

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«КАЛИНИНГРАДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Д. К. Кугучева

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ

Учебно-методическое пособие – локальный электронный методический материал по практическим занятиям для студентов бакалавриата по направлению подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника

Калининград
Издательство ФГБОУ ВО «КГТУ»
2022

УДК 621.311

Рецензент

кандидат технических наук, доцент кафедры энергетики
ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет»
М. С. Харитонов

Кугучева, Д. К.

Математические задачи электроэнергетики: учебно-методическое пособие – локальный электронный методический материал по практическим занятиям для студентов бакалавриата по направлению подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника / **Д. К. Кугучева.** – Калининград: ФГБОУ ВО «КГТУ», 2022. – 55 с.

В учебно-методическом пособии по практическим занятиям представлены практические задания и Методические рекомендации: по их выполнению, а также задания и вопросы для самостоятельной работы. Практические занятия предназначены для закрепления теоретического материала и приобретения навыков выполнения расчетов в сфере электроэнергетики.

Рисунков - 10, таблиц - 3, список литературы – 10 наименований.

Локальный электронный методический материал. Учебно-методическое пособие. Рекомендовано к использованию в учебном процессе методической комиссией института морских технологий, энергетики и строительства 23.12.2022 г., протокол № 03

УДК 621.311

© Федеральное государственное
бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Калининградский государственный
технический университет», 2022 г.
© Кугучева Д. К., 2022 г.

Содержание

Введение	3
Практическая работа № 1 «Применение математического моделирования для решения электротехнических задач»	5
Практическая работа № 2 «Математические модели ЛЭП. Исследование режима холостого хода ЛЭП»	12
Практическая работа № 3 «Математические модели ЛЭП. Исследование режимов передачи мощности по ЛЭП»	17
Практическая работа № 4 «Расчет установившегося режима ЭЭС на основе линейных математических моделей»	20
Практическая работа № 5 «Расчет установившегося режима ЭЭС на основе нелинейных математических моделей»	27
Практическая работа № 6 «Математические методы анализа статической устойчивости установившихся режимов ЭЭС»	33
Приложение 1	41
Рекомендуемая литература	53

Введение

Дисциплина «Математические задачи электроэнергетики» обеспечивает формирование у обучающихся готовности к использованию системы знаний в области электроэнергетики.

Целью освоения дисциплины является знакомство с основными принципами математических задач электроэнергетики.

Задачи изучения дисциплины:

- изучение основных понятий, методов, приемов физико-математического аппарата и математического моделирования электроэнергетических режимов;
- приобретение навыков анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования при решении профессиональных задач;
- формирование базовых знаний, умений и навыков для успешного (в т.ч. самостоятельного) освоения различных технологий и программно-вычислительных комплексов.

По завершении изучения дисциплины «Математические задачи электроэнергетики» у обучающегося должны быть сформированы следующие компетенции:

знать:

- основы проектирования электрических станций и подстанций;
- математические модели объектов электроэнергетики;
- методы составления схем замещения электроэнергетических систем и систем уравнений, описывающих процессы в этих системах;
- основы применения в электроэнергетических задачах численных методов решения систем алгебраических и дифференциальных уравнений;

уметь:

- ориентироваться в областях проектирования и эксплуатации;
- практически применять в работе конкретный математический аппарат при исследованиях, проектировании и эксплуатации электроэнергетических систем;

владеть:

- навыками составления схем замещения электроэнергетических систем и расчета систем уравнений, описывающих процессы в этих схемах;
- методами математического и имитационного моделирования в профессиональной деятельности;
- методами расчета установившихся режимов электроэнергетических систем.

Целью пособия по практическим занятиям является развитие знаний, умений и навыков в области составления и расчета математических моделей объектов электроэнергетики.

