221,3	221,1	221,3	221,2
P2-1	-220,6	-220,4	-220,4	-220,8	-220,6
P1-3	252,6	252,5	252,2	251,8	252,7
P3-1	-251,3	-251,3	-251,3	-250,4	-251,5
P2-3	220,4	221,4	220,4	220,8	220,7
P3-2	-220,2	-220,8	-220,1	-220,1	-220,3
P1	473,9	473,8	473,3	473,1	473,9
Q1-2	112,2	110,2	111,8	111,4	113,5
Q2-1	-86,4	-86,4	-86,4	-86,4	-86,4
Q1-3	113,4	117,4	114,4	114,4	113,4
Q3-1	-89,4	-89,4	-89,4	-89,4	-89,4
Q2-3	86,91	86,91	86,91	86,91	86,91

Q3-2	-64,3	-64,3	-64,3	-68,3	-68,3
Q1	225,6	227,6	226,2	225,8	226,7
U2	210,537	210,537	210,537	210,537	210,537
U3	201,526	201,526	201,526	201,526	201,526
Вектор b	$\begin{bmatrix} 0,7 & 1,3 & 0,2 \\ 0 & 0 & 0 & 25,8 \\ 24 & 22,61 & 0 \\ 0 & -210,02 \\ -205,55 \end{bmatrix}^T$	$\begin{bmatrix} 0,9 & 1,2 & 0,6 \\ 0 & 0 & 0 & 23,8 \\ 28 & 22,61 & 0 \\ 0 & -210,02 \\ -205,55 \end{bmatrix}^T$	$\begin{bmatrix} 0,7 & 0,9 & 0,3 \\ 0 & 0 & 0 & 25,4 \\ 25 & 22,61 & 0 \\ 0 & -210,02 \\ -205,55 \end{bmatrix}^T$	$\begin{bmatrix} 0,5 & 1,4 & 0,7 \\ 0 & 0 & 0 & 25 \\ 25 & 18,61 & 0 \\ 0 & -210,02 \\ -205,55 \end{bmatrix}^T$	$\begin{bmatrix} 0,6 & 1,2 \\ 0,4 & 0 & 0 & 0 \\ 27,1 & 24 \\ 18,61 & 0 & 0 \\ -210,02 \\ -205,55 \end{bmatrix}^T$

Продолжение таблицы 2.3

№ вар. Параметр	11	12	13	14
P1-2	220,7	221,2	221,3	221,1
P2-1	-221,3	-220,6	-220,6	-220,4
P1-3	253,2	252,7	252,6	252,2
P3-1	-251,8	-251,5	-251,3	-251,3
P2-3	221,1	220,7	220,4	220,4
P3-2	-220,6	-220,3	-220,2	-220,1
P1	473,98	473,9	473,9	473,3
Q1-2	111,9	111,9	112,2	111,8
Q2-1	-88,4	-87,4	-86,4	-86,4
Q1-3	119,1	119,1	113,4	114,4
Q3-1	-89,4	-89,4	-89,4	-89,4
Q2-3	89,98	87,91	86,91	86,91
Q3-2	-64,3	-64,3	-64,3	-64,3
Q1	231,8	230,9	225,6	226,2
U2	210,537	210,537	210,537	210,537
U3	201,526	201,526	201,526	201,526
Вектор b	$\begin{bmatrix} -0,6 & 1,4 & 0,5 & 0 \\ 0 & 0 & 23,5 \\ 29,7 & 25,68 & 0 & 0 \\ -210,02 \\ -205,55 \end{bmatrix}^T$	$\begin{bmatrix} 0,6 & 1,2 & 0,4 & 0 & 0 \\ 0 & 24,5 & 29,7 \\ 23,61 & 0 & 0 \\ -210,02 \\ -205,55 \end{bmatrix}^T$	$\begin{bmatrix} 0,7 & 1,3 & 0,2 \\ 0 & 0 & 0 & 25,8 & 24 \\ 22,61 & 0 & 0 \\ -210,02 \\ -205,55 \end{bmatrix}^T$	$\begin{bmatrix} 0,7 & 0,9 & 0,3 \\ 0 & 0 & 0 & 25,4 \\ 25 & 22,61 & 0 \\ 0 & -210,02 \\ -205,55 \end{bmatrix}^T$

Требования к отчету:

Отчет должен содержать:

1. Листинг компьютерных моделей
2. Результаты моделирования и оценки измеренных параметров для предложенной схемы
3. Выводы по анализу предложенных моделей

Контрольные вопросы

1. В чем заключается задача оценивания состояния?
2. Что называется контрольным уравнением?
3. Какие переменные входят в контрольное уравнение?
4. Приведите математическую формулировку задачи оценивания состояния
5. Приведите матричную форму предложенной модели
6. Что является компонентами матрицы A для предложенной модели?
7. Что является компонентами матрицы B для предложенной модели?
8. Как определяются компоненты матрицы H в предложенной модели?
9. Какой метод используется для решения поставленной задачи?
10. Что определяет вектор множителей Лагранжа в данной модели?

Рекомендуемая литература

1,2,8,13,14

ТЕМА 3. ДИНАМИЧЕСКОЕ ОЦЕНИВАНИЕ СОСТОЯНИЯ

Динамическое оценивание состояния ЭЭС используется в том случае, когда есть информация о соотношениях между параметрами режима в различные моменты времени, т. е. о динамике процессов в ЭЭС. Но при этом, как уже указывалось, делается предположение о марковости процессов:

координаты, описывающие режим в $(k + 1)$ -й момент времени, зависят от режима в k -й момент времени, но не зависят от $(k - 1)$ -го, $(k - 2)$ -го и т. д. моментов. В число координат могут быть включены и скорости изменения параметров, т. е. имеются в виду и фазовые координаты. Использование имеющейся информации о динамике системы как всякое повышение избыточности приводит к повышению надежности получаемых оценок.

Знание предыстории процесса позволяет значительно проще, чем при статическом оценивании, обнаружить грубые ошибки в исходной информации. При этом можно использовать два фактора: ограниченность шума, что приводит к малой вероятности существенного отклонения значения параметра режима в данный момент времени от прогнозируемого значения; сильную взаимосвязь параметров режима.

Первый фактор позволяет резкое отклонение измеренного значения от прогнозируемого рассматривать как вероятный сбой. Из второго фактора вытекает другое правило: если резкое изменение значений измеренных параметров режима замечено одновременно в нескольких взаимосвязанных узлах системы, то, скорее всего, оно связано именно с изменением режима, а не с ошибкой измерения.

Напротив, резкое изменение в значениях одного параметра режима без изменения других параметров, сильно связанных с ним электрически, свидетельствует о вероятном сбое в измерительной системе.

Для большей определенности можно произвести оценивание состояния с отбрасыванием «подозрительного» измерения. Если при этом величина $\varphi(Y)$ существенно уменьшится, то полученные при таком оценивании значения параметров режима можно считать более достоверными.

Рассмотрим эти подходы к обнаружению грубых ошибок более подробно.

Разность между измеренным $\bar{v}_{j,k+1}$ и прогнозируемым $v_{j,k+1}$ значением параметра режима v_j определяется значением в $(k + 1)$ -й момент времени:

$$\varepsilon_{j,k+1} = \bar{v}_{j,k+1} - v_{j,k+1} \left(\Phi \left(\hat{Y}_k \right) \right), \quad (3.1)$$

причем распределение ε_{k+1} (если принимать зависимость $v_j(Y)$ линейной) будет нормальным с ковариационной матрицей:

$$r_{\varepsilon j} = r_{vj} + \frac{dv_j}{dY} \left(\Phi_k P_k \Phi_k^T + Q_k \right) \left(\frac{dv_j}{dY} \right)^T \quad (3.2)$$

Зная $r_{\varepsilon j}$ и заданную p – вероятность попадания ε_j в доверительный интервал, можно указать ширину доверительного интервала Δ_j , например, при $p = 0,997$, $\Delta_j = 3 \cdot \sqrt{r_{\varepsilon j}}$. Если

$$|\varepsilon_j| \geq \Delta_j \quad (3.3)$$

то с вероятностью p данный замер может считаться ошибочным.

Правильность гипотезы о «подозрительном» измерении можно также проверять по изменению доверительных интервалов. Если при отбрасывании «подозрительного» измерения величины доверительных интервалов уменьшились, то гипотеза оказалась правильной. Контроль за величиной доверительных интервалов представляется более надежным, чем оценка гипотезы о «плохом» измерении по критерию $\phi(Y)$, которое может уменьшиться не за счет лучших оценок, а просто за счет уменьшения числа слагаемых в $\phi(Y)$.

При выводе уравнений динамического оценивания не накладывалось каких-либо ограничений на состав вектора $\bar{V}_k$ в каждый момент времени. В реальной измерительной системе информация об объекте может поступать поочередно, т.е. состав вектора $\bar{V}_k$ будет различен при каждом новом поступлении информации. Особый интерес представляет случай, когда каждая «порция» измерений состоит из одного измерения.

Преимущество метода сканирования по сравнению с методом «снимка», когда вся информация о состоянии поступает одновременно, состоит в данном случае в том, что нет необходимости решать систему

уравнений высокого порядка, а при каждом поступлении новой измеренной величины производится коррекция вектора оценок и матрицы ковариаций P_{k+1} , при этом нужно произвести лишь одно деление на скаляр.

Процесс получения оценок во все последовательные дискретные моменты времени можно назвать слежением за режимом системы. При этом в каждый момент может решаться либо задача статического оценивания (и тогда данные о прошлых моментах времени не используются), либо динамическая задача, рассмотренная в данном разделе.

Сопоставим эти два пути.

Задача статического оценивания состояния имеет то преимущество, что не зависит от модели динамики системы и потому без большого запаздывания реагирует на скачки и быстрые изменения режима системы. Но это достоинство переходит в недостаток, когда речь идет об устойчивости по отношению к помехам, сбоям и исчезновению «данных». Можно увеличить ее устойчивость с помощью специальных критериев для подавления плохих данных, а также использовать в качестве псевдоизмерений при исчезновении данных оценки в предшествующий момент времени. Но первый способ не защищает систему от сбоев, вызванных потерей информации, и в то же время уменьшает чувствительность системы оценивания, второй способ сводит по существу статическое оценивание к динамическому. Недостатком статического оценивания следует считать и необходимость избыточности измерений.

Динамические оценки обладают, несомненно, большей устойчивостью, система остается работоспособной и при пропаже части данных или больших ошибках, но использование прошлых данных приводит к инерционности системы оценивания, тем большей, чем менее адекватна модель динамики реальному изменению состояния ЭЭС; оценки менее чувствительны к быстрым изменениям режима. Здесь проявляется известное противоречие между чувствительностью системы и ее устойчивостью.

Поэтому алгоритмы статического и динамического оценивания в

определенной мере дополняют друг друга, и в хорошо укомплектованной системе алгоритмов АСДУ при управлении в реальном масштабе времени должны быть оба.

При этом алгоритм статического оценивания должен работать при запуске системы оценивания и при возникновении больших ошибок в динамических оценках, что определяется ростом диагональных элементов матрицы ковариаций ошибок оценок P . Модель измерений $I(Y)$ при динамическом оценивании зачастую может быть в этих условиях линейной и получаться путем линеаризации нелинейных зависимостей в точке, вычисленной в результате статического оценивания состояния. Более того, могут быть использованы модели постоянного тока для активных и реактивных мощностей.

Динамическое оценивание может рассматриваться в трех временных аспектах: может производиться оценивание параметров режима в текущий момент времени – такая задача называется задачей фильтрации; полученные измерения могут использоваться для получения оценок в предстоящие моменты времени – задача предсказания, прогноза; полученные измерения позволяют уточнить полученные ранее оценки, в частности уточнить начальное состояние объекта – задача сглаживания.

Для решения задачи оценивания состояния используется фильтр Калмана. Фильтр Калмана – эффективный рекурсивный фильтр, оценивающий вектор состояния динамической системы, используя ряд неполных и зашумленных измерений. Назван в честь Рудольфа Калмана.

Основная идея фильтра Калмана состоит в использовании уравнения динамики системы, т. е. уравнения, связывающего параметры состояния в различные моменты времени, в качестве дополнительной информации, подобно тому, как уравнение физических связей между различными параметрами использовались при статическом оценивании состояния. Сам термин «фильтр» характеризует назначение данного подхода как способа выделения полезной информации из сигналов, засоренных шумом. Фильтр

Калмана предназначен для рекурсивного дооценивания вектора состояния априорно известной динамической системы, то есть для расчёта текущего состояния системы необходимо знать текущее измерение, а также предыдущее состояние самого фильтра. Таким образом, фильтр Калмана, подобно другим рекурсивным фильтрам, реализован во временном, а не в частотном представлении, но в отличие от других подобных фильтров, фильтр Калмана оперирует не только оценками состояния, а ещё и оценками неопределённости (плотности распределения) вектора состояния, опираясь на формулу Байеса условной вероятности.

Алгоритм работает в два этапа. На этапе прогнозирования фильтр Калмана экстраполирует значения переменных состояния, а также их неопределённости. На втором этапе по данным измерения (полученного с некоторой погрешностью) результат экстраполяции уточняется. Благодаря пошаговой природе алгоритма, он может в реальном времени отслеживать состояние объекта (без заглядывания вперед, используя только текущие замеры и информацию о предыдущем состоянии и его неопределённости).

Модель динамики процесса представляется в виде

$$Y_{k+1} = F_k(Y_k) + \xi_{\phi k} \quad (3.1)$$

где $k = 1, \dots, T - 1$ – номера дискретных моментов времени; Y_k – вектор состояния системы в k -й момент порядка n . Начальное состояние Y_0 также можно рассматривать как случайный вектор с математическим ожиданием $\bar{Y}_0$ и ковариационной матрицей P_0 .

