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

МОДЕЛИРОВАНИЕ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ

сборник учебно-методических материалов

для направления подготовки «Электроэнергетика и электротехника»

Благовещенск, 2018

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

Составитель: Проценко П.П.
Моделирование в электроэнергетике: сборник учебно-методических материалов для направления подготовки «Электроэнергетика и электротехника». – Благовещенск: Амурский гос. Ун-т, 2018. - 26 с.

©Амурский государственный университет, 2018
© Кафедра энергетики, 2018
© Проценко П.П., составитель

СОДЕРЖАНИЕ

Введение 4
1. Краткое изложение лекционного материала 5
2. Методические рекомендации к практическим занятиям 18
3. Методические указания для самостоятельной работы студентов 22
Список литературы 25

ВВЕДЕНИЕ

Сборник учебно-методических материалов предназначен для студентов, обучающихся по направлению подготовки «Электроэнергетика и электротехника», при освоении дисциплины «Моделирование в электроэнергетике».

Целями освоения дисциплины «Моделирование 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 в электроэнергетике» предусмотрена учебным планом. Включает в себя два модуля:

1. Теория математического моделирования.
2. Моделирование элементов электроэнергетических систем.

Сборник учебно-методических материалов состоит из разделов:

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

1. КРАТКОЕ ИЗЛОЖЕНИЕ ЛЕКЦИОННОГО МАТЕРИАЛА

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

Модуль 1 «Теория математического моделирования»

Тема 1. Моделирование при решении инженерных задач: модели и объекты моделирования.

Содержание темы: Решение задач и моделирование. Классификация моделей. Переменные в математических моделях Адекватность и эффективность математических моделей. Свойства объектов моделирования. Математические модели на микроуровне. Моделирование на макроуровне. Моделирование на метауровне.

Краткие теоретические сведения

Моделирование представляет собой универсальный и эффективный метод познания окружающего мира. Процесс решения любой задачи неразрывно связан с формированием того или иного вида модели. Модель – это материальный или мысленно представляемый объект, который в процессе познания (изучения) замещает объект-оригинал, сохраняя при этом наиболее типичные его черты, характерные для решаемой задачи.

При построении модели учитываются только те факторы, которые наиболее существенны для проводимого исследования. Следовательно, фундаментальным свойством модели является то, что она всегда беднее объекта-оригинала.

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.

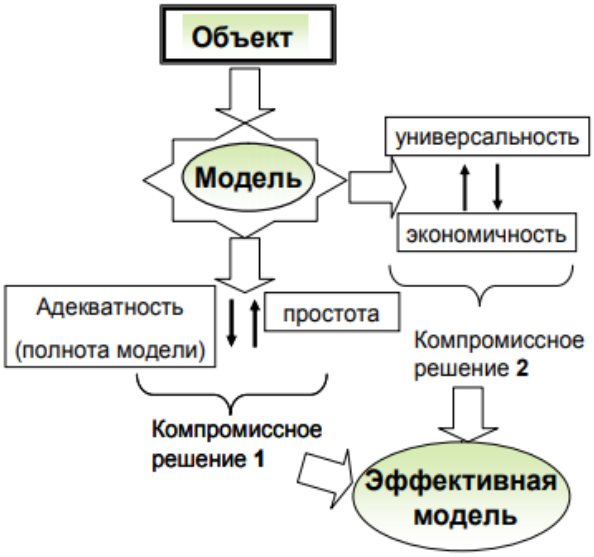


Рис. 1.1 - Процедура формирования эффективной модели

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 удается 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 макромодели. *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 $T_м$ и памяти $П_м$ при использовании модели.

Тема 2. Математические модели элементов электроэнергетических систем: моделирование линий электропередач

Содержание темы: Конструктивное выполнение и свойства линии электропередачи. Математическая модель линии с распределенными параметрами. Математические модели линии в виде схем замещения. Упрощенные модели ЛЭП.

Краткие теоретические сведения

Система электроснабжения – это подсистема энергосистемы, обеспечивающая комплексное электроснабжение промышленных, транспортных, коммунальных и сельскохозяйственных потребителей данного района.

СЭС, состоящая из сетей напряжением до 1000 В и выше, трансформаторных, распределительных и преобразовательных подстанций, служит для обеспечения требований производства путем подачи электроэнергии от источника питания к месту потребления в необходимом количестве и соответствующего качества в виде переменного тока, однофазного или трехфазного, при различных частотах и напряжениях, и постоянного тока.

Работа ЭЭС, прежде всего, характеризуется значениями мощностей (и, соответственно, энергии), вырабатываемых, преобразуемых и потребляемых всеми ее элементами. Чтобы дать математическое описание системы, надо в виде математической модели представить все связи между переменными величинами процессов. Изучение этих процессов, включая их математическую интерпретацию, направлено на обеспечение лучшей работы системы, основная задача которой – выработка электроэнергии и обеспечение ею потребителей. Элементами ЭЭС являются генераторы, силовые трансформаторы, линии электропередачи и другие элементы, установленные на электростанциях и подстанциях. Генераторы вырабатывают электроэнергию напряжением 6-20 кВ. Передача большой мощности на таком напряжении на дальние расстояния неэкономична ввиду значительных потерь мощности, а следовательно, и энергии. Для их снижения напряжение повышают до 35- 1150 кВ. С этой целью устанавливают повышающие трансформаторы. На повышенном напряжении электроэнергия поступает к промышленному району, где на узловой районной подстанции (УРП) происходит распределение электроэнергии по промышленным предприятиям и другим потребителям электроэнергии. На УРП обычно несколько уровней напряжения. Выбирается экономичный уровень для каждого крупного потребителя, и с помощью линий электропередачи электроэнергия подается на него. Электроприемники предприятия рассчитаны на меньшие номинальные напряжения, поэтому на подстанциях потребителя устанавливают трансформаторы, понижающие напряжение до 6-20 кВ. На этом напряжении работают мощные электроприемники (ЭП) – электродвигатели насосов, компрессоров, прокатных станов, дуговые сталеплавильные печи и т.д.

Линии электропередач чаще всего в расчетах представляются П-образной схемой замещения.

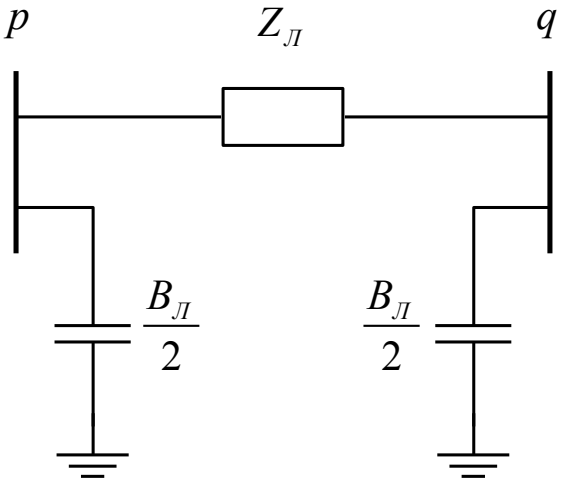


Рис. 2.1. Схема замещения ЛЭП

Тема 3. Математические модели элементов электроэнергетических систем: моделирование трансформаторов и электрической нагрузки

Содержание темы: Конструктивное выполнение и принцип действия силового трансформатора. Электрические и магнитные свойства и параметры силового трансформатора. 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

Трансформатором называют статическое электромагнитное устройство, имеющее две или большее число индуктивно связанных обмоток и предназначенное для преобразования посредством электромагнитной индукции одной или нескольких систем переменного тока в одну или несколько других систем переменного тока.

