

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
АМУРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
(ФГБОУ ВО «АмГУ»)

**МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОРГАНИЗАЦИЯ
ЭКСПЕРИМЕНТОВ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ**
сборник учебно-методических материалов

для направления подготовки 13.06.01 «Электро- и теплотехника»

Благовещенск, 2017

*Печатается по решению
редакционно-издательского совета
энергетического факультета
Амурского государственного
университета*

Составители: Савина Н.В., Проценко П.П.

Моделирование и организация экспериментов в электроэнергетике: сборник учебно-методических материалов для направления подготовки 13.06.01 «Электро- и теплотехника». – Благовещенск: Амурский гос. Ун-т, 2017. – 20 с.

©Амурский государственный университет, 2017

© Кафедра энергетики, 2017

© Савина Н.В., составитель

© Проценко П.П., составитель

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	4
1. Краткое изложение лекционного материала	5
2. Методические рекомендации к практическим занятиям	14
3. Методические указания для самостоятельной работы студентов	17
Список литературы	19

ВВЕДЕНИЕ

Сборник учебно-методических материалов предназначен для аспирантов, обучающихся по направлению подготовки «Электро- и теплотехника», при освоении дисциплины «Моделирование и организация эксперимента в электроэнергетике».

Целями освоения дисциплины «Моделирование и организация эксперимента в электроэнергетике» являются познакомить обучающихся с современными достижениями в области математического моделирования и искусственного интеллекта, а так же способами их использования в профессиональной деятельности.

Задачи дисциплины:

- привить навыки по получению, выбору и использованию современных методов математического моделирования в задачах электроэнергетики и электротехники;
- познакомить с основами использования искусственного интеллекта в области профессиональной деятельности.

Дисциплина «Моделирование и организация эксперимента в электроэнергетике» предусмотрена учебным планом.

Сборник учебно-методических материалов состоит из разделов:

1. Краткое изложение лекционного материала.
2. Методические рекомендации к практическим занятиям.
3. Методические указания для самостоятельной работы.

1. КРАТКОЕ ИЗЛОЖЕНИЕ ЛЕКЦИОННОГО МАТЕРИАЛА

Лекционный курс по дисциплине «Моделирование и организация экспериментов в электроэнергетике» предназначен для формирования знаний и умений в области разработки моделей различных участков электроэнергетических систем.

Тема 1. Основы математического моделирования.

Содержание темы: Классификация моделей. Переменные в математических моделях. Адекватность и эффективность математических моделей. Свойства объектов моделирования. Математическая модель линии с распределенными параметрами. Математические модели линии в виде схем замещения. Упрощенные модели ЛЭП. Математические модели силового трансформатора. Г-образная и П-образная схемы замещения силового трансформатора. Построение внешней характеристики трансформатора. Электрическая нагрузка: статические характеристики электрической нагрузки и моделирование электрических нагрузок.

Краткие теоретические сведения

Математическое моделирование как инструмент познания применяется в различных областях деятельности человека. Оно становится главенствующим направлением в проектировании и исследовании новых систем, анализе свойств существующих систем, выборе и обосновании оптимальных условий их функционирования.

Основная задача моделирования различного рода процессов и систем с целью исследования объектов, прогнозирования их поведения или поиска наилучших условий функционирования сводится к расчету анализируемых показателей по математическому моделированию при тех или иных значениях входных величин. Важное значение при этом приобретают вычислительные алгоритмы, с помощью которых можно получить при моделировании решение конкретной математической задачи.

Использование модели позволяет:

- понять, как устроен реальный объект, каковы его структура, свойства, законы развития и взаимодействия с окружающим миром;
- научиться управлять объектом (процессом), выбрать наилучший способ управления при заданных целях;
- прогнозировать прямые и косвенные последствия реализации заданных способов и форм воздействия на объект.

Эффективная модель должна обладать рядом свойств, таких как:

- адекватность – степень соответствия объекту оригиналу (полнота модели);
- универсальность – применимость модели к анализу многочисленной группы объектов и решения широкого класса задач;
- экономичность – количество вычислительных ресурсов, которые необходимы для реализации модели.

Формирование модели – сложный творческий процесс, который требует от исследователя опыта, интуиции, глубокого знания предметной области и возможностей современной компьютерной техники для принятия компромиссных решений и получения эффективной модели (рис. 1.1).

Модели можно классифицировать по ряду признаков, например по способу представления модели подразделяются на материальные и идеальные

К материальным можно отнести, в частности, физические модели, которые представляют собой увеличенную или уменьшенную копию объекта-оригинала.

При этом допускается исследование свойств с последующим переносом их на реальный объект на основе теории подобия. Идеальные включают в себя образные (иконические), вербальные (словесные), знаковые модели. К знаковым, в частности, относятся графические и математические модели. Графические модели позволяют с помощью графики отобразить существенные свойства объекта. Математические модели позволяют описать свойства объекта на языке математики для решения различных исследовательских задач.

Классификация моделей. Совокупность математических объектов (чисел, переменных, векторов, множеств и т.п.) и отношений между ними, отражающая свойства исследуемого объекта называют *математической моделью* физического объекта (или просто моделью).

Модели классифицируются по ряду признаков.

По характеру отражаемых свойств объекта модели делятся на функциональные и структурные. *Функциональные* модели отражают свойства, связанные с процессами функционирования объекта, *структурные* модели отражают структурные (в частности, геометрические) свойства объекта.

По способу получения модели делят на теоретические и эмпирические. *Теоретические* модели получают на основе изучения физических закономерностей функционирования объекта, а *эмпирические* - на основе изучения внешних проявлений свойств объекта.