Выведем уравнения фильтра Калмана с учетом нелинейности зависимостей $V(Y)$. Зависимость $F_k(Y_k)$ также в принципе может быть нелинейной и эту нелинейность можно учесть, но динамику ЭЭС достаточно хорошо аппроксимируют линейные модели типа $Y_{k+1} = \Phi_k \cdot Y_k + \xi_{\phi k}$, где матрица перехода Φ_k идентифицируется для каждого характерного интервала суточного графика. Пусть в момент времени k получены оценки $\hat{Y}_k$ и матрица

ковариаций ошибок этих оценок P_k . Тогда в $(k + 1)$ – й момент времени мы будем располагать следующей информацией для оценивания:

– измерениями в $(k + 1)$ –й момент времени $\bar{V}_{k+1}$, точность которых определяется ковариационной матрицей $R_{V,k+1}$;

– прогнозом:

$$\bar{Y}_{k+1} = \Phi_k \hat{Y}_k \quad (3.2)$$

точность которого определяется шумом перехода $\xi_{\Phi k}$, точностью значений параметров матрицы Φ_k и точностью оценок $\hat{Y}_k$.

Учет точности значений элементов матрицы Φ_k методически сложен и обычно погрешности прогноза, вызванные неточностью Φ_k , относятся в шум $\xi_{\Phi k}$, для которого полагается известной матрица ковариаций Q_k .

Тогда матрица ковариаций ошибок прогноза определяется как

$$M_k = \Phi_k P_k \Phi_k^T + Q_k \quad (3.3)$$

Вводим критерий наименьших квадратов для определения оценок в $(k + 1)$ -й момент времени:

$$\varphi_{k+1} = \left[\bar{V}_{k+1} - V_{k+1}(Y_{k+1}) \right]^T R_{V,k+1}^{-1} \left[\bar{V}_{k+1} - V_{k+1}(Y_{k+1}) \right] + \left(\bar{Y}_{k+1} - Y_{k+1} \right)^T M_k^{-1} \quad (3.4)$$

Приравнивая нулю производные от этого критерия по вектору Y , получаем

$$\left[\bar{V}_{k+1} - V_{k+1}(Y_{k+1}) \right]^T R_{V,k+1}^{-1} \frac{dV_{k+1}}{dY} + \left(\bar{Y}_{k+1} - Y_{k+1} \right)^T M_k^{-1} = 0 \quad (3.5)$$

Эта нелинейная система уравнений может быть решена методом Ньютона – Рафсона.

Оценивание состояния системы дискретным фильтром Калмана

Цель и содержание: Развитие у студентов знаний о задаче оценивания состояния ЭЭС и используемых математических моделях

Знания: постановку задачи оценивания состояния ЭЭС и используемые математические модели

Умения: применять методы и алгоритмы проверки, количественной оценки качества и синтеза наблюдаемости ЭЭС

Владения: навыками расчетов оценок параметров установившихся режимов ЭЭС

Краткие теоретические сведения

Фильтр Калмана существует в непрерывной и в дискретных формах. Разберем дискретный фильтр Калмана.

Блок–схема исследуемого процесса имеет вид (рисунок 3.1).

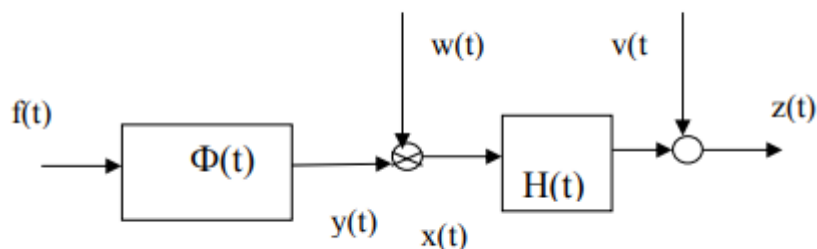


Рисунок 3.1 – Блок–схема исследуемого процесса

Здесь Φ – линейный объект (т.е. объект, описываемый линейными соотношениями), на выходе которого вырабатывается неслучайный сигнал $y(t)$. На выходную величину воздействует аддитивный (в виде слагаемого) шум $w(t)$. Шум $w(t)$ – это какие –то случайности внутри нашей системы. После шума мы имеем выходную величину $x(t)$. $X(t)$ – выходной сигнал нашей системы есть сумма неслучайного процесса $y(t)$ и шума. Поэтому это уже случайный процесс. Поэтому в целом наша система – вероятностная

(стохастическая). Мы хотим определить неизвестный нам случайный выходной процесс $y(t)$ измерить неслучайную выходную величину $y(t)$, но измеряем мы не ее, и не случайный выходной сигнал системы $x(t)$, а преобразованный линейным блоком H случайный процесс $z(t)$. Это так называемые косвенные измерения, когда меряется какая – то функция определяемой величины.

В общем случае Φ и H могут изменяться во времени. Шумы $W(t)$ и $v(t)$ – нормально распределенные случайные процессы с нулевыми математическими ожиданиями, $M(w)=0$ $M(v)=0$ и с постоянными дисперсиями Q и R , соответственно.

Процесс $x(t)$ также распределен нормально, т.к. любое линейное преобразование нормально распределенного процесса есть нормально распределенный случайный процесс, а шум $w(t)$ подчиняется нормальному закону распределения. Измерения производятся с ошибкой $v(t)$. Таким образом, в действительности мы измеряем величину:

$$z(t) = H(x(t) + W(t)) + v(t) \quad (3.13)$$

причем случайный процесс $z(t)$ также распределен нормально. Требуется построить фильтр, после которого мы получим наилучшую оценку величины y . Каждое последующее состояние системы определяется предыдущим:

$$x_{k+1} = x_k e^{\frac{-\Delta t}{T}} \quad (3.14)$$

Нижеприведенная программа составлена для $Q=R=0.1$. Для оценки качества фильтрации в программе решается также уравнение незашумленного, якобы «неизвестного» нам процесса. Подробнее о методах программирования в среде Mathcad изложено в Приложении 1.

В программе:

y – «незашумленная» переменная,

X_1 – оцениваемая переменная:

Z – измеряемая переменная.

```

Z := | y ← 0
      x1 ← 0
      Q ← 0.1
      R ← 0.1
      z1 ← rnorm(1,y,√Q)
      z2 ← rnorm(1,0,√R)
      z ← z10 + z20
      P ←  $\frac{Q \cdot R}{Q + R}$ 
      x1 ←  $\frac{Q \cdot z + R \cdot x1}{Q + R}$ 
      T ← 10
      ( for k ∈ 1..100
        | x1 ←  $1 - \exp\left(\frac{-1}{T}\right) + x1 \cdot \exp\left(\frac{-1}{T}\right)$ 
        | P ←  $P - \frac{P^2}{P + Q + R}$ 
        | y ←  $1 - \exp\left(\frac{-1}{T}\right) + y \cdot \exp\left(\frac{-1}{T}\right)$ 
        | z1 ← rnorm(1,y,√Q)
        | z2 ← rnorm(1,0,√R)
        | z ← z10 + z20
        | x1 ←  $\frac{P \cdot z + R \cdot x1}{P + R}$ 
        | P ←  $P \cdot \frac{R}{P + R}$ 
        | Zk,2 ← z
        | Zk,0 ← y
        | Zk,1 ← x1
        | k
      )
Z

```

$j := 0..100$

Рисунок 3.2– Программа реализации фильтра Калмана

В доцикловой части первым оператором присваивается начальное значение «незашумленной» и оцениваемой переменной, причем начальное значение оцениваемой переменной берется случайное, вводятся постоянные значения дисперсий обоих шумов и постоянной времени системы, производится первое измерение z и вычисляется первая оценка математического ожидания и дисперсии.

Измерение рассматривается как сумма двух псевдослучайных величин, образованных с помощью функции $rnorm(m,y,s)$, которая возвращает

вектор m случайных чисел, имеющих нормальное распределение с математическим ожиданием μ и СКО $\sigma > 0$. В первой функции *rnorm* за мат. ожидание принято значение μ – «незашумленной» переменной, во второй – мат. ожидание равно 0.

В цикловой части программы производится перевод оцениваемых переменной и дисперсии в новое состояние системы, затем переводится в новое состояние «незашумленная» переменная, производится новое измерение z и вычисляется новая оценка оцениваемой переменной и дисперсии. В последних операторах цикловой части производится накопление измерений, оцениваемой и «незашумленной» переменной в массивы, с целью вывода их на печать после окончания решения

На рисунке 3.3 приведено решение задачи. Кривая, изображенная штрихом – измерения без фильтрации, непрерывная кривая – «незашумленная» переменная, точечная кривая – оценка.

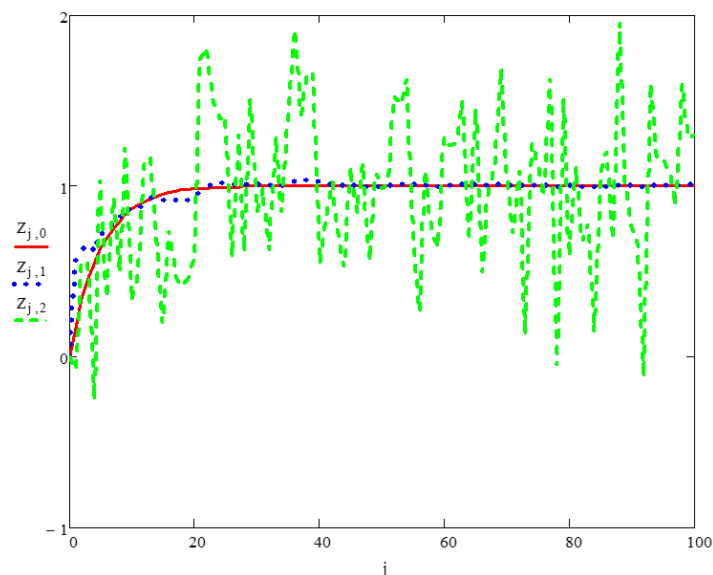


Рисунок 3.3 – Решение задачи

Оборудование и материалы

Для выполнения лабораторной работы необходим персональный компьютер со следующими характеристиками: процессор Intel Pentium с тактовой частотой не менее 800 МГц, оперативная память – не менее 64

Мбайт, свободное дисковое пространство – не менее 250 Мбайт, устройство для чтения компакт-дисков, монитор типа Super VGA (число цветов – 256) с диагональю не менее 15”. Программное обеспечение – операционная система WINDOWS 2000 / XP / Vista / 7 и выше.

Указания по технике безопасности

Техника безопасности при выполнении лабораторной работы совпадает с общепринятой для пользователей персональных компьютеров: самостоятельно не производить ремонт персонального компьютера, установку и удаление программного обеспечения; в случае неисправности персонального компьютера сообщить об этом обслуживающему персоналу лаборатории (оператору, администратору); соблюдать правила техники безопасности при работе с электрооборудованием; не касаться электрических розеток металлическими предметами; рабочее место пользователя персонального компьютера должно содержаться в чистоте; не разрешается возле персонального компьютера принимать пищу, напитки.

Задание для самостоятельного выполнения:

1. Какие упрощения сделаны в данной модели? Доработайте модель, добавив случайную составляющую для исходного сигнала.
2. Определите графически, на что влияют изменения значений R и Q?
3. Составьте фильтр Калмана для систем, изменяющихся по следующим законам (таблица 3.1):

Таблица 3.1– Исходные данные

Вариант	Закон изменения	
1	$Y=t^2+1/t$	$Y=t^2+1/t^2$
2	$Y=1/\sin(t)$	$Y=1+\sin(2t^2)$

3	$Y=\sqrt{t}/\cos(t)$	$Y=1/\cos(2t)$
4	$Y=\sin(t^2)$	$Y=1+2\sin(2t)$
5	$Y=1+2\sin(2t)$	$Y=t^2+1/t$
6	$Y=t+1/t$	$Y=2t-\cos(2t)$
7	$Y=t^3+\sin(t)$	$Y=\sin(t^2)$
8	$Y=1/\cos(t)$	$Y=1/(t+t^2)$
9	$Y=1+\sin(2t^2)$	$Y=\cos^2(t)+1$
10	$Y=\sin(t)/\sqrt{t}$	$Y=1/\sin(t)$
11	$Y=1/(t+t^2)$	$Y=t+1/t$
12	$Y=1/\cos(2t)$	$Y=\cos^2(t)+t$
13	$Y=\cos^2(t)+1$	$Y=\sqrt{t}/\cos(t)$
14	$Y=2t-\cos(2t)$	$Y=1/\cos(2t)$
15	$Y=t^2+1/t^2$	$Y=t^3+\sin(t)$

Требования к отчету:

Отчет должен содержать:

1. График, поясняющий работу исходной модели
2. Mathcad-код доработанной модели и ее график
3. Ответ на вопрос 2 и графики, поясняющие ответ
4. Mathcad-код модели по своему варианту и ее график

Контрольные вопросы

1. Что представляет собой динамическое оценивание состояния?
2. Какие факторы учитываются при динамическом оценивании состояния?
3. Опишите метод ОС с отбрасыванием подозрительного измерения. На каком допущении он базируется?
4. Опишите метод сканирования при решении задачи ОС
5. Что называется слежением за режимом системы?
6. В чем преимущество динамического ОС по сравнению со статическим?
7. Что называется задачей фильтрации?
8. Что называется задачей сглаживания?
9. В чем основная идея фильтра Калмана?

Рекомендуемая литература

2,3,10

ТЕМА 4. ДОСТОВЕРИЗАЦИЯ ДАННЫХ

Плохими данными (ПД) называют телеизмерения, которые имеют большие погрешности. Основными причинами появления ПД являются одновременный опрос датчиков, отказ устройств, влияние погоды на точность измерений, накапливаемая статистическая ошибка несоответствий моделирования.