Трансформаторы широко используют для следующих целей.

1. Для передачи и распределения электрической энергии. Обычно на электростанциях генераторы переменного тока вырабатывают электрическую энергию при напряжении 6—24 кВ.

2. Для питания различных цепей радио- и телевизионной аппаратуры; устройств связи, автоматики в телемеханики, электробытовых приборов; для разделения электрических цепей различных элементов этих устройств; для согласования напряжений

3. Для включения электроизмерительных приборов и некоторых аппаратов, например реле, в электрические цепи высокого напряжения или в цепи, по которым проходят большие токи, с целью расширения пределов измерения и обеспечения электробезопасности. Трансформаторы, применяемые для этой цели, называют *измерительными.* Они имеют сравнительно небольшую мощность, определяемую мощностью, потребляемой электроизмерительными приборами, реле и др.

Многообразие моделей, представляющих генерирующие и нагрузочные узлы, усложняет задачу расчета режимов сложных ЭЭС. Одним из наиболее существенных факторов при этом является способ задания нагрузки в сети. В практике режимных расчетов применяется задание нагрузки постоянными мощностями или токами, постоянными проводимостями или сопротивлениями, статическими характеристиками нагрузки.

Для генерирующих узлов зачастую применяющаяся модель – задание постоянных активной мощности и напряжения на шинах генератора. Трансформаторы представляются для расчетов в виде следующей схемы замещения.

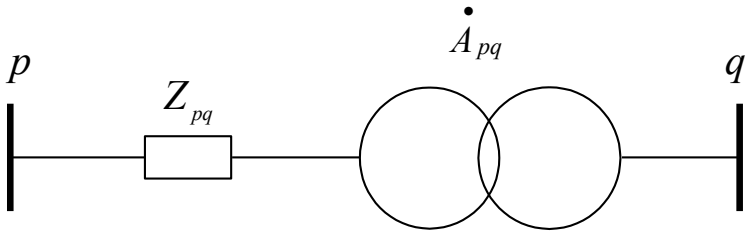


Рис. 3.1. Схема замещения силового трансформатора

Задание нагрузки или генерации в узлах встречается чаще всего в следующем виде.

Таблица 1 - Представление генераторов в узлах

	Задано	Определяется
1	$P,\ Q$	$\lvert U\rvert,\ \delta$
2	$P,\ \lvert U\rvert$	$Q,\ \delta$
3	$\lvert U\rvert,\ \delta$	$P,\ Q$
4	$Q,\ \delta$	$P,\ \lvert U\rvert$

Модуль 2. Моделирование элементов электроэнергетических систем

Тема 4. Моделирование электрических сетей: различные формы записи математических моделей для электрических сетей и их применение

Содержание темы: Основы теории графов. Применение теории графов для моделирования электрических сетей. Матричные формы моделей электрических сетей и их режимов. Узловые уравнения установившегося режима. Формы линейных уравнений установившегося режима и их решение. Нелинейные уравнения установившегося режима.

Краткие теоретические сведения

Электрические сети современных ЭЭС насчитывают сотни и даже тысячи ЛЭП и трансформаторов. Расчеты режимов сложных схем электрических сетей требуют специальных моделей представления схем и компактной записи уравнений. Такими моделями являются графы и матрицы.

Линии, трансформаторы и другие элементы электрической сети представляются в расчетах своими схемами замещения, состоящими из ветвей с сопротивлениями и проводимостями. Все шины электрических станций и подстанций являются узловыми точками сети. Количество этих узловых точек или узлов схемы сети обозначим буквой n, а количество ветвей, соединяющих эти шины, m. Если сеть не содержит замкнутых контуров, то количество узлов и ветвей различается на единицу:

$n = m + 1$.

При наличии контуров

$n = m + 1 - k$,

где k – количество независимых контуров.

Графы являются топологическими моделями схем электрических цепей.

По сути, изображение электрической схемы в виде графа повторяет графическое изображение схемы, но без элементов, из которых состоит электрическая цепь. Узлы (вершины графа) соединяются непрерывными линиями (ребрами), на которых при необходимости указывается положительное направление тока или потока мощности.

Элементами ЭЭС, которые моделируются ребрами графа, являются ЛЭП, трансформаторы, реакторы, батареи конденсаторов и др. Как правило, все они представляются П-образными схемами замещения и поэтому имеют элемент связи между двумя граничными узлами – продольная ветвь, и элементы, связывающие узлы с нейтральной точкой системы N, – поперечные ветви

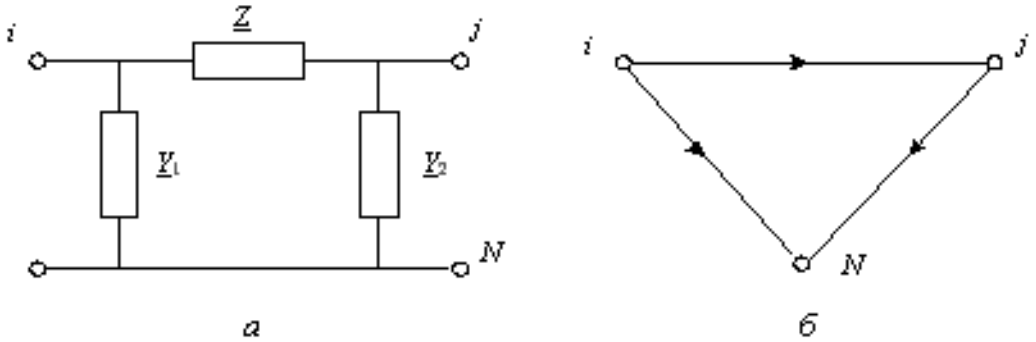


Рис. 4.1. П-образная схема замещения (а) и ее граф (б)

Каждая продольная ветвь в графе электрической сети характеризуется сопротивлением

$\underline{Z}_j = R_j + jX_j$,

а поперечная ветвь – проводимостью

$\underline{Y}_i = G_i + jB_i$ ($j = 1, 2,\ldots, m$; $i = 1, 2,\ldots, n$),

которые образуют матрицы параметров электрической сети – матрицу сопротивлений продольных ветвей и матрицу-столбец проводимостей поперечных ветвей – шунтов:

$$\underline{\mathbf{Z}}_{\text{в}} = \begin{pmatrix} \underline{Z}_{\text{в}11} & & & \\ & \underline{Z}_{\text{в}22} & & \\ & & \dots & \\ & & & \underline{Z}_{\text{в}nn} \end{pmatrix}, \quad \underline{\mathbf{Y}}_N = \begin{pmatrix} \underline{Y}_{N1} \\ \underline{Y}_{N2} \\ \dots \\ \underline{Y}_{Nn} \end{pmatrix}.$$

Здесь $\underline{Z}_{\text{в}jj} = \underline{Z}_j$, а $\underline{Y}_{Ni} = \underline{Y}_i$.

Недиагональные элементы матрицы $\underline{\mathbf{Z}}_{\text{в}}$ обычно равны нулю, хотя в некоторых случаях учитывают взаимные сопротивления ветвей, которые могут быть отличны от нуля, например для близко расположенных ЛЭП возможно наличие взаимной индукции.