На большинстве уровней модели представляются системами уравнений, решаемых численными методами. Такие модели называют *алгоритмическими (численными)*. Частный случай алгоритмической модели - имитационные модели. Имитационная модель есть алгоритм имитации процессов функционирования объекта, т.е. вычисления зависимостей фазовых переменных от времени при задании различных воздействий на входах объекта. Если системы уравнений удастся решить в общем виде и выразить взаимосвязи между выходными, внутренними и внешними параметрами в аналитической форме, то результаты такого решения называют *аналитическими моделями*.

В зависимости от степени описания объектов модели делят на полные и макромоделли. *Полной моделью* называют модель, полученную непосредственным объединением моделей элементов в общую систему, а *макромодель* представляет собой аппроксимацию полной модели.

По характеру математического аппарата. В зависимости от линейности систем уравнений модели делятся на *линейные* и *нелинейные*. В зависимости от характера переменных, фигурирующих в моделях, последние делятся на *непрерывные* и *дискретные*. По случайности характера параметров модели делят на *статистические* и *детерминированные*.

Модели в виде графов называют *топологическими*, в виде таблиц и матриц - *табличными*.

Требования к моделям. К моделям предъявляются следующие требования:

адекватность - правильность отображения заданных свойств объекта;

степень универсальности - полнота отображения свойств объекта;

экономичность - объем требуемых машинных времени T_m и памяти P_m при использовании модели.

Тема 2. Применение вероятностно-статистических методов в задачах электроэнергетике

Содержание темы: Понятие формальной модели. Численные модели. Графические модели. Лингвистические модели. Формально-логические модели. Случайные явления и процессы энергетике. Основные понятия и определения теории вероятностей. Случайные события, классификация случайных событий. Примеры случайных событий в энергетике. Полная группа событий. Принцип практической уверенности. Формула полной вероятности. Теорема о повторении опытов. Случайные величины в энергетике. Непрерывные и дискретные случайные величины. Статистический ряд. Законы распределения случайных величин, числовые характеристики случайных величин и их свойства. Законы распределения вероятностей случайных величин, применяемые в энергетике.

Краткие теоретические сведения

Познакомимся с элементами формализма, с помощью которых при соответствующей их интерпретации выявляются общие черты знаковых моделей разных классов.

Формальной моделью называется четверка:

$$M = (MB, СИП, A, СЕП),$$

где MB – множество базовых элементов;

СИП – синтаксические правила;

A – множество аксиом;

СЭП – семантические правила.

МБ – конечное или счетное множество элементов любой природы, из которого будут строиться все остальные компоненты системы.

СИП – используется для того, чтобы из базовых элементов строить такие их сочетания, которые в рамках данной системы считаются правильными совокупностями.

СЭП расширяют, если возможно множество аксиом, добавляя к ним синтаксически и семантически правильные совокупности, или накладывают на них определенные (смысловые) ограничения. Множество, полученное после применения семантических правил к аксиомам, называется множеством семантически правильных совокупностей.

Наиболее распространенный способ представления знаний об объекте формализованными средствами – создание численных математических моделей, описывающих количественные отношения между переменными.

Множество базовых элементов для численных моделей совпадает с множеством подходящих для данной задачи действительных, комплексных или целых чисел.

Отличительной особенностью логико-лингвистических моделей является то, что они соединяют лингвистический характер описаний образов реального мира с механизмом логического вывода, который является средством формирования решений.

Случайные явления и процессы электроэнергетике. Основные понятия и определения теории вероятностей. Случайные события, классификация случайных событий. Примеры случайных событий в электроэнергетике. Полная группа событий. Принцип практической уверенности. Формула полной вероятности. Теорема о повторении опытов. Построение упорядоченных диаграмм с помощью схемы независимых испытаний. Основные понятия теории надёжности. Применение основных теорем теории вероятностей для определения показателей надёжности схем электроснабжения.

Каждое явление окружающего нас мира, в том числе и происходящее в электроэнергетической системе при производстве, передаче и потреблении электроэнергии, связано со множеством других явлений более или менее тесными взаимосвязями. Изучать явления в ЭЭС путем прослеживания всех возможных взаимосвязей и количественного их описания практически невозможно. При их познании целесообразно разделить все связи на две категории:

– основные, или доминирующие, определяющие общие черты явления (свойство периодичности графика нагрузки электрических систем и их элементов – суточной, недельной, сезонной, годовой);

– второстепенные, по-разному влияющие на данное явление и приводящие к некоторому отклонению результатов многократного его наблюдения от закономерности (случайных флуктуаций ординат процессов вследствие включения и отключения отдельных приемников, различных метеословий, загрузки оборудования).

Отклонения от закономерности, порождаемые бесчисленным множеством неучтенных связей, называются случайными явлениями.

Закономерности в самих случайных отклонениях можно обнаружить только при анализе массовых явлений, являющихся предметом изучения теории вероятностей и математической статистики.

Событие – всякий факт, который в результате опыта может произойти или не произойти. Примером случайного события может послужить отказ турбоагрегата или элемента в сети.

Чтобы количественно сравнивать между собой события по степени их возможности, необходимо с каждым связать определенное число, которое тем больше, чем более возможно событие. Такое число называется вероятностью события. Существует класс событий, где возможен непосредственный расчет их вероятностей. Эти опыты с симметричными и одинаково возможными исходами.

Несколько событий в таких опытах образуют *полную группу событий*, если в результате опыта должно появиться хотя бы одно из них.