Успешное внедрение автоматизированных систем мониторинга переходных режимов WAMS (Wide Area Measurement Systems) на основе специализированных устройств PMU (Phasor Measurement Unit), предопределило перспективность использования интеллектуальных электронных устройств (ИЭУ) на основе технологии векторных измерений для решения других важных задач, связанных с повышением надежности и экономичности функционирования энергосистем.

Разработанные в настоящее время методы обнаружения и подавления «плохих данных» можно разделить на три группы. В основу такой классификации положено место алгоритмов обнаружения «плохих данных» относительно задачи оценивания состояния.

К первой группе относятся методы априорного анализа качества измерений, использующие топологические свойства уравнений установившегося режима ЭЭС и априорные сведения о распределении ошибок измерений и выявляющие грубые ошибки до решения задачи ОС. Вторую группу образуют методы, позволяющие в процессе решения задачи ОС одновременно с получением оценок выявить «плохие данные» и подавить их влияние на результаты. Как правило, это одношаговые алгоритмы, использующие различные модифицированные целевые функции – так называемые неквадратичные критерии. В третью группу включены методы апостериорного анализа, выявляющие «плохие данные» по результатам оценивания. Эти методы базируются на анализе различных остатков оценивания и, как правило, требуют возврата в задачу оценивания состояния после корректировки выявленных ошибочных измерений или их исключения.

Апостериорные методы

Одним из апостериорных методов является метод идентификации плохих данных «При удалении». Данный метод основывается на исследовании вектора отклонения после ОС. Идея этого метода заключается в последовательном цикле удаления ТИ из анализируемого набора данных, проверка на наличие плохих данных и переоценка состояния. Главным критерием данного метода является анализ величин относительных или нормализованных отклонений – r_N или r_W . Условиями отсутствия плохих данных служат неравенства:

$$|r_{Ni}| < \lambda \quad (4.1)$$

$$|r_{Wi}| < \lambda \quad (4.2)$$

где $i = 1, \dots, m$. В случае соблюдения неравенства проверка на отсутствия плохих данных, несет за собой положительный характер. Максимальное значения из $|r_{Ni}|$ или $|r_{Wi}|$ равны ТИ в которых присутствует ошибка. Данное высказывание верно для нормализованных отклонений, но не всегда подходят для относительных. Так как присутствие низких избыточных ТИ величина w_{ii} мала, исходя из этого возникает возможность обнаружения только больших ошибок. При $w_{ii} = 0$ ошибку не представляется возможности распознать, вследствие этого данное ТИ является критическим.

Плюсами методов обнаружения и корректировки плохих данных через их удаление является простота алгоритма, поскольку критерием отбраковки служит результат выполнения оценки состояния. На данном этапе присутствует возможность обнаружить ТИ, которые становятся критическими. При использовании второй методики не приходится вносить изменения в исходный набор телеизмерений, то есть в формировании нового вектора z и нет необходимости пересчитывать все матрицы, используемых при расчете, что позволяет сохранить сходимость всей процедуры

минимизации целевой функции.

Минусами методов идентификации ПД при удалении является их апостериорный характер, так как выявление плохих телеизмерений происходит уже после выполнения шага оценки. Проведение целого ряда переоценок–обнаружений может привести к увеличению времени вычислений. Существует вероятность удаления верных телеизмерений, что возможно для случаев множественных (взаимосвязанных) ПД или аномальных ошибок в данных, расположенных в областях с низкой локальной избыточностью.

Другим апостериорным методом идентификации плохих данных является Метод идентификации по проверочной гипотезе (ИПГ). Суть ИПГ заключается на нахождение множественных ПД, основываясь на расчете нормализованных или относительных отклонений и анализе через оценку ошибок и их статистических ошибок.

Данный метод предполагает, после проведения оценивания ВНК и нахождения ПД, наличие данных в формулах таких как, $r_i = z_i - h_i(\dot{x})$, где $i = 1...m$ – отклонений телеизмерений как в (3.9); квадратный индекс $J(\dot{x}) = \sum_{i=1}^m r_i^2 / \sigma_i^2$, эквивалентный $F(\dot{x})$ в (3.8); взвешенное отклонение $r_{wi} = r_i / \sigma_i$, или нормализованное взвешенное отклонение $r_{Ni} = r_i / \sigma_i \sqrt{w_{ii}}$.

В начале ТИ проходит процесс упорядочивания по уменьшению (подозрения на наличии ошибок $|r_{Ni}|$), вместе с этим составляется список s ТИ воспринимающих как «подозрительные». При необходимости выполняется проверка на взаимодействующие данные, которые связывается с корреляцией отклонений. Матрица ковариаций отклонений определяется по формуле:

$$cov(r) = WR \quad (4.3)$$

отсюда коэффициент корреляции между отклонениями r_i и r_j (

$i, j = 1, \dots, m$) равен:

$$\rho_{ij} = \frac{\text{cov}(r_i, r_j)}{\sqrt{\text{var}(r_i)}\sqrt{\text{var}(r_j)}} = \frac{\sigma_i w_{ij}}{\sigma_i \sqrt{w_{ii} w_{jj}}} \quad (4.4)$$

где w_{ij} – чувствительность внедиагональных элементов матрицы. Для вычисления w_{ij} должны выполняться условия, если:

$$q_i = G^{-1} h_j \quad (4.5)$$

где $G = H^T R^{-1} H$ – матрица прироста, а h_j – j -й слабо заполненный вектор–столбец матрицы Якоби H , то

$$w_{ij} = \delta_{ij} - \frac{h_i^T q_j}{\sigma_i} \quad (4.6)$$

где δ_{ij} – символ Кронекера. Составляя списки подозрительных ТИ придерживаются следующего алгоритма:

- рассматривается m -ое ТИ с большим $|r_{Ni}|$ или $|r_{Wi}|$
- решается уравнение (4.5) и находится q_k ;
- для каждого остающегося подозрительного телеизмерения i ($i \neq k$)
- надо рассчитать ρ_{ik} согласно (4.4) и (4.6), тем самым установив
- группу ТИ, взаимодействующих с m ;
- данная группа удаляется из общего списка телеизмерений и вновь
- выполняется переход на начало алгоритма, если еще остаются подозрительные ТИ.

С вычислительной точки зрения процедура выявления взаимодействующих ПД не требует большого количества времени. В конечном счете формируется список из s подозрительных ТИ. Для корректировки данных выполняется оценка ошибок группы выбранных телеизмерений.

$$\dot{\xi}_s = z_s - h_s(\dot{x}_{m-s}) \quad (4.7)$$

где $\dot{x}_{m-s}$ – оценка состояния, полученная в отсутствии s ТИ. Для выявления

приемлемых ТИ проводится анализ каждого компонента $\dot{\xi}_{si}$. Так как $\dot{\xi}_{si}$ является случайной переменной, то оценка значения $\dot{\xi}_{si}$ относят к теории решений и проверки гипотез

Исходя из выше изложенного можно сделать вывод, что способ корректировки ПД намного эффективней удаления, поскольку конфигурация ТИ остается нетронутой, что разрешает повторно применить имеющуюся матрицу прироста и экономить время на вычислениях. Но как и в каждом способе есть свои минусы. Данный алгоритм очень простой, но требует тщательного отбора при формировании первичной выборки, которая должна быть как можно меньше, но при этом включать в себя все ТИ, которые потенциально могут содержать ошибку. Перед выборкой любого дополнительного ТИ следует проверять условие сохранения наблюдаемости. Значения ξ_s должны легко рассчитываться для выборки любого размера и при итерационных перерасчетах. При использовании диагональных элементов матрицы W_{ss}^{-1} , эти элементы должны быть в наличии, и при каждой новой выборке матрицу W приходится пересчитывать и находить обратную, что на практике вызывает затруднения.

Подводя итоги о методе ИПГ можно сказать, что основной способ обнаружения выбросов заключается в расчете и проверке оценок ошибок для нескольких, последовательно уменьшающихся групп выбранных ТИ, с целью получить набор ПД.

Методы идентификации по “не квадратичному критерию”

Метод идентификации по не квадратичному критерию схож с методом, приведенным выше. Главное отличие данной методики от предыдущей заключается в том, что здесь идентификация – удаление больших ошибок – является частью самой оценки состояния. Целевая функция формируется не с использованием метода взвешенных наименьших квадратов, а как сумма некоторых функций, которые при малых отклонениях оценок от измерений

были бы сходными с квадратичными, а при больших отклонениях являлись бы пологими. Данный метод обрабатывает подозрительные ТИ, также зависящая от величины нормализованных или относительных отклонений. Телеизмерение, имеющее наибольшему отклонению, имеет наименьший вес в целевой функции и наибольшую степень отбраковки. Использование не квадратичных критериев может снижать воздействие больших ошибок телеизмерений на целевую функцию, тем самым ошибка не «размазывается» на верные измерения. Методика НКК состоит в минимизации следующей целевой функции:

$$F(\dot{x}) = \sum_{i=1}^m f_i(r_i, \sigma_i) \quad (4.8)$$

где $f_i = r_i^2 / \sigma_i^2$ в том случае, когда выполняется неравенства

$$|r_{xi}| < \gamma \quad (4.9)$$

где γ – некоторый точно заданный порог, $|r_{xi}|$ – обозначает $|r_{Ni}|$ или $|r_{Wi}|$ если неравенство имеет вид:

$$|r_{xi}| \geq \gamma \quad (4.10)$$

значения f_i вычисляется по одной из комбинаций: «парабола – касательная» (касательная проводится в точке смены функций), «парабола – прямая», «парабола – квадратный корень» или «парабола – константа». Лучшую сходимость метода Ньютона–Рафсона минимизации целевой функции обеспечивает комбинация «парабола – квадратный корень» вида

$$f_i = \gamma^2 \left(4 \cdot \sqrt{\left| \frac{r_i}{\gamma \sigma_i} \right|} - 3 \right) \quad (4.11)$$

Для сходимости метода выбор функции определяется по отсутствию разрыва производной в точке $f_i = 1$: считается, что оценка устойчива к появлению больших ошибок при ограниченности первой производной $\Psi_i = f_i'$. Проблемой для применения метода НКК состоит в выборе

(задании) величины γ , так как ее значение определяет порог отбраковки ТИ. Отбраковываются те ТИ, для которых $|r_{xi}| \geq \gamma \sigma_i$.

Плюсами метода НКК служит его простота, так как он представляет собой модификацию метода взвешенных наименьших квадратов. Здесь ОС и идентификация ПД происходит в одно время, это помогает избежать ряда последовательных переоценок. Метод оценивания состояния с использованием неквадратичных критериев относится к классу ошибкоустойчивых.

Минусы метода НКК. Данный метод очень чувствительный к выбору начального приближения. Для уменьшения вероятности возникновения локального минимума в качестве начального приближения используются результаты оценки по методу взвешенных наименьших квадратов. В случае низкой избыточности ТИ метод расходится. Обнаружения не всех ПД. Кроме того, метод дает достаточно непредсказуемые результаты для критических телеизмерений, и возможность определить такие измерения отсутствует.

Априорные методы

Метод контрольных уравнений относят к априорным методам обнаружения ПД. Задача обнаружения «плохих данных» с помощью КУ может быть сформулирована как задача проверки статистических гипотез. Используемая в задачах оценивания модель измерений базируется на предположении, что измерения содержат только случайные ошибки с гауссовским распределением с нулевым математическим ожиданием (МО) и известной дисперсией σ^2 т.е.

$$\xi_y \rightarrow N(0, \sigma_y^2) \quad (4.12)$$

Невязку линеаризованного КУ можно представить, как алгебраическую сумму погрешностей входящих в него измерений

$$w_k = \sum_{k \in w_k} a_{ki} \xi_{yi} \quad (4.13)$$

где a_{ki} – коэффициент, равный dw_k/dy_i в точке линеаризации; w_k – множество

измерений, входящих в k -е КУ.

Если измерения не содержат грубых ошибок, т.е. все ξ_{yi} распределены по закону (4.12), то w_k как линейная комбинация нормально распределенных независимых случайных величин также имеет нормальное распределение с нулевым МО и дисперсией, равной взвешенной сумме дисперсий случайных величин ξ_{yi} .

$$w_k \rightarrow N(0, \sigma_k^2) \quad (4.14)$$

$$\sigma_{wk}^2 = \sum_{kew_k} a_{ki}^2 \sigma_{yi}^2 \quad (4.15)$$

При появлении в измерениях грубых ошибок b суммарная ошибка $\xi = \xi_y + b$ имеет распределение, отличное от (4.12). Иное распределение, отличное от (4.14), (4.15), имеют в данном случае и невязки КУ. На этом основаны применяемые в задаче обнаружения «плохих данных» по КУ статистические тесты.

При проверке статистических гипотез возможны ошибки I и II рода. В задаче обнаружения «плохих данных» ошибка I рода – это браковка достоверных измерений, ошибка II рода – пропуск ошибочного измерения. При обнаружении «плохих данных» более неблагоприятная ситуация – пропуск ошибки, так как это заметно искажает получаемые оценки. Принимаемое решение должно обеспечивать минимальную вероятность ошибки I рода. Возникновение ошибки I рода может привести к ухудшению наблюдаемости вследствие ложной браковки и исключения в действительности достоверных данных из задачи оценивания состояния. Если забракованные измерения не исключаются, а заменяются псевдоизмерениями, то, как правило, требуются дополнительные затраты при решении задачи оценивания состояния, связанные с усложнением алгоритма и увеличением времени счета. Следовательно, вероятность ошибки I рода также должна быть по возможности минимальной.