Кроме пассивных ветвей в сети существуют активные ветви, включающие источники ЭДС и тока. Эти ветви, как правило, являются поперечными и моделируют генераторы электрических станций (ЭДС) и потребителей электрической энергии (источники тока), – рис. 4.2, *а*.

$$\underline{\mathbf{E}} = \begin{pmatrix} \underline{E}_1 \\ \underline{E}_2 \\ \dots \\ \underline{E}_n \end{pmatrix}, \quad \underline{\mathbf{J}} = \begin{pmatrix} \underline{J}_1 \\ \underline{J}_2 \\ \dots \\ \underline{J}_n \end{pmatrix}.$$

Ветвь с ЭДС в действительности содержит еще и сопротивление и по сути является источником напряжения, которое зависит от нагрузки. В установившемся режиме достигается постоянство значения напряжения генераторов электростанций посредством специальных устройств регулирования и можно пренебречь влиянием сопротивлений генераторов на их напряжение. В дальнейшем будем считать эти ветви источниками ЭДС.

Принято не изображать на графе сети не только шунтирующие проводимости, но и активные поперечные ветви с ЭДС и источником тока, однако источник тока все же задают упрощенным изображением в виде стрелочки, направленной в узел (рис. 4.2, *б*). Это показывает, что в сеть «вливается» извне ток генерации или нагрузки (с обратным знаком). Такие токи называются *токами инъекции* (injection current) или *задающими токами*.

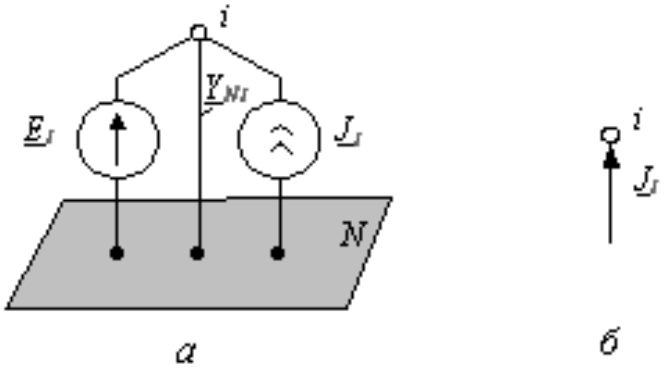


Рис. 4.2. Изображения поперечных ветвей

Матрицы $\underline{\mathbf{E}}$ и $\underline{\mathbf{J}}$ задают режим работы электрической сети и являются векторами *независимых переменных*. Они относятся к режимным параметрам электрической сети. Другие режимные параметры называются *зависимыми переменными*. К ним относятся напряжения в узлах, токи и напряжения в продольных ветвях и ряд других параметров режима:

$\underline{\mathbf{U}}$– матрица напряжений в узлах (узловые напряжения);

$\underline{\mathbf{I}}$ – матрица токов ветвей;

D$\underline{\mathbf{U}}$ – матрица напряжений в ветвях (падения напряжения на сопротивлениях ветвей);

$\underline{\mathbf{S}}_{\text{в}}^{(\text{н})}$ – матрица потоков мощности в начале ветвей;

$\underline{\mathbf{S}}_{\text{в}}^{(\text{к})}$ – матрица потоков мощности в конце ветвей;

D$\underline{\mathbf{S}}_{\text{в}}$ – матрица потерь мощности в ветвях.

Тема 5. Моделирование электрических сетей: применение моделей для решения задач

Содержание темы: Моделирование генераторных узлов электрической сети. Эквивалентирование схем электрических сетей. Моделирование схем электрических сетей с помощью четырехполюсников. Использование четырехполюсников для эквивалентирования схем электрических сетей.

Краткие теоретические сведения

Генераторными узлами называют узлы, в которых генерируется активная мощность. Реактивная мощность, как правило, также генерируется в узлах. Генераторные узлы – это шины электрических станций или шины мощной системы, схема которой не входит в модель для расчетной схемы. Моделируются генераторные узлы по-разному:

· так же, как и узел нагрузки, – постоянными значениями активной и реактивной мощности, но с противоположным знаком;

· постоянным значением активной мощности и фиксированным значением модуля напряжения в узле. Реактивная мощность не известна и подлежит расчету;

· генераторный узел – это базисный и балансирующий узел одновременно. Активная и реактивная мощности узла подлежат вычислению;

· генераторный узел – это базисный узел, но с известными значениями активной и реактивной мощности – заданы все четыре независимых параметра режима – P, Q, U, d;

· генераторный узел – это балансирующий узел, но напряжение в нем не известно ни по модулю, ни по фазе. Подлежат определению все четыре независимых параметра режима – P, Q, U, d.

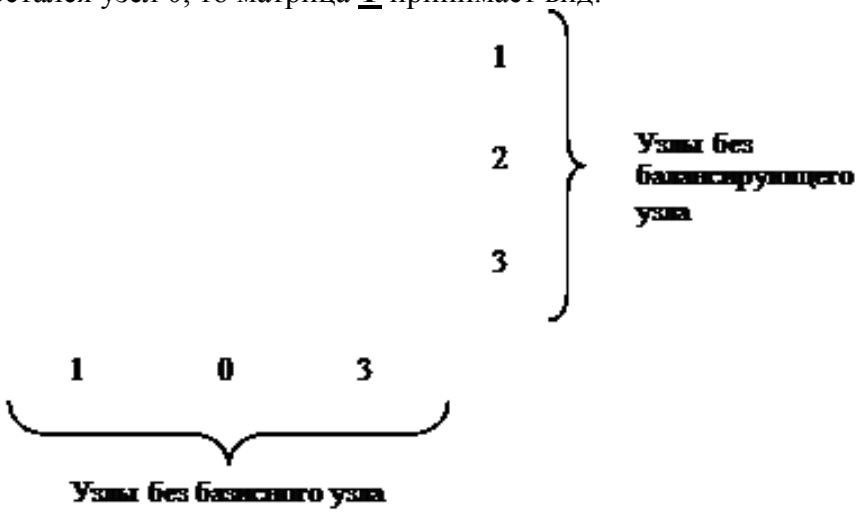
При фиксации активной мощности и модуля напряжения обычно в уравнения установившегося режима входит уравнение для активной мощности узла (3.46) и уравнение вида:

$$U_i^2 = U_i'^2 + U_i''^2,$$

где U_i задано, а U_i' и U_i'' подлежат определению.

В тех случаях, когда для одного из узлов требуется задать все четыре независимых параметра режима – P, Q, U, d (базисный узел), то в сети должен появиться узел, в котором не известен ни один из этих четырех параметров – балансирующий узел. Происходит разделение балансирующего и базисного узлов.

Форма уравнений установившегося режима меняется, а именно – перестраивается матрица узловых проводимостей. Так, например, если для графа сети на рис. 5.1 базисным стал узел 2, а балансирующим остался узел 0, то матрица **Y** принимает вид:



$$\underline{\mathbf{Y}} = \begin{pmatrix} \left(\frac{1}{\underline{Z}_1} + \frac{1}{\underline{Z}_2}\right) & -\frac{1}{\underline{Z}_1} & 0 \\ -\frac{1}{\underline{Z}_2} & -\frac{1}{\underline{Z}_5} & -\frac{1}{\underline{Z}_4} \\ 0 & -\frac{1}{\underline{Z}_3} & \left(\frac{1}{\underline{Z}_3} + \frac{1}{\underline{Z}_4}\right) \end{pmatrix}$$

Пример. Рассчитаем напряжения в узлах электрической сети (рис. 5.2) при несовпадении базисного и балансирующего узлов.