Несколько событий называются *несовместными* в данном опыте, если никакие два из них не могут произойти. Пример – отказ агрегата и о одновременно его безотказная работа в течение

некоторого рассматриваемого промежутка времени.

Несколько событий называются *равновозможными*, если по условиям симметрии есть основание считать, что ни одно из них не является объективно более возможным, чем другое. Пример – отказ в работе любого агрегата из группы однотипных, находящихся в одинаковых условиях эксплуатации, равновозможен.

Существуют группы событий, обладающие всеми тремя названными свойствами: *они образуют полную группу событий, несовместны и равновозможны*.

События образующие такую группу называют *случаями*. Случай считается благоприятным для некоторого события, если его появление влечет за собой появление данного события.

Случайной величиной называется величина, которая в результате опыта может принять то или иное значение, причем неизвестно заранее, какое именно. Различают случайные величины непрерывного и дискретного типа. Возможные значения дискретных величин могут быть заранее перечислены. Возможные значения непрерывных величин не могут быть заранее перечислены и непрерывно заполняют некоторый промежуток.

Пример. Число отказавших элементов в приборе – дискретная случайная величина, а время безотказной работы прибора – непрерывная случайная величина.

Законом распределения случайной величины называется всякое соотношение, устанавливающее связь между возможными значениями случайной величины и соответствующими им вероятностями.

Формы задания законов распределения дискретных случайных величин:

1. Ряд распределения
2. Многоугольник распределения

Для непрерывной случайной величины существует распределение вероятностей, но не в том смысле, что для дискретной. Для этого используют вероятность события $X < x$, где x – некоторая текущая переменная. Вероятность этого события есть функция от x – *функция распределения* случайной величины $F(x) = P(X < x)$, которая носит название *интегрального закона распределения*.

Плотностью распределения вероятностей (ПРВ) непрерывной случайной величины X называют функцию $f(x)$ – первую производную от функции распределения $F(x)$, т.е. $f(x) = F'(x)$.

Тема 3. Оптимизация систем энергоснабжения

Содержание темы: Статистические исследования на уровне случайных величин. Задачи, решаемые с помощью математической статистики в теплоэнергетике. Закон больших чисел и следствия из него. Построение гистограммы. Точечные и интервальные оценки числовых характеристик. Критерии согласия. Линейные модели регрессий. Свойство МНК-оценок. Оценка параметров регрессии. Прогнозирование электрических нагрузок на основе регрессионных моделей. Определение основных понятий математического программирования. Классификация методов оптимизации. Формулировка задачи нелинейного программирования. Необходимые и достаточные условия существования локального минимума целевой функции. Классический метод определения условного экстремума. Метод неопределенных множителей Лагранжа.

Краткие теоретические сведения

Оптимизационные задачи в большинстве случаев формулируются как задачи поиска экстремальных значений функции отклика объекта (максимумов или минимумов). Например, инженеру часто приходится решать задачи поиска оптимальных условий производства продукции с максимальной производительностью или минимальной себестоимостью.

Поведение объекта во многих случаях приходится описывать несколькими функциями отклика. Очень редко удается найти такое сочетание значений всех влияющих факторов, при котором достигаются все желаемые экстремумы функций отклика объекта. Большинство влияющих факторов можно изменять только в реальных пределах: концентрации реагентов не могут быть отрицательными, температуры процессов не могут превышать безопасные значения и т.д. Иссле-

дователю нужны и реальные значения функции отклика объекта: неотрицательные значения выхода продукции, степени очистки, себестоимости продукции и др. Поэтому в большинстве случаев оптимизационные задачи решают при условии различных ограничений на величину влияющих факторов и значений функций откликов объектов, т.е. проводят поиск рациональных значений влияющих факторов.

При традиционном поиске рациональных условий стабилизируют все факторы, кроме одного. При этом зачастую обнаруживается только часть экстремальных значений функции отклика объекта («локальные» экстремумы).

Для получения более полной информации о поведении объекта рекомендуется проводить поиск рациональных условий при одновременном изменении нескольких факторов, используя специальные методы математического планирования эксперимента.

Все методы математического планирования эксперимента для решения оптимизационных задач делят на две группы: методы, требующие знаний уравнения регрессии функции отклика объекта, и методы, не требующие таких знаний.

Рассмотрим основные направления обработки данных (интерполяция и аппроксимация), являющиеся базой для решения всех других задач обработки данных.

Понятие о приближении функции

Пусть задана функция $y = f(x)$ для любого $x \in D$ (область определения поставлена в соответствие значению Y).

На практике часто явная связь между Y и X не известна, т.е. невозможно записать $y = f(x)$.

Наиболее распространенным и практически важным случаем, когда вид связи между параметрами X и Y неизвестен, является задание этой связи в виде некоторой таблицы $\{x_i, y_i\}$.

Таким образом, мы приходим к необходимости использовать имеющиеся табличные данные для приближенного вычисления искомого параметра Y при любом значении (из некоторой области) параметра X , поскольку точная связь $y = f(x)$ неизвестна.

Этой цели и служит задача о приближении (аппроксимации) функции: данную функцию $f(x)$ требуется приближенно заменить (аппроксимировать) некоторой функцией $\varphi(x)$, чтобы отклонение $\varphi(x)$ от $f(x)$ в заданной области было наименьшим. Функция $\varphi(x)$ называется аппроксимирующей. На практике весьма важен случай аппроксимации функции многочленом:

$$\varphi(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_mx^n.$$

При этом коэффициенты a_j будут подбираться таким образом, чтобы достичь наименьшего отклонения многочлена от данной функции.