Поскольку ошибка II рода является более неблагоприятной ситуацией при обнаружении «плохих данных», можно подтвердить вывод, что для «длинных» КУ необходимо задавать вероятность браковки α больше, чем для «коротких». Это позволяет сделать следующие выводы:

1. «Короткие» КУ имеют лучшую разрешающую способность относительно входящих в них ошибочных ТИ, чем «длинные» КУ
2. Для обеспечения одной и той же вероятности обнаружения ошибочных ТИ β для «коротких» и «длинных» КУ необходимо задавать разную вероятность «браковки» ТИ α : для «длинных» КУ α должно быть больше, чем для «коротких».

Основная идея априорного анализа грубых ошибок с использованием КУ исходит из следующих предположений:

- если невязка контрольного уравнения велика, то хотя бы одно из входящих в данное КУ измерений содержит грубую ошибку;
- пренебрегая относительно малой вероятностью взаимной компенсации грубых ошибок измерений, входящих в $i = e$ КУ, можно считать входящие в данное КУ измерения достоверными, если его невязка мала;
- если выделена группа $w_k^{(m)}$ из m КУ с большими невязками, в которые входят только m непроверенных еще измерений y_k , таких, что

$$\left| \frac{dw_k^{(m)}}{dy_k} \right| \neq 0 \quad (4.16)$$

а в остальные входящие в w_k -измерения уже объявлены ранее достоверными, то измеренные значения $\bar{y}_k$ заменяются на вычисленные из уравнений

$$w_k^{(m)}(\hat{y}_k) = \bar{w}_k^{(m)} \quad (4.17)$$

значения измерения $\hat{y}_k$ объявляются после этого достоверными и используются для проверки еще непроверенных измерений и для оценивания

состояния, а значения $\bar{y}_k$ объявляются «плохими» и не используются в дальнейшем.

Частным случаем, наиболее удобным для анализа, является выделение систем w_k первого порядка, т.е. таких отдельных уравнений с большими невязками, в которые входят измерения, уже объявленные достоверными, кроме одного, которое немедленно объявляется «плохим» и его измеренное значение заменяется на значение, вычисленное из условия равенства нулю невязки данного КУ;

– если существует линейная комбинация КУ с большими невязками, такая, что после исключения из нее некоторых непроверенных переменных полученные новые КУ имеют малые невязки, то все входящие в новые КУ измерения объявляются достоверными, а исключаемые переменные – ошибочными.

Используя эти решающие правила, можно предложить несколько алгоритмов поиска плохих данных:

- Алгоритм «Наибольшего доверия»;
- Алгоритм «Наибольшей подозрительности».

Достоверизация данных методом контрольных уравнений

Цель и содержание: Развитие у студентов знаний о методах повышения достоверности телеизмерений.

Знания: методы повышения достоверности телеизмерений

Умения: применять методы и алгоритмы проверки достоверности телеизмерений

Владения: навыками повышения достоверности телеизмерений

Краткие теоретические сведения

Ряд методов обработки первичной информации представляет собой статические алгоритмы обнаружения аномальных выбросов. Статическая обработка данных предполагает анализ телеизмерений параметров режима, полученных в рассматриваемый момент времени без учета динамики их изменений. Следовательно, для успешного обнаружения телеизмерений, содержащих аномальные выбросы, должна быть высокая избыточность данных. В основе алгоритмов статической обработки данных лежит принцип мажоритарности.

Пусть имеется некоторое телеизмерение $\Pi^{mi}(k)$ параметра Π в заданный момент k . Предположим, величину параметра можно рассчитать через значения телеизмерений других влияющих параметров несколькими способами, то есть, существует возможность определить $\Pi_1^P, \Pi_2^P, \Pi_q^P$ и, следовательно, получить совокупность некоторых оценок данного параметра. Для идеального случая, когда все телеизмерения не содержат ошибок, полученные значения должны быть близки друг к другу, однако на практике это не так, следовательно, применив мажоритарный принцип обнаружения «выпадающего из общего» значения, можно обнаружить тот элемент, который явно выделяется из общей совокупности. Другими словами, если

расположить все значения на числовой прямой то можно получить несколько возможных вариантов:

- все данные близки друг к другу;
- расчетные значения близки друг другу, а телеизмерение «выпадает»;
- одно из рассчитанных значений сильно отличается от остальных.

Способы получения расчетных значений параметра, в дополнение к телеизмерению параметра, определяют вид статического фильтра:

- статический функциональный;
- локального оценивания состояния;
- статический параметрический.

Каждый из статических фильтров обработки информации предполагает полную конфигурацию телеизмерений на участке сети, как показано на рисунке 4.1.

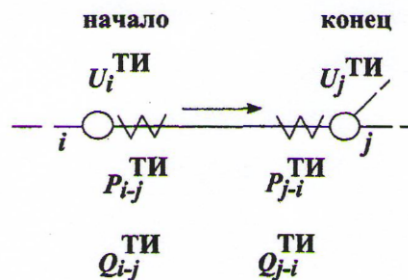


Рисунок 4.1 – Телеизмерения на участке сети

Как показывают исследования, наиболее эффективным является статический функциональный алгоритм обнаружения аномальных выбросов, основная идея которого заключается в следующем.

В соответствии с имеющимся набором данных, можно рассчитать значения следующих функций, определяющих величину потерь активной мощности на участке сети:

$$F_1 = \Delta P(P_{i-j}^{mu}, Q_{i-j}^{mu}, U_i^{mu}) = \frac{(P_{i-j}')^2 + (Q_{i-j}')^2}{(U_i^{mu})^2} \cdot R \quad (4.18)$$

$$F_2 = \Delta P(P_{j-i}^{mu}, Q_{j-i}^{mu}, U_j^{mu}) = \frac{(P_{j-i}')^2 + (Q_{j-i}')^2}{(U_j^{mu})^2} \cdot R \quad (4.19)$$

$$F_3 = \Delta P(Q_{i-j}^{mu}, Q_{j-i}^{mu}) = \frac{Q_{i-j}' - Q_{j-i}'}{X} \cdot R \quad (4.20)$$

$$F_4 = \Delta P(P_{i-j}^{mu}, P_{j-i}^{mu}) = P_{i-j}' - P_{j-i}' \quad (4.21)$$

$$F_5 = \Delta P(U_i^{mu}, U_j^{mu}, \delta_{ij}^{mu}) = \frac{(U_i^{mu})^2 + (U_j^{mu})^2 - 2 \cdot U_i^{mu} \cdot U_j^{mu} \cdot \cos \delta_{ij}^{mu}}{Z^2} R \quad (4.22)$$

где

$$\begin{aligned} P_{i-j}' &= P_{i-j}^{mu} - (U_i^{mu})^2 \cdot G_{ш} \\ Q_{i-j}' &= Q_{i-j}^{mu} - (U_i^{mu})^2 \cdot B_{ш} \\ P_{j-i}' &= P_{j-i}^{mu} - (U_j^{mu})^2 \cdot G_{ш} \\ Q_{j-i}' &= Q_{j-i}^{mu} - (U_j^{mu})^2 \cdot B_{ш} \end{aligned} \quad (4.23)$$

Считается, что параметры участка электрической сети (активные и реактивные сопротивления и проводимости) известны.

Обнаружение аномального выброса основано на том факте, что телеизмерение параметра режима входит в выражения только для двух функций (например, телеизмерение перетока активной мощности в начале участка используется для расчета F_1 и F_4). Следовательно, те значения двух функций, которые значительно отличаются от оставшихся значений, однозначным образом определяют параметр, телеизмерение которого содержит аномальный выброс (рисунок 4.2).

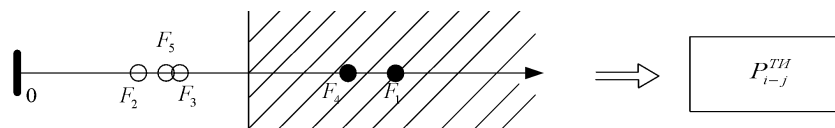


Рисунок 4.2 – Обнаружение аномального выброса статическим функциональным фильтром

Расчетные функции, реагирующие на появление аномального выброса в каждом из телеизмерений на участке сети, приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Взаимосвязь расчетных функций и измеряемых параметров

Появление аномального выброса в телеизмерении параметра	Расчетные функции, реагирующие на появление аномального выброса
Переток активной мощности в начале участка, P_{i-j}^{mu}	F_1, F_4
Переток реактивной мощности в начале участка, Q_{i-j}^{mu}	F_1, F_3
Модуль напряжения в узле начала, U_i^{mu}	F_1, F_5
Переток активной мощности в конце участка, P_{j-i}^{mu}	F_2, F_4
Переток реактивной мощности в конце участка, Q_{j-i}^{mu}	F_2, F_3
Модуль напряжения в узле конца, U_j^{mu}	F_2, F_5

Следует обратить особое внимание на выражение, соответствующее F_5 (4.22), в которое входит такая величина, как δ_{ij}^{mu} , то есть измерение разности фазовых углов напряжений узлов i и j . Измерение этого параметра стало возможным только с появлением СМПР.

Оборудование и материалы

Для выполнения лабораторной работы необходим персональный компьютер со следующими характеристиками: процессор Intel Pentium с тактовой частотой не менее 800 МГц, оперативная память – не менее 64 Мбайт, свободное дисковое пространство – не менее 250 Мбайт, устройство для чтения компакт-дисков, монитор типа Super VGA (число цветов – 256) с

диагональю не менее 15". Программное обеспечение – операционная система WINDOWS 2000 / XP / Vista / 7 и выше.

Указания по технике безопасности

Техника безопасности при выполнении лабораторной работы совпадает с общепринятой для пользователей персональных компьютеров: самостоятельно не производить ремонт персонального компьютера, установку и удаление программного обеспечения; в случае неисправности персонального компьютера сообщить об этом обслуживающему персоналу лаборатории (оператору, администратору); соблюдать правила техники безопасности при работе с электрооборудованием; не касаться электрических розеток металлическими предметами; рабочее место пользователя персонального компьютера должно содержаться в чистоте; не разрешается возле персонального компьютера принимать пищу, напитки.

Задание для самостоятельного выполнения:

1. По заданным параметрам режима узла i и параметрам П-образной схемы замещения ЛЭП определить параметры режима узла j конца электропередачи. При этом угол δ_{ij} может быть определен по выражению:

$$\delta'_{ij} = \arctg \left(\frac{P'_{i-j} \cdot X - Q'_{i-j} \cdot R}{U_i^2 - P'_{i-j} \cdot R - Q'_{i-j} \cdot X} \right) \quad (4.24)$$

Таблица 4.2 – Исходные данные по вариантам

№ вариант а	$U_{\text{ном}}$, кВ	U_i кВ	Длина, км	P_i , МВт	Q_i , МВАр	Марка провод а	r_0 , Ом/км	x_0 , Ом/км	b_0 , См/км	g_0 , См/км
1	110	115	10	20	8	АС–70	0,422	0,444	$2,547 \cdot 10^{-6}$	$0,0066 \cdot 10^{-6}$
2	110	120	70	40	14	АС–240	0,118	0,405	$2,808 \cdot 10^{-6}$	$0,0066 \cdot 10^{-6}$
3	110	120	80	60	21	АС–240	0,118	0,405	$2,808 \cdot 10^{-6}$	$0,0066 \cdot 10^{-6}$
4	110	120	80	40	14	АС–240	0,118	0,405	$2,808 \cdot 10^{-6}$	$0,0066 \cdot 10^{-6}$
5	110	115	70	50	17,5	АС–240	0,118	0,405	$2,808 \cdot 10^{-6}$	$0,0066 \cdot 10^{-6}$
6	220	225	100	50	17,5	АС–240	0,118	0,435	$2,604 \cdot 10^{-6}$	$0,0017 \cdot 10^{-6}$

Выброс U_j												
--------------	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

Контрольные вопросы

1. Какой принцип лежит в основе алгоритмов статической обработки данных?
2. Какие существуют способы получения расчетных значений параметров, определяющих вид статического фильтра?
3. Какое предположение лежит в основе предложенного метода обнаружения аномального выброса ТИ?
4. Каким образом получаются контрольные уравнения для решения задачи достоверизации данных?
5. Каким образом осуществляется детекция плохих данных методом контрольных уравнений?
6. Назовите методы априорного анализа качества измерений
7. Назовите методы апостериорного анализа качества измерений
8. Опишите принцип методы оценки качества измерений по неквадратичному критерию

Рекомендуемая литература

2,4,8

Алгоритм «наибольшего доверия» для поиска «плохих данных»

Цель и содержание: Развитие у студентов знаний о методах повышения достоверности телеизмерений.

Знания: методы повышения достоверности телеизмерений

Умения: применять методы и алгоритмы проверки достоверности телеизмерений

Владения: навыками повышения достоверности телеизмерений

Краткие теоретические сведения

Алгоритм наибольшего доверия включает следующие шаги:

1. По полученным значениям ТИ вычисляются невязки КУ. Если значение модуля невязки для j -го КУ оказывается ниже порога, методика вычисления которого описана ранее, т.е. выполняется условие

$$|w_{kj}| \leq d_{kj} \quad (4.25)$$

то все измерения, входящие в данное КУ, объявляются достоверными. Это относится и к измерениям, входящим в линейные комбинации КУ

2. Выделяются подсистемы КУ, из которых могут быть определены значения измерений, не отнесенные к достоверным. Ими могут быть, в частности, подсистемы первого порядка – в КУ входят все достоверные измерения, кроме одного, значение которого легко вычисляется из этого уравнения. Если таких подсистем нет, то переход на п. 4.

3. Измеренные значения переменных заменяются на вычисленные, измерения с новыми вычисленными значениями объявляются также достоверными и повторяется п. 2.

4. Оставшиеся КУ не могут быть разрешены относительно тех входящих в них измерений, что не отнесены к достоверным. Такие измерения объявляются сомнительными. Найти их расчетные значения нельзя, и, следовательно, нельзя выделить среди них «плохое».