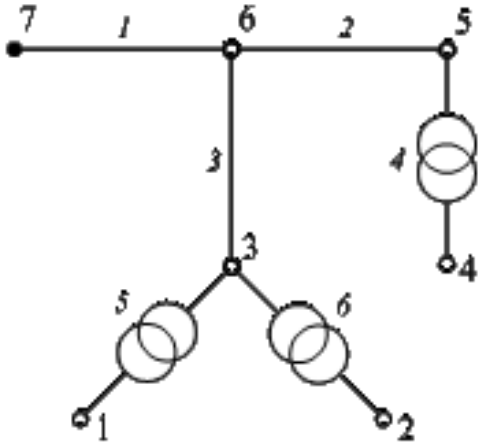


Рис. 5.2. Схема сети примера

Эквивалентирование широко применяется в расчетах режимов сложных электроэнергетических систем. Так, рассматривая режимы работы отдельной ЭЭС, все соседние энергосистемы представляем их эквивалентами, полученными на основании так называемых критериев эквивалентности. Число таких критериев и их содержание зависят от задачи, применительно к которой выполняется эквивалентирование.

Рассмотрим ЭЭС, состоящую из двух подсистем: подсистемы I, которая не подлежит преобразованию, и подсистемы II, которую следует преобразовать в эквивалент

Рис. 5.3. Условное изображение ЭЭС с эквивалентируемой частью:
а – до эквивалентирования; *б* – после эквивалентирования

Узлы, в которых соединяются две подсистемы, называются узлами примыкания, а ветви, подходящие к ним со стороны сохраняемой части схемы, – ветвями примыкания. После преобразования подсистемы II в ней могут сохраниться некоторые узлы, имеющие принципиальное значение для режимов системы, или не сохраниться ни одного узла, как на рис. 5.3, *б*, и вся схема эк-

вивалента представляет собой многоугольник, построенный на узлах примыкания 1, 2,…, *p*. Следует отметить, что эквивалент имеет также поперечные ветви на нейтральную плоскость системы как пассивные – проводимости, так и активные – задающие мощности нагрузки и генерации (на рис. 5.3 не показаны).

Рассчитанные напряжения в узлах примыкания эквивалента должны быть равны в исходной схеме и после ее преобразования.

Часть электрической цепи, рассматриваемая по отношению к двум парам ее выводов, называется четырехполюсником. Ранее здесь использовалось представление четырехполюсником ЛЭП и трансформаторов, однако существует возможность представления в виде четырехполюсника и соединений этих элементов – схем электрических сетей.

Моделирование четырехполюсником удобно применять тогда, когда предметом исследования являются токи (потоки мощности) и напряжения на его выводах, а не токи и напряжения внутри самого четырехполюсника.

По свойству линейности элементов четырехполюсники разделяют на *линейные* и *нелинейные*.

Схема замещения (внутренняя схема соединений) четырехполюсника может быть: Г-образная (рис. 5.4, *а*), Т-образная (рис. 5.4, *б*), П-образная (рис. 5.4, *в*), четырехплечая (рис. 5.4, *г*), П-образная мостовая (рис. 5.4, *д*), Т-образная мостовая (рис. 5.4, *е*) и др.

Четырехполюсник называется *активным*, если он внутри содержит источники электрической энергии, и *пассивным*, если внутри него нет источников энергии.

Различают четырехполюсники *симметричные* и *несимметричные*. Симметричным называют четырехполюсник, когда перемена мест его входа и выхода не изменяет токов и напряжений в цепи, с которой он соединен.

Основной смысл теории четырехполюсников заключается в том, что, пользуясь обобщенными параметрами четырехполюсников, можно находить токи и напряжения на входе и выходе четырехполюсника.

Из множества соединений четырехполюсников в электрических сетях применимы только две: каскадное (рис. 5.4, *а*) и параллельное (рис. 5.4, *б*).

Электрическая сеть, имеющая в общем случае множество узлов и ветвей, может рассматриваться как совокупность четырехполюсников, соединенных по определенной схеме. Отличительной чертой четырехполюсников, моделирующих элементы электрической сети, является наличие у них всех одного общего полюса – нейтральной плоскости, и по сути они могут считаться трехполюсниками. Сложность схемы соединения электрической сети и нелинейность, вносимая нагрузками и генераторами, не позволяют широко использовать четырехполюсники для моделирования электрических сетей. Возможны два принципиально различающихся подхода к использованию четырехполюсников:

· моделирование отдельных элементов или их каскадно-параллельного соединения при отсутствии в них источника энергии или нагрузки, заданных нелинейными математическими моделями;

· приближенное представление части электрической сети при наличии нелинейных моделей генерации или нагрузки в виде эквивалентного четырехполюсника.

Последний подход распространяется на моделирование электрических сетей с помощью многополюсников.