Точечная аппроксимация

Интерполирование – основной тип точечной аппроксимации. Для данной функции $y = f(x)$ строится многочлен, принимающий в заданных точках x_i те же значения y_i , что и функция $f(x)$, т.е.:

$$\varphi(x_i) = y_i, i = \overline{0, n}.$$

Следовательно, близость интерполяционного многочлена к заданной функции состоит в том, что их значения совпадают в заданной системе точек.

Интерполяционные многочлены могут строиться отдельно для разных частей рассмотренного интервала изменения x . В таком случае имеем кусочную (или локальную) интерполяцию.

Равномерное приближение

При построении приближения ставится условие – требуется, чтобы во всех точках некото-

рого отрезка $[a, b]$ отклонение многочлена $\varphi(x)$ от функции $f(x)$ по абсолютной величине было меньше заданной величины $\varepsilon > 0$.

$$|f(x) - \varphi(x)| < \varepsilon, \quad a \leq x \leq b.$$

В этом случае говорят, что многочлен $\varphi(x)$ равномерно аппроксимирует функцию $f(x)$ с точностью ε на $[a, b]$.

Линейная и квадратичная интерполяция

Простейшим и часто используемым видом локальной интерполяции является линейная. Она состоит в том, что заданные точки (x_i, y_i) , $i = \overline{1, n}$ соединяются прямолинейными отрезками, и функция $f(x)$ приближается ломаной с вершинами в данных точках.

Уравнения каждого отрезка ломаной в общем случае разные. Так, для i -ГО интервала можно написать уравнение прямой, проходящей через точки (x_{i-1}, y_{i-1}) и (x_i, y_i) , в виде:

$$\frac{y - y_{i-1}}{y_i - y_{i-1}} = \frac{x - x_{i-1}}{x_i - x_{i-1}}. \quad (*)$$

Следовательно, при использовании линейной интерполяции нужно определить интервал, в который попадает значение аргумента x , а затем представить в виде (*) и найти приближенное значение функции в этой точке.

Рассмотрим случай квадратичной интерполяции. В качестве интерполяционной функции на $[x_{i-1}, x_{i+1}]$ принимается квадратичный трехчлен:

$$y = a_i x^2 + b_i x + c_i, \quad x_{i-1} \leq x \leq x_{i+1}. \quad (**)$$

Многочлен Лагранжа

Перейдем к случаю глобальной интерполяции. При этом график интерполяционного многочлена должен проходить через все заданные точки, принадлежащие $\varphi(x) = a_0 + a_1 x + \dots + a_n x^n$.

Будем искать многочлен в виде линейной комбинации многочленов степени n :

$$L(x) = y_0 l_0(x) + y_1 l_1(x) + \dots + y_n l_n(x).$$

При этом потребуем, чтобы каждый многочлен $l_i(x)$ обращался в нуль во всех узлах интерполяции, за исключением одного (i -го), где он должен равняться единице. Этим условиям отвечает многочлен вида:

$$l_0(x) = \frac{(x - x_1)(x - x_2) \dots (x - x_n)}{(x_0 - x_1)(x_0 - x_2) \dots (x_0 - x_n)}.$$

Метод сплайнов

В некоторых случаях возникает задача восстановления не только значений функций, но также ее первой и второй производной. Для решения указанного класса задач успешно применяют сплайновые интерполяции.

Наибольшее распространение получила интерполяция с помощью кубических сплайнов.

Сплайн – это функция, которая на каждом междузловом интервале совпадает с некоторым полиномом, своим для каждого интервала.

Полиномы соседних интервалов строятся так, чтобы функция была непрерывной. Дополнительно требуют непрерывности нескольких произвольных (в кубических сплайнах – двух).

Важным достоинством интерполяции кубическими сплайнами является определение функции, имеющей минимальную возможную кривизну.

К недостаткам сплайновой интерполяции относится необходимость определения сравни-

тельно большого числа параметров.

Эмпирические формулы. Метод наименьших квадратов

Изучая неизвестную функциональную зависимость между y и x , в результате серии экспериментов произвели ряд измерений этих величин (табл.).

Таблица

Ряд измерений			
x_0	x_1	...	x_n
y_0	y_1	...	y_n

Задача состоит в том, чтобы найти приближенную зависимость,

$$y = f(x), \quad (***)$$

значение которой при $x = x_i$ ($i = \overline{1, n}$) мало отклоняется от опытных данных y_i .

Приближенная функциональная зависимость (***) , полученная на основании экспериментальных данных, и называется *эмпирической формулой*.

Построение эмпирической формулы состоит из двух этапов:

- 1) подбор общего вида этой формулы;
- 2) определение наилучших значений содержащихся в ней параметров.

Будем считать, что тип эмпирической формулы выбран и ее можно представить в виде:

$$y = \varphi(x, a_0, a_1, \dots, a_m),$$

где φ – известная функция;

a_0, a_1, \dots, a_m - неизвестные постоянные параметры.

Задача состоит в том, чтобы определить такие значения этих параметров, при которых эмпирическая формула дает хорошее приближение данной функции, значения которой в точках x_i равны y_i ($i = \overline{0, n}$).

Здесь не ставится условие (как в случае интерполяции) совпадения опытных данных y_0 со значением эмпирической функции в точках.