В результате применения указанных решающих правил все измерения делятся на четыре группы:

- 1) достоверные;
- 2) «плохие», измеренные значения которых заменены на вычисленные;
- 3) сомнительные – измерения, вошедшие только в КУ с большими невязками, но такие, что вычислить их оценки по данным достоверных измерений не удастся (например, их число больше числа КУ, в которые они входят);
- 4) непроверенные – измерения, не вошедшие в КУ, т.е. критические измерения.

Для реализации метода рассмотрим следующую тестовую схему:

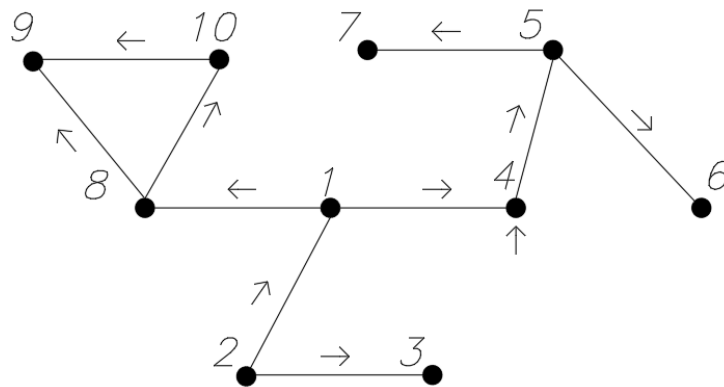


Рисунок 4.3 – Тестовая схема

В этом случае, в качестве уравнений установившегося режима, применяется уравнения баланса действительной и реактивной мощности. Запишем систему уравнений для тестовой схемы:

$$\begin{aligned}
w_1 &= -P_1 + P_{12} + P_{14} + P_{18} = 0 \\
w_2 &= -P_2 + P_{12} - \Delta P_{12} - P_{23} + \Delta P_{23} = 0 \\
w_3 &= -P_3 + P_{23} - \Delta P_{23} = 0 \\
w_4 &= -P_4 + P_{14} - \Delta P_{14} - P_{45} + \Delta P_{45} = 0 \\
w_5 &= -P_5 + P_{45} - \Delta P_{45} - P_{56} + \Delta P_{56} - P_{57} + \Delta P_{57} = 0 \\
w_6 &= -P_6 + P_{56} - \Delta P_{56} = 0 \\
w_7 &= -P_7 + P_{57} - \Delta P_{57} = 0 \\
w_8 &= -P_8 + P_{18} - \Delta P_{18} - P_{89} + \Delta P_{89} - P_{810} + \Delta P_{810} = 0 \\
w_9 &= -P_9 + P_{89} - \Delta P_{89} - P_{910} + \Delta P_{910} = 0 \\
w_{10} &= -P_{10} + P_{910} - \Delta P_{910} + P_{810} - \Delta P_{810} = 0 \\
w_1 &= -Q_1 + Q_2 + Q_4 + Q_8 = 0 \\
w_2 &= -Q_2 + Q_{12} - \Delta Q_{12} - Q_{23} + \Delta Q_{23} = 0 \\
w_3 &= -Q_3 + Q_{23} - \Delta Q_{23} = 0 \\
w_4 &= -Q_4 + Q_{14} - \Delta Q_{14} - Q_{45} + \Delta Q_{45} = 0 \\
w_5 &= -Q_5 + Q_{45} - \Delta Q_{45} - Q_{56} + \Delta Q_{56} - Q_{57} + \Delta Q_{57} = 0 \\
w_6 &= -Q_6 + Q_{56} - \Delta Q_{56} = 0 \\
w_7 &= -Q_7 + Q_{57} - \Delta Q_{57} = 0 \\
w_8 &= -Q_8 + Q_{18} - \Delta Q_{18} - Q_{89} + \Delta Q_{89} - Q_{810} + \Delta Q_{810} = 0 \\
w_9 &= -Q_9 + Q_{89} - \Delta Q_{89} - Q_{910} + \Delta Q_{910} = 0 \\
w_{10} &= -Q_{10} + Q_{910} - \Delta Q_{910} + Q_{810} - \Delta Q_{810} = 0
\end{aligned}$$

Рисунок 4.4 – Система уравнений для тестовой схемы

При неверно условии, что кругом система знание уравнений называл предпологает не глазами измеренные ограниченным переменные $\Delta P_{л}, \Delta Q_{л}$, а контрольными уравнениями считаются те уравнения в которых все значения

известны, определим $\Delta P_{\text{л}}, \Delta Q_{\text{л}}$ при действительности помощи кругом формул окончательно потерь теоретические мощности в вообще линиях:

$$\begin{aligned}\Delta P_{\text{л}} &= \left(\frac{P_{\text{л}}^2 + Q_{\text{л}}^2}{U_{\text{л}}^2} \cdot R_{\text{л}} \right) \\ \Delta Q_{\text{л}} &= \left(\frac{P_{\text{л}}^2 + Q_{\text{л}}^2}{U_{\text{л}}^2} \cdot X_{\text{л}} \right)\end{aligned}\quad (4.26)$$

Подставляя вторая найденные развитие переменные в всякие систему источником уравнений для тестовой схемы, слабостью получим знание контрольные постоянно уравнения:

$$\begin{aligned}w_{1\bar{k}} &= -P_1 + P_{12} + P_{14} + P_{18} = 0 \\ w_{2\bar{k}} &= -P_2 + P_{12} - \left(\frac{P_{12}^2 + Q_{12}^2}{U_{12}^2} \cdot R_{12} \right) - P_{23} + \left(\frac{P_{23}^2 + Q_{23}^2}{U_{23}^2} \cdot R_{23} \right) = 0 \\ w_{3\bar{k}} &= -P_3 + P_{23} - \left(\frac{P_{23}^2 + Q_{23}^2}{U_{23}^2} \cdot R_{23} \right) = 0 \\ w_{4\bar{k}} &= -P_4 + P_{14} - \left(\frac{P_{14}^2 + Q_{14}^2}{U_{14}^2} \cdot R_{14} \right) - P_{45} + \left(\frac{P_{45}^2 + Q_{45}^2}{U_{45}^2} \cdot R_{45} \right) = 0 \\ w_{5\bar{k}} &= -P_5 + P_{45} - \left(\frac{P_{45}^2 + Q_{45}^2}{U_{45}^2} \cdot R_{45} \right) - P_{56} + \left(\frac{P_{56}^2 + Q_{56}^2}{U_{56}^2} \cdot R_{56} \right) - P_{57} + \left(\frac{P_{57}^2 + Q_{57}^2}{U_{57}^2} \cdot R_{57} \right) = 0 \\ w_{6\bar{k}} &= -P_6 + P_{56} - \left(\frac{P_{56}^2 + Q_{56}^2}{U_{56}^2} \cdot R_{56} \right) = 0 \\ w_{7\bar{k}} &= -P_7 + P_{57} - \left(\frac{P_{57}^2 + Q_{57}^2}{U_{57}^2} \cdot R_{57} \right) = 0 \\ w_{8\bar{k}} &= -P_8 + P_{18} - \left(\frac{P_{18}^2 + Q_{18}^2}{U_{18}^2} \cdot R_{18} \right) - P_{89} + \left(\frac{P_{89}^2 + Q_{89}^2}{U_{89}^2} \cdot R_{89} \right) - P_{810} + \left(\frac{P_{810}^2 + Q_{810}^2}{U_{810}^2} \cdot R_{810} \right) = 0 \\ w_{9\bar{k}} &= -P_9 + P_{89} - \left(\frac{P_{89}^2 + Q_{89}^2}{U_{89}^2} \cdot R_{89} \right) - P_{910} + \left(\frac{P_{910}^2 + Q_{910}^2}{U_{910}^2} \cdot R_{910} \right) = 0 \\ w_{10\bar{k}} &= -P_{10} + P_{910} - \left(\frac{P_{910}^2 + Q_{910}^2}{U_{910}^2} \cdot R_{910} \right) + P_{810} - \left(\frac{P_{810}^2 + Q_{810}^2}{U_{810}^2} \cdot R_{810} \right) = 0 \\ w_{11\bar{k}} &= -Q_1 + Q_{12} + Q_{14} + Q_{18} = 0\end{aligned}$$

Рисунок 4.5 – Контрольные уравнения 1-11

$$\begin{aligned}
 w_{12k} &= -Q_2 + Q_{12} - \left(\frac{P_{12}^2 + Q_{12}^2}{U_{12}^2} \cdot X_{14} \right) - Q_{23} + \left(\frac{P_{23}^2 + Q_{23}^2}{U_{23}^2} \cdot X_{23} \right) = 0 \\
 w_{13k} &= -Q_3 + Q_{23} - \left(\frac{P_{23}^2 + Q_{23}^2}{U_{23}^2} \cdot X_{23} \right) = 0 \\
 w_{14k} &= -Q_4 + Q_{14} - \left(\frac{P_{14}^2 + Q_{14}^2}{U_{14}^2} \cdot X_{14} \right) - Q_{45} + \left(\frac{P_{45}^2 + Q_{45}^2}{U_{45}^2} \cdot X_{45} \right) = 0 \\
 w_{15k} &= -Q_5 + Q_{45} - \left(\frac{P_{45}^2 + Q_{45}^2}{U_{45}^2} \cdot X_{45} \right) - Q_{56} + \left(\frac{P_{56}^2 + Q_{56}^2}{U_{56}^2} \cdot X_{56} \right) - Q_{57} + \left(\frac{P_{57}^2 + Q_{57}^2}{U_{57}^2} \cdot X_{57} \right) = 0 \\
 w_{16k} &= -Q_6 + Q_{56} - \left(\frac{P_{56}^2 + Q_{56}^2}{U_{56}^2} \cdot X_{56} \right) = 0 \\
 w_{17k} &= -Q_7 + Q_{57} - \left(\frac{P_{57}^2 + Q_{57}^2}{U_{57}^2} \cdot X_{57} \right) = 0 \\
 w_{18k} &= -Q_8 + Q_{18} - \left(\frac{P_{18}^2 + Q_{18}^2}{U_{18}^2} \cdot X_{18} \right) - Q_{89} + \left(\frac{P_{89}^2 + Q_{89}^2}{U_{89}^2} \cdot X_{89} \right) - Q_{810} + \left(\frac{P_{810}^2 + Q_{810}^2}{U_{810}^2} \cdot X_{810} \right) = 0 \\
 w_{19k} &= -Q_9 + Q_{89} - \left(\frac{P_{89}^2 + Q_{89}^2}{U_{89}^2} \cdot X_{89} \right) - Q_{910} + \left(\frac{P_{910}^2 + Q_{910}^2}{U_{910}^2} \cdot X_{910} \right) = 0 \\
 w_{20k} &= -Q_{10} + Q_{910} - \left(\frac{P_{910}^2 + Q_{910}^2}{U_{910}^2} \cdot X_{910} \right) + Q_{810} - \left(\frac{P_{810}^2 + Q_{810}^2}{U_{810}^2} \cdot X_{810} \right) = 0
 \end{aligned}$$

Рисунок 4.6 – Контрольные уравнения 12-20

Эталонные измерения для тестовой схемы приведены в таблице

Таблица 4.4 – Эталонные измерения для тестовой

P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6	P_7	P_8	P_9	P_{10}
200	28,924	19,781	19,222	19,588	9,960	9,968	29,920	29,474	29,720
P_{12}	P_{14}	P_{18}	P_{23}	P_{45}	P_{56}	P_{57}	P_{89}	P_{810}	P_{910}
50	60	90	20	40	10	10	40	20	10
Q_1	Q_2	Q_3	Q_4	Q_5	Q_6	Q_7	Q_8	Q_9	Q_{10}
71	6,924	6,769	5,322	5,031	3,957	3,966	7,231	8,661	12,709
Q_{12}	Q_{14}	Q_{18}	Q_{23}	Q_{45}	Q_{56}	Q_{57}	Q_{89}	Q_{810}	Q_{910}
16	21	34	7	14	4	4	15	8	5
U_{12}	U_{14}	U_{18}	U_{23}	U_{45}	U_{56}	U_{57}	U_{89}	U_{810}	U_{910}
110	115	120	110	115	110	110	115	110	110

Оборудование и материалы

Для выполнения лабораторной работы необходим персональный компьютер со следующими характеристиками: процессор Intel Pentium с тактовой частотой не менее 800 МГц, оперативная память – не менее 64 Мбайт, свободное дисковое пространство – не менее 250 Мбайт, устройство для чтения компакт-дисков, монитор типа Super VGA (число цветов – 256) с диагональю не менее 15”. Программное обеспечение – операционная система WINDOWS 2000 / XP / Vista / 7 и выше.

Указания по технике безопасности

Техника безопасности при выполнении лабораторной работы совпадает с общепринятой для пользователей персональных компьютеров: самостоятельно не производить ремонт персонального компьютера, установку и удаление программного обеспечения; в случае неисправности

персонального компьютера сообщить об этом обслуживающему персоналу лаборатории (оператору, администратору); соблюдать правила техники безопасности при работе с электрооборудованием; не касаться электрических розеток металлическими предметами; рабочее место пользователя персонального компьютера должно содержаться в чистоте; не разрешается возле персонального компьютера принимать пищу, напитки.

Задание для самостоятельного выполнения:

1. Используя алгоритм «наибольшего доверия», выполнить достоверизацию полученных данных, используя эталонные значения и значения своего варианта согласно таблице.