Задачами освоения пособия по практическим занятиям являются:

- изучение способов применения математического моделирования для решения электротехнических задач;
- изучение принципов расчета установившегося режима электроэнергетической системы;
- изучение автоматических методов анализа статической устойчивости установившихся режимов электроэнергетической системы.

Практическая работа № 1

«Применение математического моделирования для решения электротехнических задач»

Цель практической работы: формирование навыков применения различных видов моделей при решении электротехнических задач в среде Mathcad; исследования возможностей графического моделирования для представления процессов и функций в двухмерном и трехмерном пространствах в среде Mathcad и Excel.

Перечень знаний и умений для достижения цели:

знать:

- схемы замещения и способы построения математических моделей различных электротехнических объектов

уметь:

- пользоваться ПК Mathcad для решения электротехнических задач.

Учебная литература по практической работе:

Моделирование в электроэнергетике [Электронный ресурс]: учеб.пособие / А.Ф. Шаталов, И. Воротников, М. Мастепаненко, и др. ; Министерство сельского хозяйства Российской Федерации, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования Ставропольский государственный аграрный университет. - Ставрополь : Агрус, 2014. - 140 с. (ЭБС «Университетская библиотека онлайн»).

Методические рекомендации:

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 [4]:

- *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).

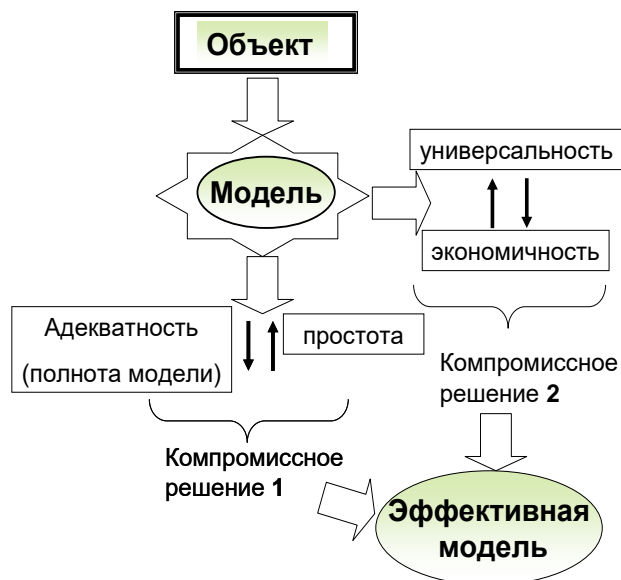


Рис. 1.1. Процедура формирования эффективной модели

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* позво-

ляют описать свойства объекта на языке математики для решения различных исследовательских задач.

В практическом блоке №1 исследуются возможности применения различных форм моделей для решения электротехнических задач с помощью универсальных и специализированных программных систем, таких как *Mathcad*, *Microsoft Excel*.

Исходные данные к задаче

В качестве исходных данных задана схема электрических соединений по вариантам (табл. 1.1, рис. 1.2).

Таблица 1.1 – Исходные данные вариантов для решения практического блока №1

Номер варианта	R_1	R_2	R_3	U	Номер схемы
1	10	15	20	220	Рис. 1.2 а
2	8	16	5	32	Рис. 1.2 б
3	9	14	19	220	Рис. 1.2 а
4	7	15	4	32	Рис. 1.2 б
5	11	16	21	220	Рис. 1.2 а
6	10	18	7	32	Рис. 1.2 б
7	10	17	12	220	Рис. 1.2 а
8	5	8	15	32	Рис. 1.2 б
9	12	17	22	220	Рис. 1.2 а
10	6	14	3	32	Рис. 1.2 б