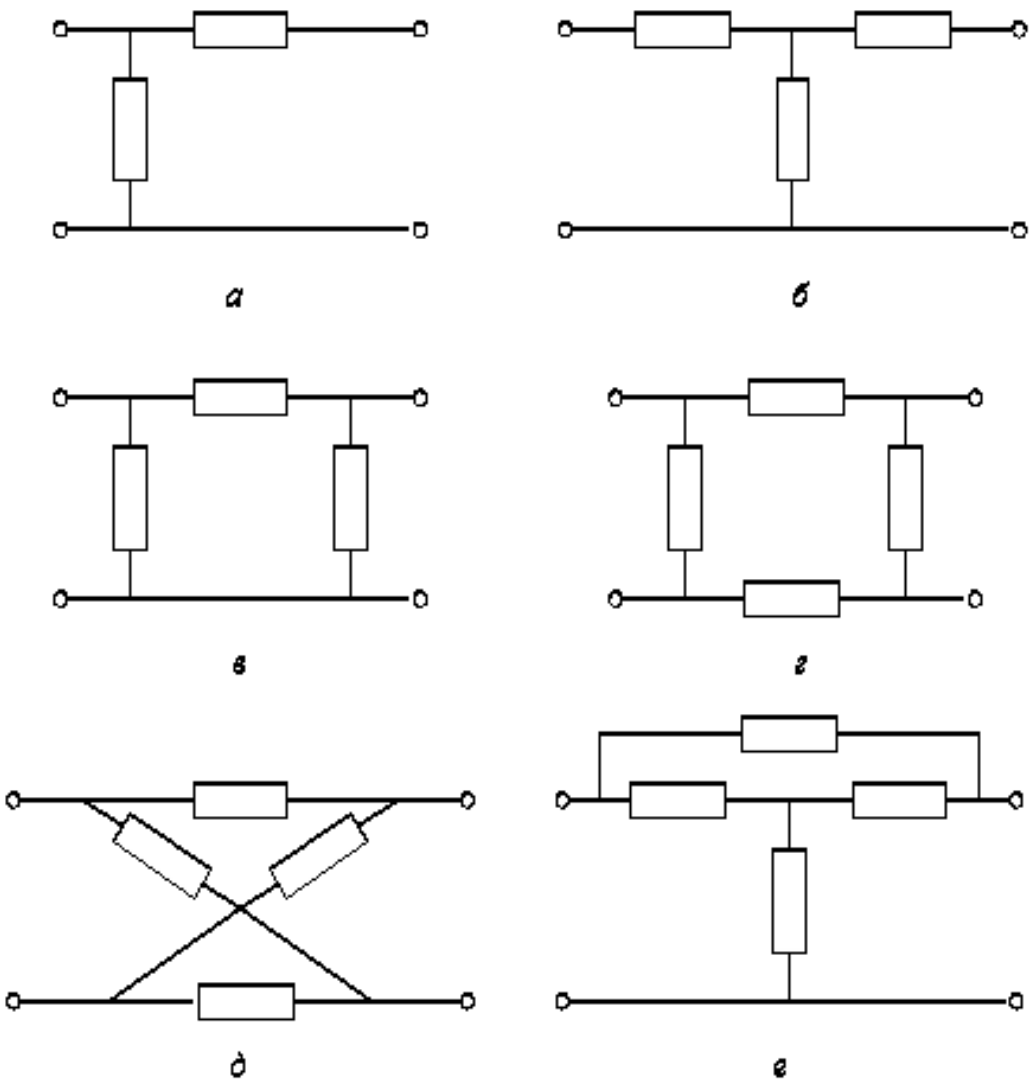


Рис. 5.4. Схемы замещения четырехполюсника

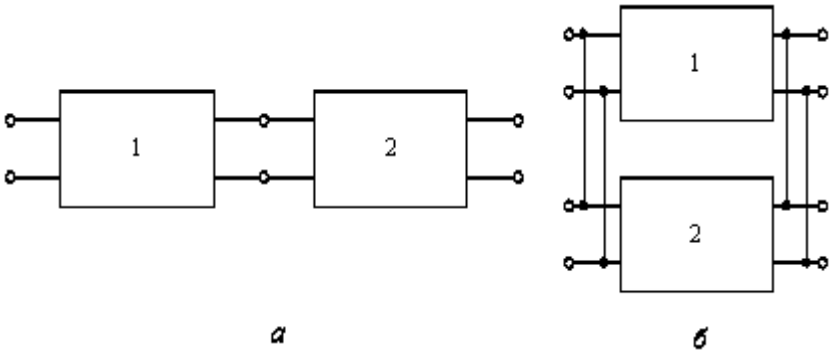


Рис. 5.5. Соединения четырехполюсников:
а – каскадное; *б* – параллельное

Тема 6. Получение математических моделей: описание объектов и методы идентификации

Содержание темы: Процесс описания объектов моделирования. Аналитический метод построения математических моделей. Методы идентификации технических объектов. Выбор структуры математической модели и вычисление ее параметров.

Краткие теоретические сведения

Моделирование как основной научный метод в начальной стадии своего развития был

главным образом предметом искусства исследователя. Процесс построения моделей определялся теоретическим багажом исследователя, его неформальными представлениями о цели работы, опытом, экспериментаторским мастерством и интуицией.

Вместе с тем опыт модельных исследований все более сложных объектов убедительно показывал, что качество модели и особенно трудоемкость ее создания решающим образом зависят от того, сколь целесообразно организован процесс изучения объекта, построения, проверки и практического использования его модельного описания. Возникла задача оптимизации процесса моделирования.

Наибольшее развитие методика и практика планирования и осуществления модельных исследований получили в рамках таких направлений, как исследование операций и прикладной системный анализ.

В сложных случаях, когда невозможно составить модели с помощью известных теоретических представлений, получили развитие экспериментальные исследования, названные идентификацией объектов. Применительно к этим исследованиям зародилась и стала стремительно развиваться теория оптимального планирования эксперимента, обеспечивающая получение необходимой экспериментальной информации об объекте при минимальной затрате сил и средств.

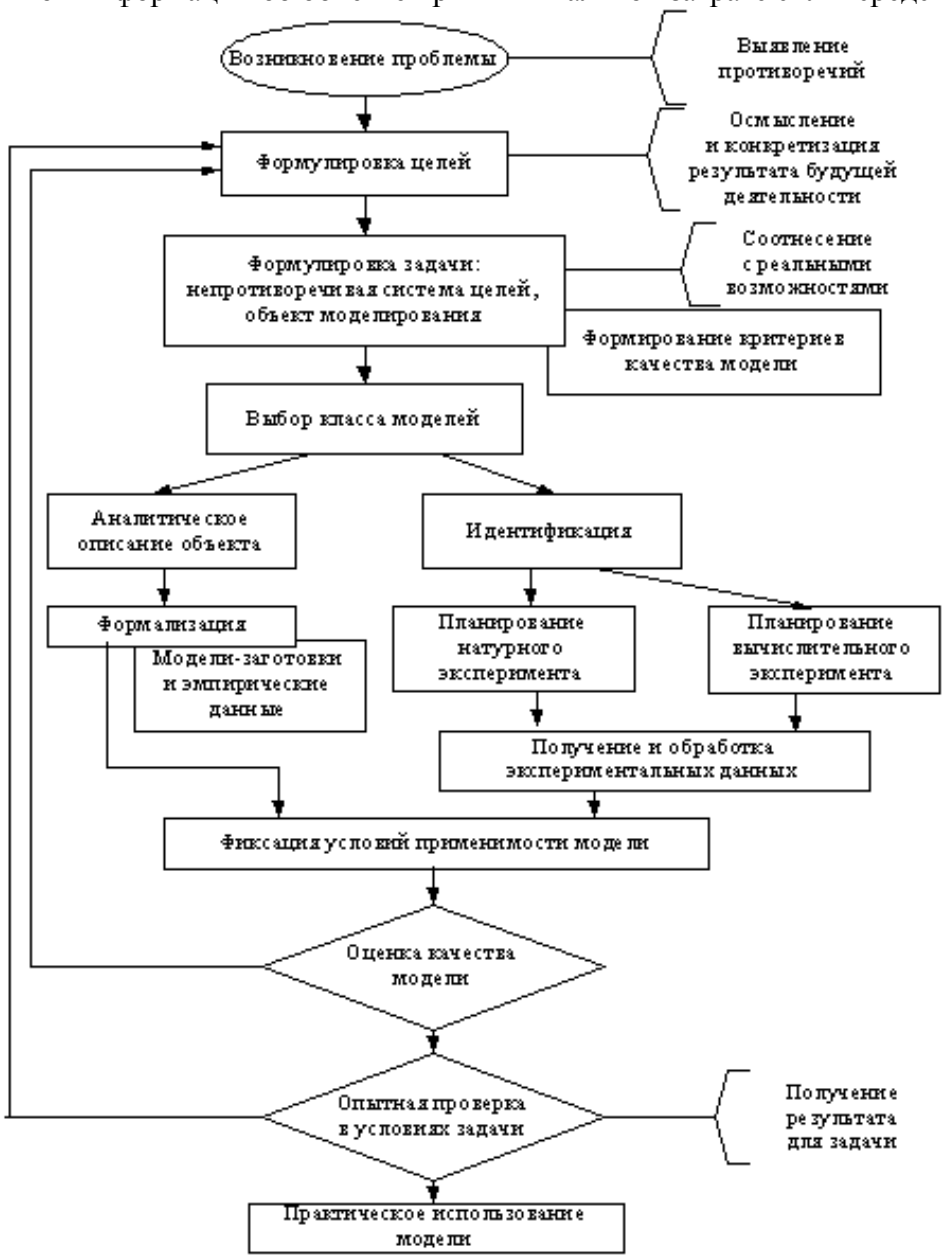


Рис. 6.1. Схема формирования модели

Так, огромное большинство технических и технологических проблем формируется в сфере экономики и экологии – верхних по отношению к технике уровнях системы природа–общество.

Осмысление и конкретизация проблемы приводят к формулировке целей или системы целей как желательного результата будущей деятельности по решению проблемы. Однако поставленная цель, естественно, должна быть соотнесена с реальными возможностями ее достижения или, иными словами, с ресурсами (материальными и другими), которые могут быть использованы для решения данной проблемы. Сопоставление первоначально намеченных целей с ресурсными ограничениями (обычно приводящими к корректировке первых в сторону их сужения) приводит к формулировке задачи исследования, которая помимо непротиворечивой системы целей, учитывающих ресурсные возможности, включает в себя объект моделирования.

Остановимся на наиболее важных особенностях процесса моделирования в целом.

1. Построение модели представляет собой не однократный акт, а процесс последовательных приближений, в основе которого лежит самообучение исследователя.