Разности между этими значениями (отклонения) обозначаются через ε_i :

$$\varepsilon_i = \varphi(x_i, a_0, a_1, \dots, a_m) - y_i.$$

Задача нахождения наилучших значений параметров a_0, a_1, \dots, a_m сводится к некоторой минимизации отклонений ε_i . Запишем сумму квадратов отклонений для всех точек x_0, x_1, \dots, x_n :

$$\delta = \sum_{i=0}^n \varepsilon_i^2 = \sum_{i=0}^n [\varphi(x_i, a_0, a_1, \dots, a_n) - y_i]^2.$$

Параметры эмпирической формулы находятся из условия минимума функции $S = S(x_i, a_0, a_1, \dots, a_m)$. В этом состоит метод наименьших квадратов (МНК).

Тема 4. Проведение научных исследований

Содержание темы: Классификация, типы и задачи эксперимента. Методика и программа эксперимента. Содержание и разработка методики эксперимента. Планирование эксперимента и основные элементы плана.

Краткие теоретические сведения

Являясь основным методом науки, эксперимент в широком понимании является «сердцем» научного исследования. Планирование и организация эксперимента оказывает решающее влияние на качество получаемых результатов. Даже если исследователем были выполнены все предыду-

щие этапы: проведена необходимая идентификация организационной проблемы, привлечены теории и модели, помогающие понять эту проблему, сформулирована обоснованная гипотеза и определены методы исследования — все это окажется бесполезным без эффективного планирования и применения соответствующей схемы эксперимента. Структура исследования интересующего явления, будь то мотивация, эффективность программы развития, лидерство, совместимость группы или отбор персонала, необходимым образом предполагает использование определенной экспериментальной схемы или плана.

Формируя план, исследователь заранее предвидит возможность научной интерпретации будущих результатов. Таким образом, *план эксперимента— это проект, который предлагает выполнение исследователем одних процедур и отказ от других.*

Планирование эксперимента рассматривается как раздел математической статистики, изучающий рациональную организацию измерений, подверженных случайным ошибкам.

Задача планирования эксперимента заключается в разработке оптимальной схемы исследования – выборе значений изучаемых факторов и количество опыта. Планирование эксперимента применяют и для нахождения математической модели объекта и ее экстремумов.

Объектом исследования называется изучаемый процесс, физическое явление, агрегат.

Факторами называются независимые величины, с помощью которых можно воздействовать на исследуемый объект или факторы – это параметры процессов и системы.

Значения, которые могут принимать факторы, называются *уровнями*.

Количественно найденная характеристика процесса – показатель, наиболее полно отражающий его сущность или эффективность, называется параметром оптимизации или функцией отклика.

Методы планирования эксперимента позволяют установить зависимость между рядом фактором и одним параметром оптимизации.

В зависимости от того, сколько в эксперименте рассматривается переменных факторов, он называется одно-, двух-, многофакторным экспериментом.

Многофакторный эксперимент позволяет:

- 1) получить математическую модель процесса, которую можно использовать при управлении;
- 2) вскрыть объективные закономерности и получить информацию о процессе;
- 3) проверить адекватность представления результатов эксперимента определенной интерполяционной зависимостью.

Планирование эксперимента резко повышает точность и снижает объем экспериментальных исследований, позволяет находить оптимум функции, описывающей процесс.

Тема 5. Компьютерное моделирование в электроэнергетике

Содержание темы: Обработка и анализ экспериментальных результатов. Способы представления результатов эксперимента. Понятие погрешности эксперимента. Основные возможности ПК. Библиотека MathCad Electrical Engineering и ее использование при моделировании объектов электроэнергетики.

Краткие теоретические сведения

При проведении НИР особое место принадлежит анализу результатов эксперимента, на основании которого делают выводы о подтверждении гипотезы научного исследования. Данные эксперимента, тщательное сопоставление фактов, причин, обуславливающих ход рабочего процесса, позволяют четко представить физическую сущность процесса и установить адекватность гипотезы и эксперимента. Ниже приведены некоторые методы обработки и анализа экспериментальных данных.

Методы графического изображения результатов измерений

Графическое изображение результатов измерений дает наиболее наглядное представление о ходе процесса, позволяет лучше понять его физическую сущность, выявить общий характер функциональной зависимости изучаемых величин, установить наличие максимума или минимума функции. Для графического изображения результатов измерений, как правило, применяют систе-

му прямоугольных координат.

Методы подбора эмпирических формул

Эмпирические формулы - это алгебраические выражения, являющиеся приближенными выражениями аналитических формул, которые отличаются простотой и точным соответствием экспериментальным данным в пределах изменения аргумента.

Замену точных аналитических выражений приближенными, простыми называют аппроксимацией, а функции – аппроксимирующими.

При подборе эмпирических формул различают два этапа:

1) построение экспериментальной кривой в системе прямоугольных координат и выбор ориентировочной формулы (зависимости);

2) вычисление параметров формулы, которые наилучшим образом соответствовали бы принятой формуле. При этом подбор формул следует начинать с самых простых выражений, используя, прежде, всего линейные функции.

Для определения постоянных величин, входящих в эмпирическую формулу, можно пользоваться следующими методами:

а) метод выравнивания, заключающийся в том, что кривую, построенную по экспериментальным точкам, представляют линейной функцией и графическим методом определяют параметры прямой, используя при этом, различные координатные сетки (прямоугольную, полулогарифмическую и логарифмическую);

б) метод средних величин, основанный на построении по экспериментальным точкам нескольких плавных кривых; наилучшей будет та кривая, у которой разностные отклонения (абсолютная ошибка) будут наименьшие;

в) метод наименьших квадратов, заключающийся в том, что если все измерения функции (Y_1, Y_2, \dots, Y_n) произведены с одинаковой точностью и распределение величины ошибок измерения соответствует нормальному закону, то параметры исследуемого уравнения определяются из условия, что сумма квадратов отклонений измеренных значений от расчетных (средних) значений будет наименьшей. Данный метод дает наилучшие результаты при определении параметров заданного уравнения.