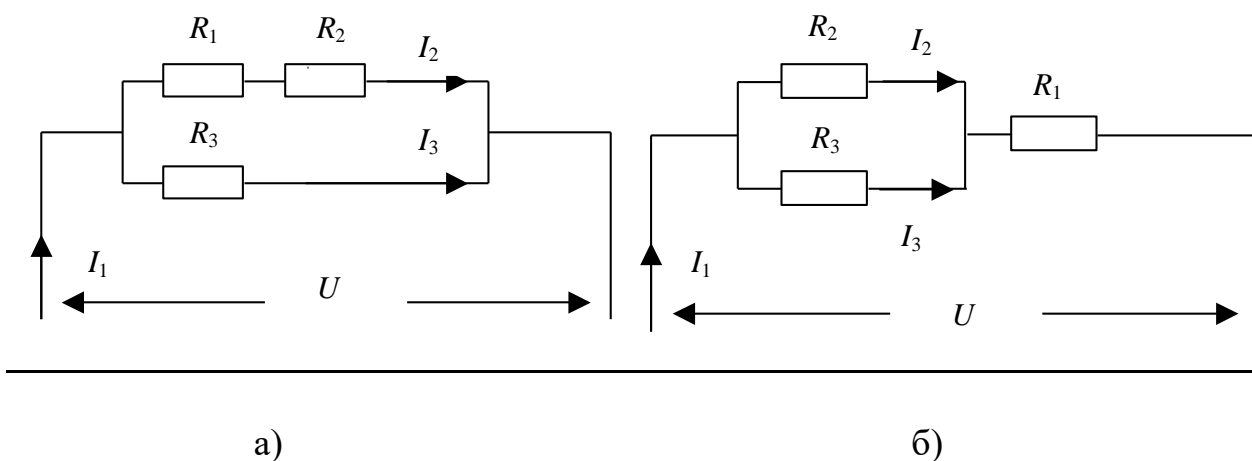


Рис. 1.2 – Исходные данные к практическому блоку №1

Ход работы

▪ Сформировать математическую модель, используя законы Ома и Кирхгофа и рассчитать значения токов I_1, I_2, I_3 в среде *Mathcad*.

▪ Сформировать математическую модель в виде системы уравнений на основе первого и второго законов Кирхгофа и рассчитать значения токов I_1, I_2, I_3 в среде *Mathcad* двумя способами:

⇒ с использованием конструкции $\{Given.....Find\}$;

⇒ с использованием матричного метода.

▪ Задано уравнение, моделирующее переходные процессы в электрической системе, а также функция в трехмерном пространстве.

$$f(t) = \frac{k \cdot \exp(0.11t + 2)}{(13+t)} \sin(t) \quad f1(t) = \frac{k \cdot \exp(0.11t + 2)}{(10+t)} \sin(t)$$

$$f(x, y) = \sin(x^2 + y^2)$$

Сформировать графическую модель в среде *Mathcad*, построив графики переходных процессов на интервале времени $t=0...10$, если коэффициент k принимает два возможных значения: $k_1 = 20, k_2 = 50$.

▪ Сформировать графическую модель процесса, который представлен функцией в трехмерном пространстве. Проанализировать возможности работы с графическими моделями, которые предоставляет *Mathcad*.

▪ Заданы статистические данные о нагрузке предприятия

Вариант № 1

Час	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24
Р, МВт	112	154	136	174	205	275	190	254	269	210	173	157	148

Вариант № 2

Час	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24
Р, МВт	80	87	82	103	127	134	115	140	143	124	109	93	89

Построить график нагрузки в среде *Microsoft Excel*. Проанализировать возможности работы с графическими моделями, которые предоставляет *Microsoft Excel*.

Определить значения математического ожидания и среднеквадратического отклонения нагрузки на заданном интервале, используя встроенные функции *Microsoft Excel*.

- Решить следующие задачи:

Задание 1

Взять модель турбогенератора из справочника Гайсарова Р.В., расшифровать наименование, начертить схему замещения и рассчитать ее в именованных единицах и в относительных единицах.

Задание 2

Определить, в каком соотношении находятся выраженные в омах индуктивные сопротивления генераторов G1 и G2 одинаковой мощности, но с номинальными напряжениями соответственно 6,3 и 10,5 кВ, если их относительные индуктивные сопротивления при своих номинальных условиях одинаковы.