2. Процесс моделирования соединяет в себе требования к ясно понимаемому существу решаемой задачи, с одной стороны, и активному владению теорией, математическим аппаратом и методами – с другой стороны. Кроме того, необходимы хорошие знания возможностей вычислительной техники и ее использования.

3. Процесс построения модели является познавательной деятельностью и представляет собой важнейшую составную часть решения задачи в целом.

В распоряжении исследователя, решающего на основе моделирования конкретную задачу, сегодня находится огромное множество моделей-«заготовок», которые могут и должны быть использованы. Все эти заготовки получены на основе универсальных законов, таких, как закон сохранения вещества и энергии, начала термодинамики, закон всемирного тяготения. Однако вопрос о том, каким может быть удельный вес теоретической составляющей при построении каждой конкретной модели, целиком определяется требованиями задачи и характером объекта моделирования.

Возможность и рациональность теоретического подхода к моделированию некоторого объекта определяются целым рядом практически не поддающихся формальному анализу факторов, к числу которых относятся:

· степень изученности данного класса объектов и наличие теоретической базы, достаточной для модельного описания объекта в соответствии с требованиями решаемой задачи;

· приемлемость ограничений и допущений, содержащихся в исходных теоретических построениях, применительно к условиям и требованиям решаемой задачи;

· специфические свойства объекта-оригинала (степень сложности и размерность модели, возможность линеаризации, возможность и удобство применения стандартных, например частотных, методов для исследования модели объекта и т. п.);

· возможность и удобство введения в теоретическую модель необходимой дополнительной информации, получаемой опытным путем;

- возможность экспериментального исследования объекта-оригинала.

В основе аналитических моделей, как правило, лежат балансовые соотношения, связывающие входные и выходные переменные. Эти соотношения представляют собой частные проявления законов сохранения вещества и энергии.

Тема 7. Задачи прогнозирования в энергетике: основы прогнозирования различных процессов

Содержание темы: Физические процессы и их характеристики. Случайные процессы. Методологические основы прогнозирования. Экспоненциальная модель прогнозирования. Логистическая модель прогнозирования. Прогнозирование случайных процессов . Прогнозирование суточных графиков нагрузки. Анализ временных рядов.

Краткие теоретические сведения

Решение любых задач с применением теории вероятностей в тех случаях, когда используется их статистическое определение, невозможно без получения соответствующего статистического

материала, базирующегося на большом количестве опытов или наблюдений. При исследовании случайных процессов в реальных условиях обычно имеют дело не с бесчисленным множеством значений случайной величины, называемым генеральной совокупностью, а с ограниченным числом её возможных значений, называемым выборкой из генеральной совокупности.

Следовательно, возникают задачи, связанные с правильной обработкой статистических материалов, т.е. выборкой из генеральной совокупности, и приданием им формы, удобной для последующего применения методов теории вероятностей.

Раздел теории вероятностей, занимающийся регистрацией, обработкой и анализом статистических данных, называют математической статистикой.

Какие же задачи электроэнергетики решают с помощью математической статистики? К ним можно отнести следующий круг задач:

1. Исследование параметров режима систем электроснабжения.
2. Анализ качества электроэнергии.
3. Определение электрической нагрузки и электропотребления.
4. Прогнозирование электропотребления.
5. Определение спроса на электроэнергию.
6. Анализ токов короткого замыкания.
7. Анализ работы изоляции электроустановок при воздействии рабочего напряжения и перенапряжений.
8. Анализ повреждаемости электроустановок и определение надежности систем электроснабжения.

Для изучения любой науки необходимо знать её методологию. Методология научного экономического предвидения включает совокупность принципов, методов и показателей, применяемых в процессе прогнозирования и планирования.

Принцип прогнозирования характеризует основное исходное положение или идею теории. К основным принципам прогнозирования относятся: системность, согласованность, вариантность, непрерывность, верифицируемость, т.е. определение достоверности, и эффективность.

Системность в прогнозировании означает требование взаимосвязанности и соподчинённости объекта, фона и элементов прогнозирования.

Согласованность в прогнозировании означает необходимость согласования поисковых и нормативных прогнозов различной природы (признаков) и различного срока упреждения времени.

Вариантность в прогнозировании означает требование разработки вариантов прогнозов, исходя из вариантов прогнозного фона.

Принцип непрерывности заставляет производить корректировку прогноза по мере поступления новой информации об объекте прогнозирования.

Верифицируемость означает потребность в достоверности, точности и обоснованности прогноза.

Эффективность (или рентабельность) прогнозирования определяет необходимость превышения экономического эффекта от использования прогноза над затратами по его разработке.

Основные исходные положения теории прогнозирования не исчерпываются указанными принципами. Определённые требования предъявляются и к разработке отдельных элементов прогноза. Так, один из элементов прогнозирования - анализ - должен проводиться с учётом таких принципов, как природная специфичность, оптимизация описания объекта прогнозирования, аналогичность и др.

В прогнозировании большое значение имеет выбранный метод, а также приём. Приём прогнозирования - это одна или несколько математических или логических операций, направленных на получение конкретного результата при прогнозировании. В качестве примеров таких приёмов можно назвать сглаживание или выравнивание динамического ряда, расчёт средневзвешенного значения величин.

2. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ К ПРАКТИЧЕСКИМ ЗАНЯТИЯМ

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

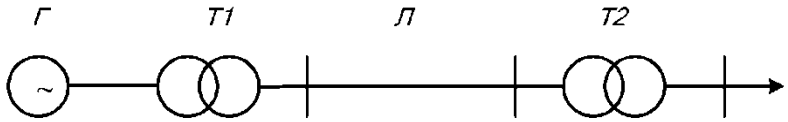
К практическим занятиям требуется предварительная подготовка по рассматриваемой теме для чего необходимо прорабатывать лекционный материал и соответствующие разделы рекомендуемых источников информации.

Практическое занятие 1. *«*Классификация моделей. Переменные в математических моделях Адекватность и эффективность математических моделей*»*

Задание. Представить в табличной форме сравнительную характеристику моделей. Описать на примере основные требования к математической модели.

Практическое занятие 2. *«*Прогнозирование случайных процессов*»*

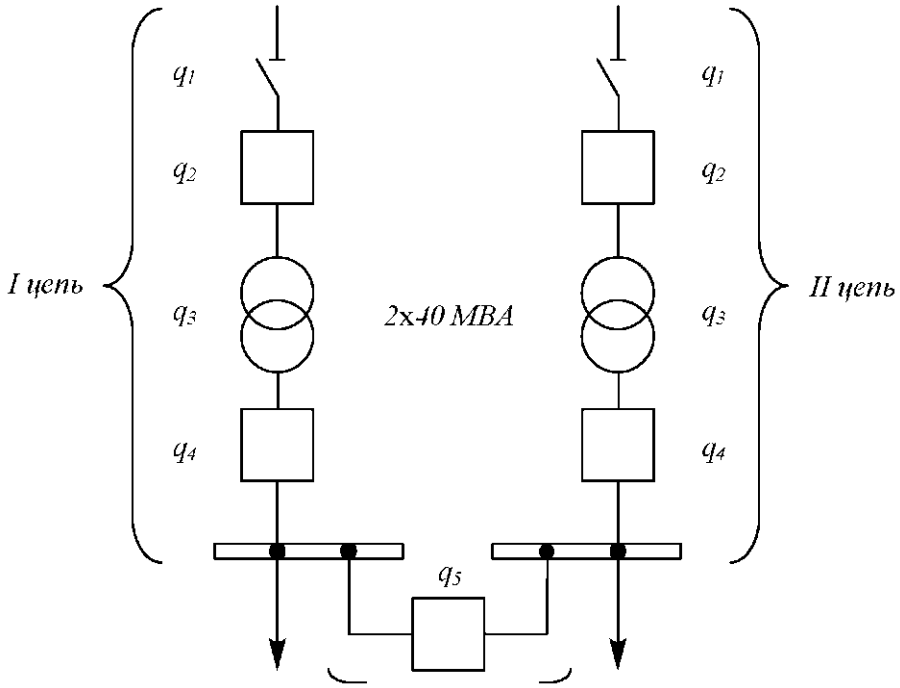
Задание 2.1. Определить вероятность перерыва в электроснабжении в схеме, представленной на рисунке.