Корреляционный анализ

Под корреляционным анализом понимают исследование закономерностей между явлениями и (процессами), которые зависят от многих, иногда неизвестных факторов.

Когда одному значению X соответствует несколько значений (совокупность) Y , то между этими переменным и существует не вполне определенная связь, а функция $Y=f(X)$ является корреляционной. Установление корреляционных зависимостей между величинами X и Y возможно лишь при наличии большого количества измерений.

Суть корреляционного анализа сводится к установлению уравнения регрессии (вида кривой между случайными величинами), оценке тесноты связей и достоверности результатов измерений, т.е. сущность анализа состоит в выявлении возможности получения аналитической зависимости Y от X по статистическим измерениям. Область расположения умеряемых величин в прямоугольной системе координат называется корреляционным полем. По форме поля можно судить о наличии корреляционной связи между X и Y и форме графика, характеризующей прямолинейную или криволинейную зависимость.

В простейшем и часто встречающемся случае конкретная зависимость $Y = f(X)$, называемая уравнением регрессии, может быть аппроксимирована уравнением прямой.

В результате эксперимента получают статистический ряд однофакторных или многофакторных измерений, который подвергают обработке, анализу, подбирают эмпирические формулы и устанавливают их достоверность.

2. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ К ПРАКТИЧЕСКИМ ЗАНЯТИЯМ

Цель практических – закрепление теоретических знаний, получение навыков составления и расчета моделей различных элементов электроэнергетической системы.

К практическим занятиям требуется предварительная подготовка по рассматриваемой теме для чего необходимо прорабатывать лекционный материал и соответствующие разделы рекомендуемых источников информации.

Контрольные задания по отдельным темам дисциплины

Практическое занятие 1. «Точность вычислительного эксперимента»

Задание 1. Оценить погрешность величины

$$X = \frac{(d-a)^2 \cdot \sqrt{(c-d)^2}}{a^2 \cdot \sqrt[3]{c}}, \quad \text{если} \quad \begin{matrix} a \approx 11,85 \\ v \approx 0,634 \end{matrix} \quad \begin{matrix} c \approx 22,43 \\ d \approx 43,03 \end{matrix}$$

Задание 2. Определить значение функции в точке $X = 20,8$ методом линейной интерполяции

X	16	25	38
Y	7	14	24

Задание 3. Оценить погрешность величины

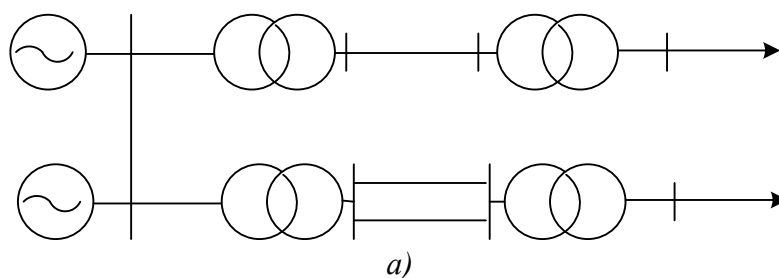
$$X = \frac{d^2 \cdot \sqrt[3]{(c-d)}}{v^2 \cdot a \cdot \sqrt[5]{c}}, \quad \text{если} \quad \begin{matrix} a \approx 8,85 \\ v \approx 1,634 \end{matrix} \quad \begin{matrix} c \approx 22,43 \\ d \approx 43,03 \end{matrix}$$

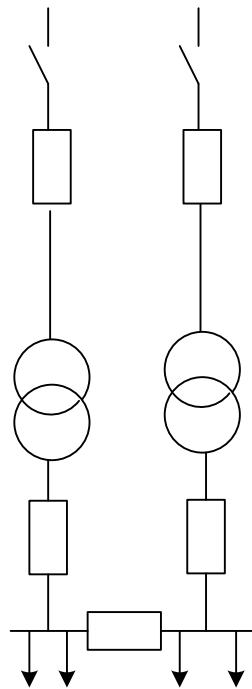
Задание 4. Определить значение функции в точке $X = 6,25$ методом линейной интерполяции

X	3	5	7
Y	12,3	15,5	18,9

Практическое занятие 2. «Логико-математическое моделирование»

Задание. Для схем, приведенных на рисунке, определить функцию работоспособности.





б)

Вопросы для самопроверки

1. Является ли составное высказывание $\neg x \vee y$ формулой?
2. Определить принадлежность к СИП следующих высказываний
 $(A \wedge B) \rightarrow B$;
 $\neg\neg A \rightarrow A$.
3. Общезначаима или противоречива следующая формула
 $\neg(a \rightarrow (b \rightarrow c)) \equiv ((a \wedge b) \rightarrow c)$?

Практическое занятие 3. «Структурная модель системы»

Задание. Разработать структурные модели систем:

1. Электроснабжения термического цеха машиностроительного завода.
2. Электроснабжения Благовещенской ТЭЦ.