Задание 3

Дан трехобмоточный трансформатор

$$S_{ном} = 40 \text{ МВА}$$

$$U_{ном} = 115 / 38,5 / 10,5 \text{ кВ}$$

$$u_{к\%В-С} = 10,5\% ;$$

$$u_{к\%В-Н} = 17\% ;$$

$$u_{к\%С-Н} = 6\%$$

$$\Delta P_{к} = 230 \text{ кВт}$$

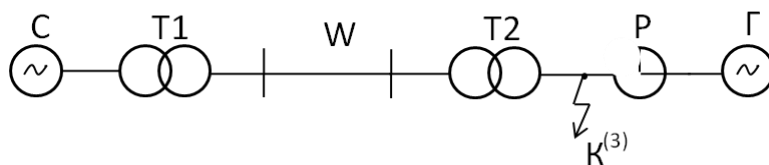
Рассчитать коэффициент трансформации трансформатора и параметры схемы замещения трехобмоточного трансформатора для точки КЗ, расположенной на среднем напряжении. Расчет провести

1. в именованных единицах
2. в относительных единицах

Сделать выводы из расчетов.

Задание 4

Составить математическую модель заданной энергосистемы, рассчитать параметры ее элементов и действующее значение тока КЗ в начальный момент времени.



Исходные данные:

Система (С): $I_{K3}^{(3)} = 15,6$ кА

ЛЭП (W): $l=20$ км, $x_0=0,4$ Ом/км, $r_0=0,156$ Ом/км

Трансформатор (Т1): $S_H=40$ МВА, $U_{НОМ}=115/38,5$ кВ, $u_K=10,5\%$, $P_K=170$ кВт

Трансформатор (Т2): $S_H=80$ МВА, $U_{НОМ}=121/6,3$ кВ, $u_K=10,5\%$, $P_K=315$ кВт

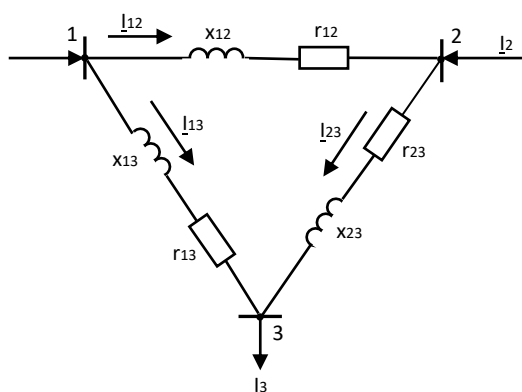
Реактор (Р): $x_{НОМ}=0,105$ Ом/км, $U_{НОМ}=10$ кВ, $I_{НОМ}=4$ кА, $P_K=27,7$ кВт

Генератор (Г): $P_{НОМ}=25$ МВт, $\cos\varphi_{НОМ}=0,8$; $U_{НОМ}=6,3$ кВ, $x_d'' = 0,129$, $x_2=0,158$, $T_a=0,27$ с.

В предшествующем режиме генератор работал с перевозбуждением при номинальной нагрузке.

Задание 5

Составить уравнение узловых напряжений для электрической сети, схема замещения которой приведена на рисунке, рассчитать напряжения в узлах, токи и напряжения в ветвях сети.



В схеме два генераторных узла 1,2 и нагрузочный узел 3.