Известны вероятности отказов элементов схемы:

$$q_{Г} = 2 \cdot 10^{-3}; \quad q_{T1} = 5 \cdot 10^{-5}; \quad q_{Л} = 2 \cdot 10^{-3}; \quad q_{T2} = 4 \cdot 10^{-5}.$$

Задание 2.2. Определить вероятность возможных дефицитов мощности в схеме, приведенной на рисунке, и вероятность передачи потребителю требуемой мощности.



Нагрузка S_H = 50 МВА.

Практическое занятие 3. *«*Математическая модель линии с распределенными параметрами. Математические модели линии в виде схем замещения. Упрощенные модели ЛЭП»

Задание. Изучить модели ЛЭП. Для различных моделей ЛЭП вычислить распределение величины тока и напряжения вдоль ЛЭП при холостом ходе и при передаче мощности меньше и больше натуральной. Выполнить графическое построение графиков тока и напряжения для различных моделей и вычислить погрешности относительно Модели длинной линии с распределенными параметрами.

Практическое занятие 4. *«*Электрическая нагрузка: статические характеристики электрической нагрузки и моделирование электрических нагрузок*»*

Задание. Найти коэффициенты статической характеристики нагрузки по опытным данным для активной и реактивной мощности и определить их регулирующие эффекты.

Используем линейную модель для активной мощности и параболу для реактивной мощности. Построение характеристик выполним в Mathcad.

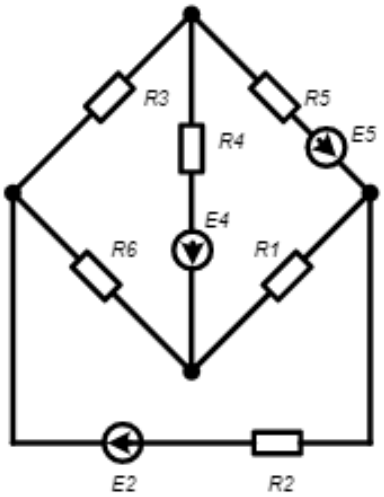
Все величины приведены в относительных единицах.

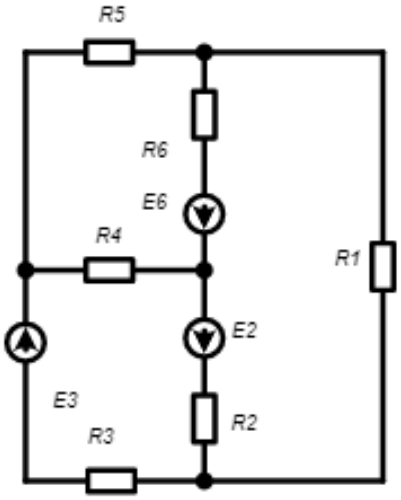
Исходные данные (результаты эксперимента):

$$D := \begin{pmatrix} 0.82 & 0.82 & 0.61 \\ 0.86 & 0.86 & 0.69 \\ 0.91 & 0.93 & 0.79 \\ 0.95 & 0.96 & 0.90 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1.05 & 1.04 & 1.13 \\ 1.09 & 1.09 & 1.27 \\ 1.14 & 1.13 & 1.41 \end{pmatrix} \qquad U := D^{\langle 0 \rangle} \qquad P := D^{\langle 1 \rangle} \qquad Q := D^{\langle 2 \rangle}$$

Практическое занятие 5. *«*Применение теории графов для моделирования электрических сетей*»*

Задание. По заданной схеме изобразить граф электрической схемы, выделить дерево графа и связи, пронумеровать ветви графа, присвоив ветвям дерева первые порядковые номера. Составить матрицу соединений и матрицу контуров.



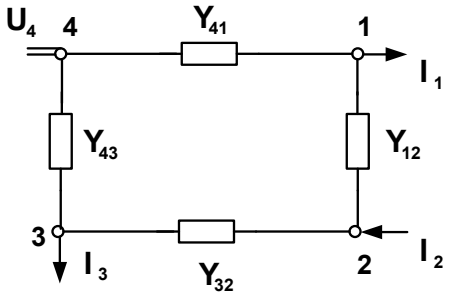


Практическое занятие 6. *«*Матричные формы моделей электрических сетей и их режимов*»*

Задание. По заданным параметрам схемы Практического занятия 6 рассчитать токи ветвей схемы, используя матричный метод узловых потенциалов. Рассчитать токи ветвей схемы, используя матричный метод контурных токов. Параметры схемы R_1 = 15 Ом; R_2 = 27 Ом; R_3 = 8 Ом; R_4 = 16 Ом; R_5 = 12 Ом; R_6 = 4 Ом; E_2 = 52 В; E_6 = 44 В.

Практическое занятие 7. *«*Формы линейных уравнений установившегося режима и их решение*»*

Задание. Записать в матричном виде линейную систему уравнений узловых напряжений для сети переменного тока, представленной на рисунке.

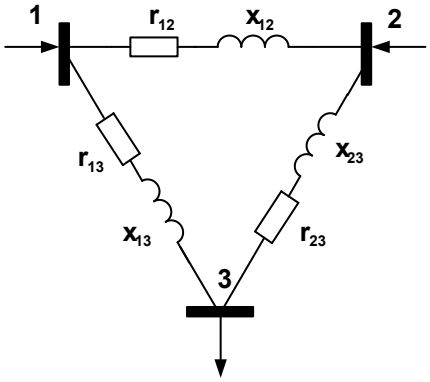


Практическое занятие 8. *«*Моделирование генераторных узлов электрической сети»

Задание. Определить напряжения узлов для схемы, представленной на рисунке, по следующим исходным данным методом матрицы Z. Схема состоит из трёх ЛЭП, генераторных узлов *1, 2* и нагрузочного узла *3*. Сопротивления линий следующие: $Z_{12} = 10 + j20$ Ом; $Z_{13} = 15 + j30$ Ом; $Z_{23} = 10 + j25$ Ом. Узел *1* принят в качестве балансирующего и базового, его напряжение $U_1 = U_б = 115$ кВ. Заданные токи в узлах *2* и *3* соответственно равны:

$$\dot{I}_3 = \dot{I}_{a3} + jJ_{r3} = \frac{1}{\sqrt{3}}\left(-0.4199 + j0.2099\right)[кА];$$

$$\dot{I}_2 = \dot{I}_{a2} + jJ_{r2} = \frac{1}{\sqrt{3}}\left(0.2624 + j0.1575\right)[кА]$$



Практическое занятие 9. *«*Моделирование схем электрических сетей с помощью четырехполюсников. Использование четырехполюсников для эквивалентирования схем электрических сетей*»*

Задание. Выполнить расчет параметров эквивалентной схемы замещения для расчетной

схемы, приведенной на рисунке.