Практическое занятие 4. «Нечеткое моделирование напряжения, тока, активной и реактивной составляющих мощности при неполной исходной информации»

Задание. Изменение электрической нагрузки задано таблицей

Значения активной мощности

N замера	P , МВт	N замера	P , МВт	N замера	P , МВт	N замера	P , МВт
1	30	41	30	81	30	121	28
2	28	42	30	82	30	122	27
3	31	43	28	83	30	123	27
4	28	44	30	84	30	124	30
5	29	45	29	85	31	125	29
6	27	46	28	86	28	126	27
7	27	47	26	87	32	127	28
8	29	48	27	88	30	128	29
9	28	49	29	89	31	129	28

10	30	50	30	90	29	130	27
11	32	51	31	91	31	131	28
12	28	52	29	92	29	132	29
13	29	53	29	93	28	133	27
14	30	54	28	94	30	134	31
15	30	55	28	95	30	135	28
16	30	56	29	96	30	136	30
17	27	57	30	97	31	137	30
18	30	58	28	98	30	138	31
19	29	59	27	99	28	139	30
20	27	60	30	100	29	140	30
21	28	61	30	101	30	141	29
22	30	62	30	102	27	142	30
23	27	63	28	103	28	143	28
24	28	64	30	104	27	144	28
25	29	65	30	105	30		
26	29	66	28	106	32		
27	30	67	27	107	27		
28	29	68	31	108	29		
29	31	69	30	109	28		
30	29	70	28	110	27		
31	29	71	26	111	30		
32	28	72	24	112	30		
33	29	73	30	113	29		
34	30	74	28	114	27		
35	30	75	30	115	29		
36	30	76	28	116	29		
37	27	77	29	117	27		
38	28	78	30	118	29		
39	28	79	29	119	28		
40	27	80	29	120	28		

Найти значения функции принадлежности значений активной мощности, используя выражение

$$\mu(P_i) = \begin{cases} 0, P_i \leq P_i^{I-} \\ 1 + \frac{P_i - P_i^{I-}}{P_i^{I-} - P_i^{III-}}, P_i^{I-} < P_i < P_i^{III-} \\ 1 + \frac{P_i^{III+} - P_i}{P_i^{I+} - P_i^{III+}}, P_i^{III+} < P_i < P_i^{I+} \\ 0, P_i \geq P_i^{I+} \end{cases},$$

где значения $[P_i^{III-}, P_i^{III+}]$ является наиболее возможным ($\mu(P_i) = 1$), а значения из $[P_i^{I-}, P_i^{I+}]$ и $[P_i^{III-}, P_i^{III+}]$ являются менее возможными, но допустимыми ($0 < \mu(P_i) < 1$).

3. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

Самостоятельная работа студентов - вид деятельности, при котором в условиях систематического уменьшения прямого контакта с преподавателем студентами выполняются учебные задания. К таким заданиям относятся рефераты, доклады и т.д. Самостоятельная работа студентов – это практическое занятие (семинар, практикум) с использованием различных методов обучения с использованием индивидуальных или групповых заданий, на котором аспиранты могут добывать новые знания, или обобщать ранее полученные знания.

Самостоятельная работа студентов по дисциплине предусматривается в форме выполнения заданий по темам практических занятий, подготовка отчетов по ним.

Самостоятельная работа обучающихся осуществляется в помещениях, оснащенных компьютерной техникой с возможностью подключения к сети «Интернет» и обеспечением доступа в электронную информационно-образовательную среду университета.

В процессе обучения используется следующее материально-техническое обеспечение:

1. комплект мультимедийного оборудования (используется на лекционных и практических занятиях);
2. помещения для проведения лекционных и семинарских занятий, оборудованные учебной мебелью;
3. калькуляторы.

Указания аспирантам по изучению рекомендованной литературы.

Эти методические рекомендации раскрывают рекомендуемый режим и характер различных видов учебной работы (в том числе самостоятельной работы над рекомендованной литературой).

Изучение дисциплины следует начинать с проработки рабочей программы, особое внимание, уделяя целям и задачам, структуре и содержанию курса.

Студентам рекомендуется воспользоваться ЭБС через свой личный кабинет или получить в научной библиотеке университета учебную литературу по дисциплине, необходимую для эффективной работы на всех видах аудиторных занятий, а также для самостоятельной работы по изучению дисциплины.

Успешное освоение курса предполагает активное, творческое участие студента путем планомерной, повседневной работы.

Рекомендуемое учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины прописано в рабочей программе дисциплины «Моделирование и организация экспериментов в электроэнергетике».

Указания аспирантам при подготовке к зачету.

При подготовке к зачету необходимо пользоваться списком контрольных вопросов, имеющих в рабочей программе дисциплины. Ответы на большую часть вопросов можно найти в конспекте лекций. Для успешной сдачи зачета необходимым условием является выполнение практических работ, поскольку материалы зачетных вопросов содержат схожие с данными работами задания.

Формы (вид) самостоятельной работы.

Самостоятельная работа аспирантов по дисциплине предусматривается в форме:

- выполнения заданий по темам практических занятий;
- проработка лекционного материала;
- выполнение заданий для самостоятельной работы;
- подготовка к собеседованию;
- подготовка к зачету.

Вопросы для собеседования по темам дисциплины

Тема 1. Основы математического моделирования.

Вопросы для собеседования

1. Основные требования к модели. Классификация моделей.
2. Г-образная схема замещения силового трансформатора.
3. Дайте характеристику уровней математического моделирования.
4. Основы моделирования электрической нагрузки.
5. Дать понятие адекватности и эффективности модели.

Тема 2. Применение вероятностно-статистических методов в задачах электроэнергетики.

Вопросы для собеседования

1. Понятие формальной модели.
2. Лингвистические модели.
3. Формально-логические модели.
4. Формула полной вероятности. Теорема о повторении опытов.
5. Законы распределения вероятностей случайных величин, применяемые в энергетике.