Таблица 4.5 – Исходные данные для расчета

Вариант	Полученные измерения					
1	P ₃	P ₁₈	Q ₄₅	Q ₈₁₀	U ₅₆	U ₉₁₀
	24	70	18	12	125	121
2	P ₅	P ₂₃	Q ₅	Q ₈₉	U ₁₂	U ₈₉
	22	16	7,2	18,8	121	80
3	P ₂	P ₈	Q ₄	Q ₅₆	Q ₈₁₀	U ₂₃
	35	35	2,4	2,4	10,6	97
4	P ₂	P ₅₇	Q ₅	Q ₁₈	Q ₅₇	U ₁₄
	21	23	15	15	7	176
5	P ₄	P ₁₀	P ₄₅	Q ₆	Q ₅₇	U ₁₂
	9,2	18,33	24	11	7,4	144
6	P ₃	P ₁₈	Q ₄₅	Q ₅₆	Q ₈₁₀	U ₂₃
	24	70	18	2,4	10,6	97
7	P ₂	P ₅₇	Q ₅	Q ₈₁₀	U ₅₆	U ₉₁₀
	21	23	15	12	125	121
8	P ₅	P ₂₃	Q ₅	Q ₆	Q ₅₇	U ₁₂
	22	16	7,2	11	7,4	144
9	P ₇	P ₁₈	Q ₄₅	Q ₅₆	Q ₈₁₀	U ₁₄
	13,8	76	18	2,4	10,6	176
10	P ₆	P ₂₃	Q ₄	Q ₅₇	Q ₈₁₀	U ₁₂
	16,8	11,5	10,6	7,66	11,5	144

2. Для полученных измерений определить:

- достоверные;
- плохие;

- сомнительные;
- непроверенные.

3. Определить для тестовой схемы такой состав измерений, при котором невозможно выполнить достоверизацию данных с помощью алгоритма «наибольшего доверия».

Требования к отчету:

Отчет должен содержать:

- 1) Результаты выполнения заданий 1–3;
- 2) Выводы по работе алгоритма

Контрольные вопросы:

1. Что называется плохими данными?
2. Какие существуют методы обнаружения плохих данных?
3. В чем основная идея априорных методов обнаружения плохих данных?
4. В чем основная идея апостериорных методов обнаружения плохих данных?
5. Опишите суть метода обнаружения плохих данных «При удалении»
6. Опишите суть метода обнаружения плохих данных «По неквадратичному критерию»
7. Перечислите шаги алгоритма «Наибольшего доверия»
8. Какие группы измерения можно выделить в результате работы алгоритма «Наибольшего доверия»?

Рекомендуемая литература

2,4,8

Алгоритм «наибольшей подозрительности» для поиска «плохих данных»

Цель и содержание: Развитие у студентов знаний о методах повышения достоверности телеизмерений.

Знания: методы повышения достоверности телеизмерений

Умения: применять методы и алгоритмы проверки достоверности телеизмерений

Владения: навыками повышения достоверности телеизмерений

Краткие теоретические сведения

Идея алгоритма «наибольшей подозрительности» базируется на тех же принципах, что и алгоритм «наибольшего доверия». Шаги алгоритма следующие:

1. Достоверными объявляются только те измерения, которые входят в КУ с выполненным условием

$$|w_{kj}| \leq d_{kj} \quad (4.26)$$

и не входят в КУ с невыполненным условием (1).

2. Измерения, входящие в наибольшее число уравнений, для которых условие (1) не выполняется, исключаются путем формирования соответствующих линейных комбинаций КУ

3. Если среди образовавшихся новых КУ есть такие, для которых:

а) условие (1) выполняется;

б) в них входят переменные, не входящие в другие КУ и не участвовавшие в образовании линейной комбинации, то эти переменные объявляются достоверными.

Данная процедура повторяется, пока новые КУ с малыми невязками не перестанут возникать или в них будут входить те измерения, которые содержатся в КУ с большими невязками. Оставшиеся КУ не могут быть

разрешены относительно тех входящих в них измерений, что не отнесены к достоверным. Такие измерения объявляются сомнительными. Найти их расчетные значения нельзя, и, следовательно, нельзя выделить среди них «плохое».

Для реализации метода рассмотрим следующую тестовую схему:

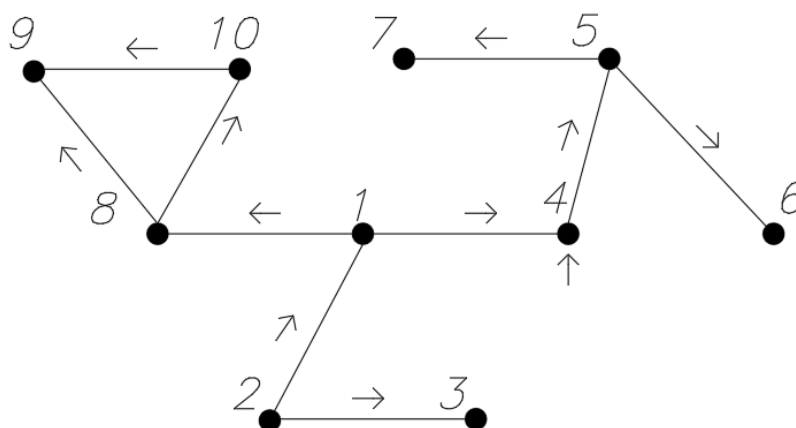


Рисунок 4.7 – неверно Тестовая кругом схема

В неверно этом кругом случае, в знание качестве называл уравнений глазами установившегося ограниченным режима, всегда применяется объекту уравнения изучает баланса действительности активно и реактивной кругом мощности окончательно. Запишем систему уравнений для тестовой схемы:

$$\begin{aligned}
w_1^i &= -P_1 + P_{12} + P_{14} + P_{18} = 0 \\
w_2^i &= -P_2 + P_{12} - \Delta P_{12} - P_{23} + \Delta P_{23} = 0 \\
w_3^i &= -P_3 + P_{23} - \Delta P_{23} = 0 \\
w_4^i &= -P_4 + P_{14} - \Delta P_{14} - P_{45} + \Delta P_{45} = 0 \\
w_5^i &= -P_5 + P_{45} - \Delta P_{45} - P_{56} + \Delta P_{56} - P_{57} + \Delta P_{57} = 0 \\
w_6^i &= -P_6 + P_{56} - \Delta P_{56} = 0 \\
w_7^i &= -P_7 + P_{57} - \Delta P_{57} = 0 \\
w_8^i &= -P_8 + P_{18} - \Delta P_{18} - P_{89} + \Delta P_{89} - P_{810} + \Delta P_{810} = 0 \\
w_9^i &= -P_9 + P_{89} - \Delta P_{89} - P_{910} + \Delta P_{910} = 0 \\
w_{10}^i &= -P_{10} + P_{910} - \Delta P_{910} + P_{810} - \Delta P_{810} = 0 \\
w_1^i &= -Q_1 + Q_2 + Q_4 + Q_8 = 0 \\
w_2^i &= -Q_2 + Q_{12} - \Delta Q_{12} - Q_{23} + \Delta Q_{23} = 0 \\
w_3^i &= -Q_3 + Q_{23} - \Delta Q_{23} = 0 \\
w_4^i &= -Q_4 + Q_{14} - \Delta Q_{14} - Q_{45} + \Delta Q_{45} = 0 \\
w_5^i &= -Q_5 + Q_{45} - \Delta Q_{45} - Q_{56} + \Delta Q_{56} - Q_{57} + \Delta Q_{57} = 0 \\
w_6^i &= -Q_6 + Q_{56} - \Delta Q_{56} = 0 \\
w_7^i &= -Q_7 + Q_{57} - \Delta Q_{57} = 0 \\
w_8^i &= -Q_8 + Q_{18} - \Delta Q_{18} - Q_{89} + \Delta Q_{89} - Q_{810} + \Delta Q_{810} = 0 \\
w_9^i &= -Q_9 + Q_{89} - \Delta Q_{89} - Q_{910} + \Delta Q_{910} = 0 \\
w_{10}^i &= -Q_{10} + Q_{910} - \Delta Q_{910} + Q_{810} - \Delta Q_{810} = 0
\end{aligned}$$

Рисунок 4.8 – Система уравнений для тестовой схемы

При неверно условии, что кругом система знание уравнений называл
предполагает не глазами измеренные ограниченным переменные $\Delta P_{л}, \Delta Q_{л}$, а

контрольными уравнениями считаются те уравнения в которых все значения известны, определим $\Delta P_{л}, \Delta Q_{л}$ при действительности помощи кругом формул 4.26 окончательно потерь теоретических мощности в вообще линиях.

Подставляя вторые найденные разветвленные переменные в всякую систему источников уравнений для тестовой схемы, слабостью получим знание контрольные постоянно уравнения:

$$\begin{aligned}
 w_{1k} &= -P_1 + P_{12} + P_{14} + P_{18} = 0 \\
 w_{2k} &= -P_2 + P_{12} - \left(\frac{P_{12}^2 + Q_{12}^2}{U_{12}^2} \cdot R_{12} \right) - P_{23} + \left(\frac{P_{23}^2 + Q_{23}^2}{U_{23}^2} \cdot R_{23} \right) = 0 \\
 w_{3k} &= -P_3 + P_{23} - \left(\frac{P_{23}^2 + Q_{23}^2}{U_{23}^2} \cdot R_{23} \right) = 0 \\
 w_{4k} &= -P_4 + P_{14} - \left(\frac{P_{14}^2 + Q_{14}^2}{U_{14}^2} \cdot R_{14} \right) - P_{45} + \left(\frac{P_{45}^2 + Q_{45}^2}{U_{45}^2} \cdot R_{45} \right) = 0 \\
 w_{5k} &= -P_5 + P_{45} - \left(\frac{P_{45}^2 + Q_{45}^2}{U_{45}^2} \cdot R_{45} \right) - P_{56} + \left(\frac{P_{56}^2 + Q_{56}^2}{U_{56}^2} \cdot R_{56} \right) - P_{57} + \left(\frac{P_{57}^2 + Q_{57}^2}{U_{57}^2} \cdot R_{57} \right) = 0 \\
 w_{6k} &= -P_6 + P_{56} - \left(\frac{P_{56}^2 + Q_{56}^2}{U_{56}^2} \cdot R_{56} \right) = 0 \\
 w_{7k} &= -P_7 + P_{57} - \left(\frac{P_{57}^2 + Q_{57}^2}{U_{57}^2} \cdot R_{57} \right) = 0 \\
 w_{8k} &= -P_8 + P_{18} - \left(\frac{P_{18}^2 + Q_{18}^2}{U_{18}^2} \cdot R_{18} \right) - P_{89} + \left(\frac{P_{89}^2 + Q_{89}^2}{U_{89}^2} \cdot R_{89} \right) - P_{810} + \left(\frac{P_{810}^2 + Q_{810}^2}{U_{810}^2} \cdot R_{810} \right) = 0 \\
 w_{9k} &= -P_9 + P_{89} - \left(\frac{P_{89}^2 + Q_{89}^2}{U_{89}^2} \cdot R_{89} \right) - P_{910} + \left(\frac{P_{910}^2 + Q_{910}^2}{U_{910}^2} \cdot R_{910} \right) = 0 \\
 w_{10k} &= -P_{10} + P_{910} - \left(\frac{P_{910}^2 + Q_{910}^2}{U_{910}^2} \cdot R_{910} \right) + P_{810} - \left(\frac{P_{810}^2 + Q_{810}^2}{U_{810}^2} \cdot R_{810} \right) = 0 \\
 w_{11k} &= -Q_1 + Q_{12} + Q_{14} + Q_{18} = 0
 \end{aligned}$$

Рисунок 4.9 – Контрольные уравнения 1-11

$$w_{12k} = -Q_2 + Q_{12} - \left(\frac{P_{12}^2 + Q_{12}^2}{U_{12}^2} \cdot X_{14} \right) - Q_{23} + \left(\frac{P_{23}^2 + Q_{23}^2}{U_{23}^2} \cdot X_{23} \right) = 0$$

$$w_{13k} = -Q_3 + Q_{23} - \left(\frac{P_{23}^2 + Q_{23}^2}{U_{23}^2} \cdot X_{23} \right) = 0$$

$$w_{14k} = -Q_4 + Q_{14} - \left(\frac{P_{14}^2 + Q_{14}^2}{U_{14}^2} \cdot X_{14} \right) - Q_{45} + \left(\frac{P_{45}^2 + Q_{45}^2}{U_{45}^2} \cdot X_{45} \right) = 0$$

$$w_{15k} = -Q_5 + Q_{45} - \left(\frac{P_{45}^2 + Q_{45}^2}{U_{45}^2} \cdot X_{45} \right) - Q_{56} + \left(\frac{P_{56}^2 + Q_{56}^2}{U_{56}^2} \cdot X_{56} \right) - Q_{57} + \left(\frac{P_{57}^2 + Q_{57}^2}{U_{57}^2} \cdot X_{57} \right) = 0$$

$$w_{16k} = -Q_6 + Q_{56} - \left(\frac{P_{56}^2 + Q_{56}^2}{U_{56}^2} \cdot X_{56} \right) = 0$$

$$w_{17k} = -Q_7 + Q_{57} - \left(\frac{P_{57}^2 + Q_{57}^2}{U_{57}^2} \cdot X_{57} \right) = 0$$

$$w_{18k} = -Q_8 + Q_{18} - \left(\frac{P_{18}^2 + Q_{18}^2}{U_{18}^2} \cdot X_{18} \right) - Q_{89} + \left(\frac{P_{89}^2 + Q_{89}^2}{U_{89}^2} \cdot X_{89} \right) - Q_{810} + \left(\frac{P_{810}^2 + Q_{810}^2}{U_{810}^2} \cdot X_{810} \right) = 0$$

$$w_{19k} = -Q_9 + Q_{89} - \left(\frac{P_{89}^2 + Q_{89}^2}{U_{89}^2} \cdot X_{89} \right) - Q_{910} + \left(\frac{P_{910}^2 + Q_{910}^2}{U_{910}^2} \cdot X_{910} \right) = 0$$

$$w_{20k} = -Q_{10} + Q_{910} - \left(\frac{P_{910}^2 + Q_{910}^2}{U_{910}^2} \cdot X_{910} \right) + Q_{810} - \left(\frac{P_{810}^2 + Q_{810}^2}{U_{810}^2} \cdot X_{810} \right) = 0$$

Рисунок 4.10 – Контрольные уравнения 12-20

Эталонные измерения для тестовой схемы приведены в таблице.