Сопротивления ветвей следующие:

$$Z_{12} = 10 + j20 \text{ Ом}$$

$$Z_{13} = 15 + j30 \text{ Ом}$$

$$Z_{23} = 10 + j25 \text{ Ом}$$

Узел 1 принят в качестве балансирующего и базисного, напряжение узла равно

$$U_1 = U_\phi = 115 \text{ кВ.}$$

Задающие токи в узлах 2 и 3 соответственно равны

$$\underline{I}_2 = I'_2 + jI''_2 = 0,151 - j0,091 \text{ кА}$$

$$\underline{I}_3 = I'_3 + jI''_3 = 0,242 - j0,121 \text{ кА}$$

Контрольные вопросы

1. Моделирование: характеристика, определение, свойства
2. Области использования математических моделей
3. Принцип выполнения практического задания, основные этапы

Содержание отчета

- 1) Номер практического занятия, тема и цель работы.
- 2) Результаты выполнения практической работы согласно заданию.
- 3) Ответы на контрольные вопросы.

Практическая работа № 2

«Математические модели ЛЭП. Исследование холостого хода ЛЭП»

Цель практической работы: ознакомление со свойствами и математическими моделями ЛЭП, получение навыков исследования объекта по его математической модели.

Перечень знаний и умений для достижения цели:

знать:

- схемы замещения и способы построения математических моделей различных электротехнических объектов

уметь:

- пользоваться ПК Mathcad для решения электротехнических задач.

Учебная литература по практической работе:

Моделирование в электроэнергетике [Электронный ресурс]: учеб.пособие / А.Ф. Шаталов, И. Воротников, М. Мастепаненко, и др. ; Министерство сельского хозяйства Российской Федерации, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования Ставропольский государственный аграрный университет. - Ставрополь : Агрус, 2014. - 140 с. (ЭБС «Университетская библиотека онлайн»).

Методические рекомендации:

Передача электроэнергии по ЛЭП обусловлена распространением электромагнитных волн вдоль проводов. С учетом распределенности параметров линий и изменения токов и напряжений во времени соотношения между токами и напряжения в линии записываются в виде дифференциальных уравнений в частных производных с независимыми переменными времени и одной пространственной координаты. Решение таких уравнений с учетом граничных условий и синусоидальности изменения токов и напряжений во времени записывается в символической форме для действующих значений напряжений и токов по концам ЛЭП:

$$\dot{U}_1 = \dot{U}_2 \operatorname{ch}(\gamma l) + \dot{I}_2 Z_c \operatorname{sh}(\gamma l), \quad (2.1)$$

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{U}_2}{Z_c} \operatorname{sh}(\gamma l) + \dot{I}_2 \operatorname{ch}(\gamma l), \quad (2.2)$$

где \dot{U}_1 и \dot{I}_1 – комплексные действующие значения напряжения и тока в начале линии (со стороны питания);

\dot{U}_2 и \dot{I}_2 – комплексные действующие значения напряжения и тока в конце линии (со стороны нагрузки);

$$\dot{Z}_c = \sqrt{\frac{\dot{z}_0}{\dot{y}_0}} \text{ – волновое сопротивление;}$$

$$\dot{\gamma} = \sqrt{\dot{z}_0 \cdot \dot{y}_0} = \alpha + j\beta \text{ – коэффициент распространения волны;}$$

где α – коэффициент затухания волны;

β – коэффициент фазы;

$\dot{z}_0 = r_0 + jx_0$ – комплексная величина погонного сопротивления фазы ЛЭП;

$\dot{y}_0 = g_0 + jb_0$ – комплексная величина погонной проводимости фазы ЛЭП.

Для идеальной линии $r_0 = 0$, $g_0 = 0$.

Здесь и ниже для трехфазной системы значение тока увеличено в $\sqrt{3}$ раз, поэтому при сопоставлении тока с предельно допустимым его следует делить на $\sqrt{3}$.

Уравнения (2.1) и (2.2) называются уравнениями длинной линии и могут быть представлены как уравнения четырехполюсника (рис. 2.1) через параметры $\dot{A}, \dot{B}, \dot{C}, \dot{D}$.