Тема 3. Оптимизация систем энергоснабжения.

1. Вопросы для собеседования

1. Задачи, решаемые с помощью математической статистики в энергетике.
2. Линейные модели регрессий. Свойство МНК-оценок. Оценка параметров регрессии.
3. Прогнозирование электрических нагрузок на основе регрессионных моделей.
4. Классификация методов оптимизации.
5. Классический метод определения условного экстремума. Метод неопределенных множителей Лагранжа.

Тема 4. Проведение научных исследований.

1. Вопросы для собеседования

1. Классификация, типы и задачи эксперимента.
2. Методика и программа эксперимента.
3. Содержание и разработка методики эксперимента.
4. Планирование эксперимента и основные элементы плана.

Тема 5. Компьютерное моделирование в электроэнергетике.

1. Вопросы для собеседования

1. Обработка и анализ экспериментальных результатов.
2. Способы представления результатов эксперимента.
3. Понятие погрешности эксперимента.
4. Основные возможности ПВК.
5. Библиотека MathCad Electrical Engineering и ее использование при моделировании объектов электроэнергетики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аверченков, В.И. Основы математического моделирования технических систем [Электронный ресурс] : учебное пособие / В.И. Аверченков, В.П. Федоров, М.Л. Хейфец. — Электрон. текстовые данные. — Брянск: Брянский государственный технический университет, 2012. — 271 с. — 5-89838-126-0. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/7003.html>
2. Афанасьев, В.Н. Анализ временных рядов и прогнозирование [Электронный ресурс] : учебник / В.Н. Афанасьев. — Электрон. текстовые данные. — Саратов: Ай Пи Эр Медиа, 2019. — 295 с. — 978-5-4486-0410-2. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/78217.html>
3. Ахмадиев Ф.Г. Математическое моделирование и методы оптимизации [Электронный ресурс] : учебное пособие / Ф.Г. Ахмадиев, Р.М. Гильфанов. — Электрон. текстовые данные. — Казань: Казанский государственный архитектурно-строительный университет, ЭБС АСВ, 2017. — 179 с. — 978-5-7829-0534-7. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/73309.html>
4. Лыкин, А.В. Математическое моделирование электрических систем и их элементов [Электронный ресурс] : учебное пособие / А.В. Лыкин. — Электрон. текстовые данные. — Новосибирск: Новосибирский государственный технический университет, 2013. — 227 с. — 978-5-7782-2262-5. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/45384.html>
5. Моделирование в электроэнергетике [Электронный ресурс] : учебное пособие / А.Ф. Шаталов [и др.]. — Электрон. текстовые данные. — Ставрополь: Ставропольский государственный аграрный университет, АГРУС, 2014. — 140 с. — 978-5-9596-1059-3. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/47317.html>
6. Методы моделирования и оптимизации в задачах электроэнергетики [Электронный ресурс] : учеб. пособие / АмГУ, Эн.ф. ; сост. Л. А. Гурина. - Благовещенск : Изд-во Амур. гос. ун-та, 2012. - 91 с. http://irbis.amursu.ru/DigitalLibrary/AmurSU_Edition/3622.pdf
7. Осика, Л.К. Инжиниринг объектов интеллектуальной энергетической системы. Проектирование. Строительство. Бизнес и управление [Электронный ресурс] — Электрон. дан. — Москва : Издательский дом МЭИ, 2014. — 780 с. — Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/72227>. — Загл. с экрана.
8. Применение теории вероятностей и методов оптимизации в системах электроснабжения [Текст] : учеб. пособие: рек. ДВ РУМЦ / Н. В. Савина ; АмГУ, Эн.ф. - Благовещенск : Изд-во Амур. гос. ун-та, 2007. - 272 с.
9. Сёмина, В.В. Моделирование систем [Электронный ресурс] : методические указания для проведения лабораторных работ по дисциплине «Моделирование систем» / В.В. Сёмина. — Электрон. текстовые данные. — Липецк: Липецкий государственный технический университет, ЭБС АСВ, 2016. — 17 с. — 2227-8397. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/64869.html>
10. Справочник по проектированию электрических сетей / под ред. Д.Л. Файбисовича. – 3-е изд., перераб. И доп. – М.: ЭНАС, 2009. – 391 с.
11. Шпиганович, А.Н. Методические указания и контрольные задания к расчетно-графическому заданию «Определение критериев подобия способом интегральных аналогов и на базе π -теоремы» [Электронный ресурс] : по дисциплине «Моделирование в технике» (для студентов направления подготовки 140400) / А.Н. Шпиганович, В.И. Бойчевский. — Электрон. текстовые данные. — Липецк: Липецкий государственный технический университет, ЭБС АСВ, 2012. — 9 с. — 2227-8397. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/55107.html>
12. Юрчук, С.Ю. Компьютерное моделирование нанотехнологий, наноматериалов и наноструктур. Математическое моделирование фотолитографических процессов и процессов электронной литографии при создании субмикронных структур и структур с нанометровыми размерами [Электронный ресурс] : курс лекций / С.Ю. Юрчук. — Электрон. текстовые данные. — М. : Издательский Дом МИСиС, 2013. — 45 с. — 978-5-87623-662-3. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/56066.html>

Савина Наталья Викторовна,
доктор технических наук, профессор кафедры энергетики ФГБОУ ВО «АмГУ»

Палина Павловна Проценко,
доцент кафедры энергетики ФГБОУ ВО «АмГУ»

Моделирование и организация экспериментов в электроэнергетике
Сборник учебно-методических материалов

Из-тво АмГУ. Формат 60x84/16.