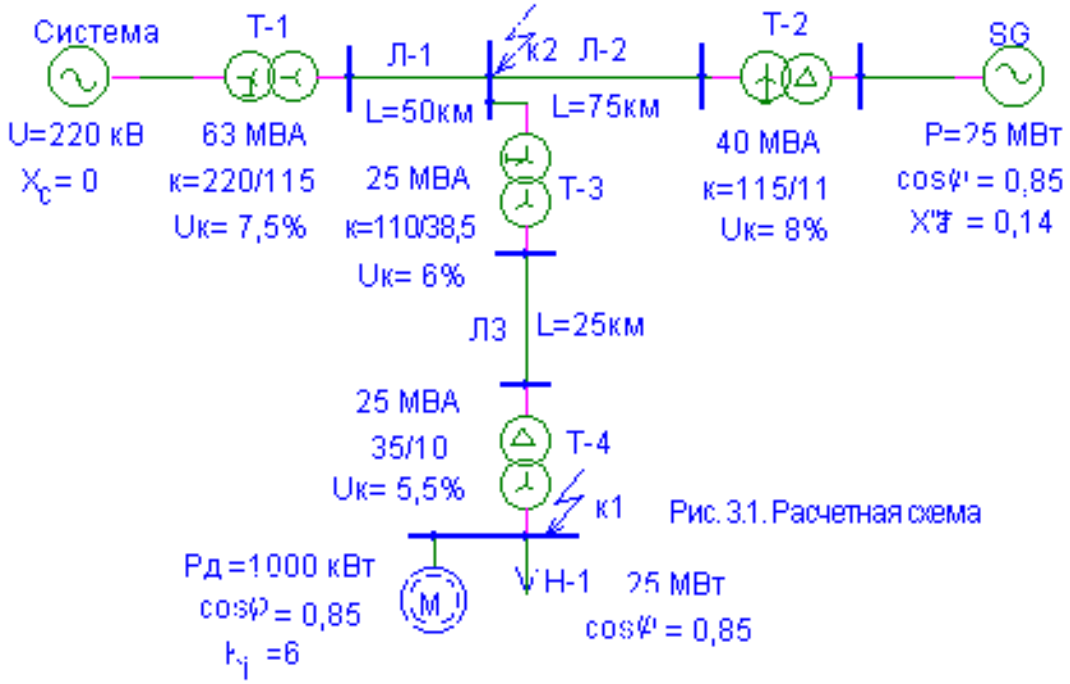


Рис. 3.1. Расчетная схема

Практическое занятие 10. «Экспоненциальная модель прогнозирования. Логистическая модель прогнозирования»

Задание. Имеются данные, характеризующие уровень потерь электрической энергии на предприятии, %

Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь
2,99	2,66	2,63	2,56	2,40	2,22	1,97	1,72	1,56	1,42

- Постройте прогноз уровня потерь на ноябрь, декабрь, январь месяцы, используя методы: скользящей средней, экспоненциального сглаживания, наименьших квадратов.
- Рассчитайте ошибки полученных прогнозов при использовании каждого метода.
- Сравните полученные результаты, сделайте выводы.

3. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ СТУДЕНТОВ

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. При этом специфика самостоятельной работы студентов заключается в том, чтобы студенты самостоятельно получали новые знания. Из этого можно сделать следующий вывод. Самостоятельная работа студентов – это практическое занятие (семинар, практикум) с использованием различных методов обучения с использованием индивидуальных или групповых заданий, на котором студенты 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 при групповой консультации.

Разъяснение является основным содержанием данной формы занятий, наиболее сложных вопросов изучаемого программного материала. Цель – максимальное приближение обучения к практическим интересам с учетом имеющейся информации и является результативным материалом закрепления знаний.

Групповая консультация проводится в следующих случаях:

когда необходимо подробно рассмотреть практические вопросы, которые были недостаточно освещены или совсем не освещены в процессе лекции;

с целью оказания помощи в самостоятельной работе (выполнение задач, сдача зачета, подготовка к докладу).

Указания студентам 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 в электроэнергетике».

Указания студентам при подготовке к зачету.

При подготовке к зачету необходимо пользоваться списком контрольных вопросов, имеющихся в рабочей программе дисциплины. Ответы на большую часть вопросов можно найти в кон-

спекте 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 студентов по дисциплине предусматривается в форме:
- выполнения заданий по темам практических занятий;
- проработка лекционного материала;
- выполнение заданий для самостоятельной работы;
- подготовка к блиц-опросам;
- подготовка к зачету.

Модуль 1 «Теория математического моделирования»

Тема 1. Моделирование при решении инженерных задач: модели и объекты моделирования.

Вопросы «Блиц-опроса»

1. Основные требования к модели.
2. Перечислить свойства объектов моделирования.
3. Дайте характеристику уровней математического моделирования.
4. Привести классификацию моделей.
5. Дать понятие адекватности и эффективности модели.

Тема 2. Математические модели элементов электроэнергетических систем: моделирование линий электропередач.

Вопросы «Блиц-опроса»

1.Виды конструктивного исполнения линий электропередач.
2. Свойства линий электропередач.
3. Какая линия называется линией с распределенными параметрами?
4. Что представляет собой схема замещения линии электропередач.
5. Математическая модель линии с распределенными параметрами.

Тема 3. Математические модели элементов электроэнергетических систем: моделирование трансформаторов и электрической нагрузки.

Вопросы «Блиц-опроса»

1. Основные элементы конструкции силового трансформатора.
2. Электрические и магнитные свойства силового трансформатора.
3. Г-образная схема замещения силового трансформатора.
4. П-образная схема замещения силового трансформатора.
5. Основы моделирования электрической нагрузки.

Модуль 2. Моделирование элементов электроэнергетических систем

Тема 4. Моделирование электрических сетей: различные формы записи математических моделей для электрических сетей и их применение.

Вопросы «Блиц-опроса»

1. Дайте понятие графа.
2. Опишите систему электроснабжения в соответствии с теорией графов.
3. Матричные формы моделей электрических сетей и их режимов.
4. Формы линейных уравнений установившегося режима.
5. Нелинейные уравнения установившегося режима.

Тема 5. Моделирование электрических сетей: применение моделей для решения задач.

Вопросы «Блиц-опроса»

1. Дайте пример эквивалентирования схемы простейшей электрической сети.

2. Понятие четырехполюсника.
3. Примеры использования четырехполюсников для эквивалентирования.
4. Как осуществляется моделирование генераторных узлов электрической сети.
5. Порядок расчета четырехполюсника.

Тема 6. Получение математических моделей: описание объектов и методы идентификации.

Вопросы «Блиц-опроса»

1. Дайте понятие и характеристику объекта моделирования.
2. Суть аналитического метода математического моделирования.
3. Методы идентификации технических объектов.
4. Выбор структуры математической модели.
5. Вычисление параметров структуры математической модели.

Тема 7. Задачи прогнозирования в энергетике: основы прогнозирования различных процессов.

Вопросы «Блиц-опроса»

1. Физические процессы и их характеристики.
2. Случайные процессы. Примеры в электроэнергетике.
3. Экспоненциальная модель прогнозирования.
4. Логистическая модель прогнозирования.
5. Суть и задачи прогнозирования суточных графиков нагрузки.

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. 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
3. 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
4. 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
5. 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.
6. 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
7. Справочник по проектированию электрических сетей / под ред. Д.Л. Файбисовича. – 3-е изд., перераб. И доп. – М.: ЭНАС, 2009. – 391 с.
8. 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

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

Моделирование в электроэнергетике
Сборник учебно-методических материалов

Из-тво АмГУ. Формат 60x84/16.