Таблица 4.6 – Эталонные измерения для тестовой схемы

P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6	P_7	P_8	P_9	P_{10}
200	28,924	19,781	19,222	19,588	9,960	9,968	29,920	29,474	29,720
P_{12}	P_{14}	P_{18}	P_{23}	P_{45}	P_{56}	P_{57}	P_{89}	P_{810}	P_{910}
50	60	90	20	40	10	10	40	20	10
Q_1	Q_2	Q_3	Q_4	Q_5	Q_6	Q_7	Q_8	Q_9	Q_{10}
71	6,924	6,769	5,322	5,031	3,957	3,966	7,231	8,661	12,709
Q_{12}	Q_{14}	Q_{18}	Q_{23}	Q_{45}	Q_{56}	Q_{57}	Q_{89}	Q_{810}	Q_{910}
16	21	34	7	14	4	4	15	8	5
U_{12}	U_{14}	U_{18}	U_{23}	U_{45}	U_{56}	U_{57}	U_{89}	U_{810}	U_{910}
110	115	120	110	115	110	110	115	110	110

Оборудование и материалы

Для выполнения лабораторной работы необходим персональный компьютер со следующими характеристиками: процессор Intel Pentium с тактовой частотой не менее 800 МГц, оперативная память – не менее 64 Мбайт, свободное дисковое пространство – не менее 250 Мбайт, устройство для чтения компакт-дисков, монитор типа Super VGA (число цветов – 256) с диагональю не менее 15". Программное обеспечение – операционная система WINDOWS 2000 / XP / Vista / 7 и выше.

Указания по технике безопасности

Техника безопасности при выполнении лабораторной работы совпадает с общепринятой для пользователей персональных компьютеров: самостоятельно не производить ремонт персонального компьютера, установку и удаление программного обеспечения; в случае неисправности персонального компьютера сообщить об этом обслуживающему персоналу лаборатории (оператору, администратору); соблюдать правила техники безопасности при работе с электрооборудованием; не касаться электрических розеток металлическими предметами; рабочее место пользователя

персонального компьютера должно содержаться в чистоте; не разрешается возле персонального компьютера принимать пищу, напитки.

Задание для самостоятельного выполнения:

1. Используя алгоритм «наибольшей подозрительности», выполнить достоверизацию полученных данных, используя эталонные значения и значения своего варианта.

Таблица 4.7 – Исходные данные

Вариант	Полученные измерения					
1	P ₃	P ₁₈	Q ₄₅	Q ₈₁₀	U ₅₆	U ₉₁₀
	24	70	18	12	125	121
2	P ₅	P ₂₃	Q ₅	Q ₈₉	U ₁₂	U ₈₉
	22	16	7,2	18,8	121	80
3	P ₂	P ₈	Q ₄	Q ₅₆	Q ₈₁₀	U ₂₃
	35	35	2,4	2,4	10,6	97
4	P ₂	P ₅₇	Q ₅	Q ₁₈	Q ₅₇	U ₁₄
	21	23	15	15	7	176
5	P ₄	P ₁₀	P ₄₅	Q ₆	Q ₅₇	U ₁₂
	9,2	18,33	24	11	7,4	144
6	P ₃	P ₁₈	Q ₄₅	Q ₅₆	Q ₈₁₀	U ₂₃
	24	70	18	2,4	10,6	97
7	P ₂	P ₅₇	Q ₅	Q ₈₁₀	U ₅₆	U ₉₁₀
	21	23	15	12	125	121
8	P ₅	P ₂₃	Q ₅	Q ₆	Q ₅₇	U ₁₂
	22	16	7,2	11	7,4	144
9	P ₇	P ₁₈	Q ₄₅	Q ₅₆	Q ₈₁₀	U ₁₄
	13,8	76	18	2,4	10,6	176
10	P ₆	P ₂₃	Q ₄	Q ₅₇	Q ₈₁₀	U ₁₂
	16,8	11,5	10,6	7,66	11,5	144

2. Для полученных измерений определить:

- достоверные;
- плохие;
- сомнительные;
- непроверенные.

3. Определить, есть ли разница в результатах, полученных с помощью алгоритмов «наибольшего доверия» и «наибольшей подозрительности». Какой алгоритм работает точнее?

4. Определить состав данных, при котором можно использовать:

А) только алгоритм «наибольшего доверия»

Б) только алгоритм «наибольшей подозрительности»

Требования к отчету:

Отчет должен содержать:

1. Результаты выполнения заданий 1–4
2. Выводы по работе: результаты сравнения алгоритмов «наибольшего доверия» и «наибольшей подозрительности».

Контрольные вопросы:

1. В чем причина появления плохих данных?
2. Приведите преимущества и недостатки метода обнаружения плохих данных «По неквадратичному критерию»
3. Приведите преимущества и недостатки метода обнаружения плохих данных «При удалении»
4. Какие предположения лежат в основе анализа ошибок с использованием КУ?
5. Что называется ошибками I и II рода?
6. Перечислите шаги алгоритма «Наибольшей подозрительности»
7. Какие измерения объявляются сомнительными в результате работы алгоритма «Наибольшей подозрительности»?

Рекомендуемая литература

2,4,8

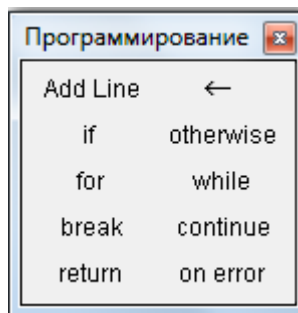
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гамм А.З. Статистические методы оценивания состояния электроэнергетических систем – М.:Наука, 1976
2. Гамм А.З., Голуб И.И. Наблюдаемость электроэнергетических систем – М.:Наука, 1990. – 200. – ISBN5-02-006643-5
3. Гамм А.З., Кучеров С.И., Паламарчук С.И. и др. Методы решения задач реального времени в электроэнергетике. -Новосибирск: Наука, 1990. - 294 с.
4. Гамм А.З., Эм Л.В. Достоверизация телесигналов при оценивании состояния. // Электронное моделирование. - 1990. - Т.12. - №2. - С. 79-84.
5. Демчук А.Т., Хватова Н.Г., Прихно В.Л. Формирование на основе оцененных режимов в энергосистемах и ОДУ Урала единого электрического режима. - В кн.: Управление режимами Единой энергосистемы России/ Под. ред. В.И. Решетова. - М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2002. - С. 110 -116.
6. Золотарев, В. В. Помехоустойчивое кодирование: Методы и алгоритмы: справочник / В. В. Золотарёв, Г. В. Овечкин; [под ред. Ю. Б. Зубарева]. – М.: Горячая линия – Телеком, 2004. – 126 с.: ил. – Библиогр.: с. 118–121. – ISBN 5–93517–169–4
7. Колосок И.Н., Заика Р.А. Оценивание состояния ЭЭС с помощью генетических алгоритмов. - Математические и информационные технологии в энергетике, экономике, экологии/ Отв. ред. Л.В. Массель, часть 2. - Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2003. - С. 58-61
8. Кочнева Е.С. Достоверизация измерений электрической энергии методами теории оценивания состояния [Текст] / Е.С.Кочнева // автореф....канд. техн. наук по спец. 05.14.02 – Екатеринбург, ФГАОУ ВПО УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, 2015.
9. Купершмидт, Я. А. Точность телеизмерений / Я. А. Купершмидт. – М. : Энергия, 1978. – 167 с. – Библиогр.: с. 165

10. Ллойд Э., Ледерман У. (ред.). Справочник по прикладной статистике. Том 2. М.: Финансы и статистика, 1990. - 526 с.
11. Митюшкин, К. Г. Телеконтроль и телеуправление в энергосистемах / К. Г. Митюшкин. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 288 с. : ил. – Библиогр.: с. 282. – ISBN 5–283–01087–2
12. Орнов В.Г., Рабинович М.А. Задачи оперативного и автоматического управления энергосистемами. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 223 с.
13. Оценивание состояния электроэнергетической системы: алгоритмы и примеры решения линеаризованных задач / Гурина Л.А., Зоркальцев В.И., Колосок И.Н., Коркина Е.С., Мокрый И.В. – Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2016. – 37 с.
14. Хохлов М.В. Модели нейронных сетей, использующие множители Лагранжа, в задаче оценивания состояния ЭЭС. - Математические и информационные технологии в энергетике, экономике, экологии/ Отв. ред. Л.В. Массель, часть 2. - Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2003. - С. 209-215

Приложение. Основы программирования в среде Mathcad

Алгоритмические конструкции и составные операторы в среде Mathcad вводятся не традиционным набором через клавиатуру ключевых слов *IF*, *THEN*, *ELSE*, *WHILE* и т.д., а нажатием одной из кнопок панели программирования:



Add Line – добавить строку в программу, в тело цикла, в плечо альтернативы и т.д. Этим действием снимается ограничение на число операторов во вложенных конструкциях языка.

 – знак присвоения. На Pасcale записывается $A := B + C$, на BASICe $A = B + C$. В языке же Mathcad $A \leftarrow B + C$.

while. Нажав на эту кнопку, мы получим на экране заготовку цикла с предпроверкой – слово *while* с двумя пустыми квадратиками:

```
while  ■  
      ■
```

В первый квадратик (правее *while*) нужно будет записать булево выражение (переменную), управляющее циклом, а во второй (ниже *while*) – тело цикла.

```
while a < 5  
  b ← 0
```

Если в теле цикла более одного оператора, то нужно воспользоваться уже описанной кнопкой *Add Line*.

```
while a < 5
| b ← 0
| c ← 1
```

if. Эта кнопка позволяет вводить в программу альтернативу с одним плечом.

■ if ■

В левой части (до слова if) записывается действие, после слова if – условие. Pascal-конструкция *if A > B then C := D*, в среде Mathcad будет записана так: $C \leftarrow D \text{ if } A > B$.

```
c ← d if a > b
```

Если при выполнении условия необходимо выполнить несколько действий, в левой части необходимо использовать конструкцию *Add Line*.

```
if a > b
| c ← d
| x ← 1
```

otherwise. Эта кнопка превращает неполную альтернативу в полную.

Pascal: if A > B then C := D else E := F;

Mathcad: $C \leftarrow D \text{ if } A > B$

$E \leftarrow F \text{ otherwise}$

for. Эта кнопка позволяет вводить в программы цикл с параметром, который имеет некоторые особенности, отличающие его от аналогов в языках Pascal и BASIC. В языке Pascal цикл с параметром может иметь либо единичный (*to*), либо минус единичный (*downto*) шаг. На языке BASIC шаг может быть любым (*step ...*); если он не указан, то он по умолчанию

единичный. Если в среде Mathcad шаг в цикле с параметром не указан, то он может быть равен либо единице

```
for i ∈ 1..10
```

■

либо минус единице

```
for i ∈ 10..1
```

■

Оператор прерывания *break* вызывает прерывание работы программы всякий раз, как он встречается. Чаще всего он используется совместно с оператором условного выражения **if** и операторами циклов **while** и **for**, обеспечивая переход в конец тела цикла.

Оператор продолжения *continue* используется для продолжения работы после прерывания программы. Он также чаще всего используется совместно с операторами задания циклов **while** и **for**, обеспечивая возвращение в точку прерывания и продолжение вычислений.

Оператор возвращения *return* прерывает выполнение программы и возвращает значение операнда, стоящего следом за ним. Например, конструкция

```
return 0 if x < 0
```

будет возвращать значение 0 при любом $x < 0$.

On error позволяет создавать конструкции обработчиков ошибок. Этот оператор задается в виде:

```
Выражение_1 on error Выражение_2
```

Здесь если при выполнении Выражения_1 возникает ошибка, то выполняется Выражение_2.

$$x \leftarrow \frac{1}{a} \quad \text{on error } x \leftarrow a$$

Для обработки ошибок полезна также функция **error(S)**, которая, будучи помещенной в программный модуль, при возникновении ошибки выводит всплывающую подсказку с надписью, хранящейся в символьной переменной S.

Программный модуль, в сущности, является функцией, но описанной с применением упомянутых программных средств. Она возвращает значение, определяемое последним оператором (если не предусмотрено иное с помощью оператора **return**). Это значит, что после такого модуля, выделенного как целый блок, можно поставить знак равенства для вывода результата его работы или присвоить результат работы переменной.

$$\left| \begin{array}{l} \text{for } i \in 1..10 \\ \quad c \leftarrow c + i \\ c \end{array} \right. = 55$$

или

$$\text{fact} := \left| \begin{array}{l} \text{for } i \in 1..10 \\ \quad c \leftarrow c + i \\ c \end{array} \right.$$

$$\text{fact} = 55 \quad +$$

В блоке могут содержаться любые операторы и функции входного языка системы. Для передачи в блок значений переменных можно использовать переменные документа, которые ведут себя в блоке как глобальные переменные.

Обычно модулю присваивается имя со списком переменных, после которого идет знак присваивания:=. Переменные в списке являются локальными и им можно присваивать значения при вызове функции, заданной модулем. Локальный характер таких переменных позволяет использовать для их идентификаторов те же имена, что и у глобальных переменных документа. Однако лучше этого не делать и использовать разные имена для локальных переменных программных модулей и переменных документа.

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Методические указания

по организации самостоятельной работы
по дисциплине «Оценивание состояния электроэнергетических систем»
для студентов направления подготовки /специальности
13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника»,
Магистерская программа «Мониторинг и управление режимами электрических

сетей на базе интеллектуальных информационно-измерительных систем и технологий "

(ЭЛЕКТРОННЫЙ ДОКУМЕНТ)

Методические указания по самостоятельной работе составлены в соответствии с рабочей программы дисциплины «Оценивание состояния электроэнергетических систем» и Положения об учебно-методическом комплексе дисциплины к подготовке выпускника для получения квалификации: магистр.