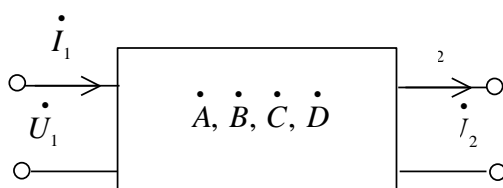


Рис. 2.1. Четырехполюсник

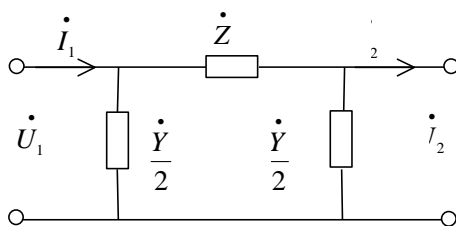


Рис. 2.2. П-образная схема замещения ЛЭП

$$\dot{U}_1 = \dot{A} \dot{U}_2 + \dot{B} \cdot \dot{I}_2, \quad (2.3)$$

$$\dot{I}_1 = \dot{C} \cdot \dot{U}_2 + \dot{D} \cdot \dot{I}_2. \quad (2.4)$$

Таким образом, математической моделью ЛЭП, учитывающей распределенность параметров однородной ЛЭП, являются уравнения четырехполюсника с коэффициентами, которые получаются при сопоставлении уравнений (2.1), (2.2), (2.3), (2.4) соответственно. Назовем уравнения (2.1) и (2.2) *моделью 1* (уравнения длинной линии).

Для упрощения исследования свойств ЛЭП иногда вводят понятие идеальной линии. В идеальной линии параметры r_0 и g_0 приравняются к нулю, что соответствует отсутствию потерь. Такую модель назовем *моделью 2* (уравнение идеальной линии). В практических расчетах очень часто пренебрегают распределенностью параметров линии вследствие того, что большинство линий имеет небольшую длину, и интервал времени распространения электромагнитных волн в таких линиях значительно меньше периода изменения синусоидального напряжения и тока (0,02 с). Математическая модель линии в этом случае значительно упрощается и называется упрощенной моделью с сосредоточенными параметрами – *модель 3*.

Коэффициенты четырехполюсника всех моделей приведены ниже.

Модель 1. $\dot{A} = \dot{D} = \text{ch}(\dot{\gamma}l); \quad \dot{B} = \dot{Z}_c \text{sh}(\dot{\gamma}l); \quad \dot{C} = \frac{\text{sh}(\dot{\gamma}l)}{\dot{Z}_c}.$

Модель 2. $\dot{A} = \dot{D} = \cos(\dot{\beta}l); \quad \dot{B} = j \dot{Z}_c \sin(\dot{\beta}l); \quad \dot{C} = j \frac{\sin(\dot{\beta}l)}{\dot{Z}_c}.$

Модель 3. Если ЛЭП представить П-образной схемой замещения с сосредоточенными параметрами (рис. 2.2) и допустить, что значения этих параметров можно вычислить умножением погонных параметров на длину ЛЭП:

$$\dot{Z} = z_0 l; \quad \dot{Y} = y_0 l,$$

то получим еще одну модель. Коэффициенты четырехполюсника через параметры схемы замещения равны:

$$\dot{A} = \dot{D} = 1 + z_0 l \frac{y_0 l}{2} = 1 + \frac{\dot{Z} \dot{Y}}{2}; \quad \dot{B} = z_0 l = \dot{Z}; \quad \dot{C} = y_0 l + z_0 l \frac{(y_0 l)^2}{2} = \dot{Y} + \dot{Z} \left(\frac{\dot{Y}}{2} \right)^2.$$

Режим холостого хода ЛЭП. При холостом ходе ток в конце ЛЭП равен нулю ($\dot{I}_2 = 0$), тогда $\dot{U}_1 = \dot{A}\dot{U}_2$ и $\dot{I}_1 = \dot{C}\dot{U}_2$.

Несмотря на отсутствие нагрузки по линии протекает ток, обусловленный проводимостью линии, и напряжения по концам линии не равны между собой. Мало того, такой режим очень опасен для линии из-за больших значений напряжений и токов. Для снижения опасных уровней режимных параметров осуществляют компенсацию емкостных токов с помощью установки в ЛЭП специальных катушек индуктивностей – реакторов.

Исходные данные к задаче

Но- мер вари- анта	Марка провода	Дли- на, км	Погонные параметры фазы ЛЭП				$U_{но}$ м, кВ	Напряжение в начале линии U_1 ,кВ		Мощность нагрузки		Допу- сти- мый ток, $I_{доп}$, А
			r_0 , Ом/к м	x_0 , Ом/к м	g_0 , мкСм/ км	b_0 , мкСм/ км		в ре- жиме хх	в ре- жиме нагруз- ки	P_2 , МВт	Q_2 , Мвар	
1	3хАС300/ 66	800	0,034	0,31	0,015	3,97	500	490	520	850	100	2040
2	3хАС330/ 43	750	0,029	0,308	0,025	3,6	500	500	510	650	100	2190
3	3хАС300/ 66	820	0,034	0,31	0,015	3,97	500	500	524	880	50	2040
4	3хАС400/ 51	900	0,025	0,306	0,027	3,62	500	510	520	760	20	2475
5	3хАС500/ 54	550	0,02	0,304	0,034	3,64	500	500	510	900	20	2835
6	3хАС240/ 56	650	0,024	0,308	0,045	3,76	750	755	760	120 0	500	3050
7	3хАС300/ 66	800	0,021	0,288	0,043	4,11	750	755	760	200 0	100	3400
8	3хАС400/ 51	700	0,015	0,286	0,041	4,13	750	755	760	200 0	110	4125
9	3хАС400/ 93	800	0,019	0,289	0,039	4,13	750	758	760	190 0	160	3400
10	3хАС500/ 54	670	0,015	0,303	0,044	3,9	750	750	770	180 0	180	3780
11	3хАС300/ 66	670	0,034	0,31	0,015	3,97	500	500	520	900	70	2040

Ход работы

- Задать исходные параметры линии, режима и ограничения для линии.
- Найти сопротивления α , β , γ для идеальной ЛЭП (использовать модель 2).
- Определить параметры четырехполюсника для идеальной линии (для режима холостого хода).

- Найти напряжение в конце линии. Записать уравнение и построить график изменения напряжения вдоль ЛЭП.
- Найти ток в начале линии. Записать уравнение и построить график изменения тока вдоль ЛЭП.
- Построить графики изменения активной и реактивной мощности вдоль ЛЭП.
- Сделать вывод о допустимости режима, нанести на графики уровни допустимых значений.

Контрольные вопросы

1. ЛЭП: определение, виды, схема замещения, свойства
2. Уравнения длинной линии – физический смысл
3. Принцип выполнения практического задания, основные этапы

Содержание отчета

- 1) Номер практического занятия, тема и цель работы.
- 2) Результаты выполнения практической работы согласно заданию.
- 3) Ответы на контрольные вопросы.

Практическая работа № 3

«Математические модели ЛЭП. Исследование режимов передачи мощности по ЛЭП»

Цель практической работы: ознакомление со свойствами и математическими моделями ЛЭП, получение навыков исследования объекта по его математической модели.

Перечень знаний и умений для достижения цели:

знать:

- схемы замещения и способы построения математических моделей различных электротехнических объектов

уметь:

- пользоваться ПК Mathcad для решения электротехнических задач.

Учебная литература по практической работе:

Моделирование в электроэнергетике [Электронный ресурс]: учеб.пособие / А.Ф. Шаталов, И. Воротников, М. Мастепаненко, и др. ; Министерство сельского хозяйства Российской Федерации, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования Ставропольский государственный аграрный университет. - Ставрополь : Агрус, 2014. - 140 с. (ЭБС «Университетская библиотека онлайн»).