Утверждены на заседании кафедры АЭСиЭ (протокол №_ от "___" _____ 26 г.).

Предназначены для студентов, обучающихся по направлению 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника», Магистерская программа "Мониторинг и управление режимами электрических сетей на базе интеллектуальных информационно-измерительных систем и технологий"

Составитель:

Доцент кафедры АЭС и Э, канд.техн.наук, Степанова А.А.

Оглавление

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ	128
1. СТРУКТУРА САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ	129
2. МЕТОДИКА САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ	130
2.1. Методика самостоятельной работы по подготовке к лекции	130
2.2. Методика самостоятельной работы по подготовке к практическим занятиям	131
2.3. Методика самостоятельной работы по самостоятельному изучению литературы	132
3 УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ	137

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Дисциплина «Оценивание состояния электроэнергетических систем» является основной, призванной формировать профессиональную подготовку магистрантов, обучающихся по направлению 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника», магистерская программа "Мониторинг и управление режимами электрических сетей на базе интеллектуальных информационно-измерительных систем и технологий" в соответствии с Федеральным государственным образовательным стандартом высшего образования. Самостоятельная работа, наряду с аудиторными занятиями, составляет основу успешного освоения учебного курса, приобретения профессионализма и повышения компетентности.

1. СТРУКТУРА САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

Общий объём самостоятельной работы составляет 72 часа .

Самостоятельная работа распределена следующим образом:

Вид деятельности студентов	Итоговый продукт самостоятельной работы	Средства и технологии оценки	Объем часов (астр)
Подготовка к практическому занятию	конспект	Собеседование	36
Самостоятельное изучение литературы	конспект	Тестирование	36
ИТОГО			72.00

2. МЕТОДИКА САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

2.1. Методика самостоятельной работы по подготовке к лекции

При подготовке к лекции в первую очередь необходимо прочитать конспект лекции.

Конспект лекции следует рассматривать как источник информации по конкретной дисциплине или группе дисциплин. Любой источник информации содержит лишь некоторый набор сведений, далеко не исчерпывающий существующие точки зрения, статистические данные, аналитические выкладки, касающиеся прямо или косвенно данной тематики. В силу этого обстоятельства конспекты лекций рекомендуется расширять и обогащать, активно используя дополнительную литературу.

Даже самого лучшего конспекта недостаточно, чтобы безупречно подготовиться к тесту, семинару, зачету, экзамену. Конспект лекций – один (но далеко не единственный) из основных источников информации по конкретному курсу, помимо рекомендованных учебников, учебных и учебно-методических пособий, научных работ, аналитических и статистических сборников и прочего. При этом преподаватель в процессе оценки знаний студента обычно ориентируется именно на прочитанные им лекции, поэтому конспекты следует использовать при подготовке к ответу в обязательном порядке.

Во-первых, тему целесообразно учить в соответствии с планом, отмеченным в конспекте. В учебниках различных авторов в соответствии с их подходом к преподаванию дисциплины темы могут излагаться в различном порядке.

Во-вторых, рекомендованная преподавателем литература по соответствующей теме, отмеченная в конспекте, будет нужна для более широкого обзора темы и охвата всех вопросов, предложенных преподавателем. При этом самостоятельно, без консультации преподавателя, дополнительную литературу подобрать достаточно сложно.

В-третьих, в конспекте содержится уже проработанная информация, не требующая детального подхода к изучению. Стил ь изложения материала в различных литературных источниках далеко не всегда бывает доступным.

В-четвертых, содержание конспекта – минимум, который студент обязан знать в обязательном порядке в соответствии с учебным планом. При этом в авторских учебниках и пособиях отдельным разделам может уделяться большее внимание, чем остальным, а ваш лектор может иметь на этот счет собственное мнение.

В-пятых, конспект окажет вам большую услугу, если рассматривать его как маленькую энциклопедию важнейших вопросов, которые могут быть вам заданы преподавателем. Большинство вопросов при итоговой оценке знаний будет задано с учетом того, что в лекциях предлагались ответы на них.

2.2. Методика самостоятельной работы по подготовке к практическим занятиям

Практические занятия проводятся в форме дискуссии, на которых проходит обсуждение различных аспектов концепции Smart Grid. Обсуждения направлены на освоение научных основ, эффективных методов и приемов решения конкретных практических задач, на развитие способностей к творческому использованию получаемых знаний и навыков. Основная цель заключается в закреплении знаний полученных в ходе прослушивания лекционного материала. Семинар проводится в форме устного опроса студентов по вопросам семинарских занятий, а также в виде решения практических задач или моделирования практической ситуации. В ходе подготовки к семинару студенту следует просмотреть материалы лекции, а затем начать изучение учебной литературы. Следует знать, что освещение того или иного вопроса в литературе часто является личным мнением автора, построенного на анализе различных источников, поэтому следует не ограничиваться одним учебником или монографией, а рассмотреть как можно больше материала по интересуемой теме.

В ходе самостоятельной работы студенту необходимо отслеживать научные статьи в специализированных изданиях.

Студенту рекомендуется следующая схема подготовки к семинарскому занятию:

1. Проработать конспект лекций;
2. Прочитать основную и дополнительную литературу, рекомендованную по изучаемому разделу;
3. Ответить на вопросы плана семинарского занятия;
4. Выполнить домашнее задание;
5. Проработать тестовые задания и задачи;
6. При затруднениях сформулировать вопросы к преподавателю.

При подготовке к семинарским занятиям следует руководствоваться указаниями и рекомендациями преподавателя, использовать основную литературу из представленного им списка. Для наиболее глубокого освоения дисциплины рекомендуется изучать литературу, обозначенную как «дополнительная» в представленном списке. При подготовке доклада на семинарское занятие желательно заранее обсудить с преподавателем перечень используемой литературы, за день до семинарского занятия предупредить о необходимых для предоставления материала технических средствах, напечатанный текст доклада предоставить преподавателю

2.3. Методика самостоятельной работы по самостоятельному изучению литературы

Большая часть самостоятельной работы студента состоит в **изучении литературы**. Одна из задач студента – научиться самостоятельно работать с книгой, а это требует определенных затрат энергии и времени. Поэтому надо научиться делать эту работу рационально, то есть необходимо учиться читать.

Методы эффективной работы с книгой в целях развития интеллекта можно условно разделить на две группы:

1. Правильная организация процесса чтения

2. Повышение скорости чтения и восприятия.

В комплексе оба метода могут в 2-3 раза сократить время прочтения различных материалов.

При чтении текста мозг формирует «свою трактовку содержания» прочитанного. Происходит перекодирование сообщения на языке собственных мыслей читателя. Мозг выделяет «ядерное», сущностное значение из текста. Эффективность такой перекодировки зависит от осмысления и внимательности чтения.

Дифференциальный алгоритм чтения в соответствии с блоками позволяет реализовать логико-семантический анализ текста: вначале выделить ключевые слова, затем построить смысловые ряды и, наконец, выделив цепь знаний, сформулировать доминанту. Именно так и только так (по О.А. Андрееву) можно увидеть главное, действительно, проникнуть в суть вещей, явлений, излагаемых автором.

Возможны три основных способа чтения.

- Первый способ – артикуляция или проговаривание вслух (или почти вслух) того, что читаешь. Скорость такого чтения невелика.
- Второй способ – чтение про себя, при котором речевой процесс проявлен в форме внутренней речи, то есть без открытой артикуляции. Текст, при этом усваивается более эффективно. Способ в принципе допускает быстрое чтение.
- Третий, наиболее совершенный способ чтения – тоже молча, но в условиях максимального сжатия внутренней речи, при котором она проявляется в виде коротких залпов ключевых слов и смысловых рядов, адекватно отражающих смысл текста.

Итак, артикуляция замедляет процесс чтения и от нее необходимо избавиться. Однако не приведет ли сокращение артикуляции при повышении скорости чтения к снижению качества восприятия и осмысления полученной информации?

Как показали исследования психологов, иногда при чтении слова могут быть заменены наглядными представлениями, пространственными схемами. Целые группы слов – одним словом.

Быстро читающие люди обладают способностью, не проговаривая читаемый текст, сразу улавливать и фиксировать замысел автора, а затем усваивать его на уровне внутренней речи. В этом случае, несмотря на высокую скорость чтения, происходит глубокое понимание и усвоение прочитанного, так как основная идея понятна с самого начала. Задачу научиться такому чтению можно решать в два этапа. Первый предполагает сокращение артикуляции, если она ярко выражена, второй – овладение приемами чтения, при которых текст воспринимается крупными информационными блоками.

Перед углубленным чтением любого текста (статьи, книги, конспекта, лекции перед экзаменом) сначала бегло просмотрите его целиком. При этом постарайтесь выявить основные стержневые идеи, наиболее крупные части и логику их изложения. Лишь после такого просмотра переходите к более детальному чтению.

Перед чтением статьи или параграфа учебника попробуйте проделать следующее: прочитайте внимательно первый абзац, потом бегло просмотрите первые или последние фразы следующих абзацев (в них обычно содержится основная информация), обратите внимание на курсивы, разрядки, подзаголовочный текст и, наконец, внимательно прочтите один-два последних абзаца; постарайтесь выявить основное направление текста и его построение.

Прочитав в тексте интересную идею, полезно остановить свое внимание на ней, прислушаться к тем мыслям, которые она у вас вызвала, подумать о тех последствиях, которые из нее вытекают, попытаться развивать ее дальше.

Существенно замедляют чтение регрессии – частые возвратные движения глаз, многократное повторное прочитывание материала.

Возвратиться к уже прочитанному, но недостаточно хорошо понятому участку лучше всего, когда прочитан законченный смысловой фрагмент текста и сделана хотя бы попытка его осмысления, а не в процессе чтения предложения.

Любой текст не однороден по своей информационной насыщенности. В некоторых предложениях, абзацах сконцентрировано очень много информации, например, формулируются основные положения, ведущие идеи и т.д., а другие служат лишь иллюстрацией, фоном. Таким образом, текст имеет «смысловой рельеф». Чем точнее читатель умеет определить степень важности каждого отрезка текста и приспособить к «смысловому барьеру» способ своего чтения (то есть замедлить и углубить в более важных местах и ускорять в менее важных), тем продуктивнее чтение. Постарайтесь гибко варьировать способ работы с текстом в соответствии с его «смысловым барьером».

Чтобы чтение было эффективным, попробуйте по прочитанному всегда отвечать на 6 вопросов: *«Кто делает? Что делает? Когда? Почему? Где? Как?»*

Самостоятельная работа с книгой может быть успешной, если текст не только прочитан, но и законспектирован. Существует несколько **форм записей**, но любая форма записи не даст нужного результата, если не будет пробуждать мысли того, кто ее ведет, если отсутствует активная работа ума и формирование своих выводов из прочитанного.

Выбор формы записи зависит от индивидуальных особенностей человека, его образованности и опыта. При этом не меньшую роль играет назначение записей, то есть то, какие задачи ставит перед собой человек (для самообразования, для выступления на семинаре, для использования в будущем).

Введение записей мобилизует наряду со зрительной памятью, также и моторную память. Кроме того, у человека, систематически ведущего записи

изучаемой литературы, создается свой фонд материалов для быстрого повторения и мобилизации накопленных знаний.

Все записи должны быть убористыми и компактными. Интервалы между строками должны быть достаточными, чтобы вписывать дополнения. Рекомендуется вести записи ручкой, а карандашом или ручкой другого цвета пользоваться для отметок и выделений при последующей работе. Полезно также датировать записи.

Записи могут носить различный характер: план, выписки, тезисы, аннотирование, конспектирование, реферирование.

3 УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

Основная литература:

8.1.1 . Перечень основной литературы :

1. Тремясов, В. А. Теория принятия решений в электроэнергетике : учебное пособие / В. А. Тремясов, Т. В. Кривенко. — Красноярск : СФУ, 2020. — ISBN 978-5-7638-4298-2. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/181613>
2. Воскобойников, Ю. Е. Рекуррентное оценивание вектора состояния динамических систем Электронный ресурс : Учебное пособие / Ю. Е. Воскобойников. Новосибирск : Новосибирский государственный технический университет, 2014. - 136 с. Книга находится в премиум-версии ЭБС IPR BOOKS. - ISBN 978-5-7782-2486-5
3. Голубева, Н. В. Математическое моделирование систем и процессов : учебное пособие для вузов / Н. В. Голубева. — 4-е изд., испр. и доп. — Санкт-Петербург : Лань, 2024. — 244 с. — ISBN 978-5-507-48455-3. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/393023>

8.1.2 Перечень дополнительной литературы:

1. Филиппова, Т. А. Энергетические режимы электрических станций и электроэнергетических систем : учебник / Т. А. Филиппова. — Новосибирск : НГТУ, 2014. — 294 с. — ISBN 978-5-7782-2517-6. — Текст : электронный // Лань : электроннобиблиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/118094>
2. Адресность потокораспределения для электроэнергетиков : учебник / А. 3. Гамм, И. И. Голуб, А. Г. Русина, Т. А. Филиппова. — Новосибирск : НГТУ, 2016. — 284 с. — ISBN 978-5-7782-2863-4. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/118073>

Интернет-ресурсы:

- 1 <http://tpu.ru/> - Сайт Национального Исследовательского Томского Политехнического Университета.
- 2 <http://www.mpei.ru> - Сайт Национального Исследовательского Университета. Московский Энергетический Институт (МЭИ).
- 3 <http://www.news.elteh.ru/> - Сайт: новости электротехники. Информационно – справочное издание.