Методические рекомендации:

При передаче мощности по ЛЭП возникают потери мощности, поэтому напряжения по концам линии различаются по величине и по фазе. Для линий большой протяженности представляет интерес определение напряжения и токов по линии в различных ее точках.

Наиболее экономичный режим передачи мощности возникает, если сопротивление нагрузки ЛЭП равно волновому сопротивлению. В этом случае отсутствует отраженная волна, и передача энергии происходит с минимальными потерями. Передаваемая в этом режиме мощность называется натуральной и равна

$$P_{\text{нат}} = \frac{U^2}{Z_c}. \quad (3.1)$$

К преимуществам режима передачи натуральной мощности относится следующее:

- передача энергии происходит с минимальными потерями;
- благоприятное распределение напряжения вдоль ЛЭП $U_2 \approx U_1$;

➤ линия самобалансирована по Q .

Ток в конце линии может быть определен по соотношению:

$$\dot{I}_2 = \frac{S_2^*}{U_2} . \quad (3.2)$$

Исходные данные к задаче

Задать исходные данные для нагрузочного режима, мощность нагрузки $-P_2$, $Q_2 = 0$; напряжение в начале линии $-U_{1н}$, остальные параметры ЛЭП аналогичны используемым в практическом блоке №1.

Ход работы

▪ Исследовать распределенность параметров вдоль линии в трех режимах:

⇒ режим передачи натуральной мощности $P_2 = P_{\text{нат}}$;

⇒ режим передачи мощности больше натуральной $P_2 > P_{\text{нат}}$;

⇒ режим передачи мощности меньше натуральной $P_2 < P_{\text{нат}}$.

В каждом из этих режимов сделать следующее:

⇒ используя уравнение четырехполюсника (2.3) и уравнение (3.2), составить систему уравнений, найти ток и напряжение в конце линии \dot{I}_2 , \dot{U}_2 с помощью блока $\{Given...find\}$;

⇒ сформировать математические зависимости для построения графиков изменения напряжения, тока, активной и реактивной мощности вдоль ЛЭП $U(x)$, $I(x)$, $P(x)$, $Q(x)$ для каждого режима.

▪ Построить графики изменения напряжения, тока, активной и реактивной мощности вдоль ЛЭП $U(x)$, $I(x)$, $P(x)$, $Q(x)$ в одних координатных осях.

▪ Сделать выводы о закономерностях изменения тока и напряжения вдоль ЛЭП и допустимости для всех трех режимов.

Контрольные вопросы

1. Свойства и математические модели ЛЭП
2. Режим передачи мощности по ЛЭП – физический смысл
3. Принцип выполнения практического задания, основные этапы

Содержание отчета

- 1) Номер практического занятия, тема и цель работы.
- 2) Результаты выполнения практической работы согласно заданию.
- 3) Ответы на контрольные вопросы.

Практическая работа № 4

«Расчет установившегося режима ЭЭС на основе линейных математических моделей»

Цель практической работы: формирование навыков моделирования установившихся режимов ЭЭС на основе линейных уравнений состояния (обобщенного уравнения состояния и уравнения узловых напряжений) в среде Mathcad.

Перечень знаний и умений для достижения цели:

знать:

- схемы замещения и способы построения математических моделей различных электротехнических объектов

уметь:

- пользоваться ПК Mathcad для решения электротехнических задач.

Учебная литература по практической работе:

Моделирование в электроэнергетике [Электронный ресурс]: учеб.пособие / А.Ф. Шаталов, И. Воротников, М. Мастепаненко, и др. ; Министерство сельского хозяйства Российской Федерации, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования Ставропольский государственный аграрный университет. - Ставрополь : Агрус, 2014. - 140 с. (ЭБС «Университетская библиотека онлайн»).

Методические рекомендации:

Задача расчета и анализа установившихся режимов является базовой как при проектировании, так и управлении электроэнергетическими системами (ЭЭС). При проектировании ЭЭС расчет установившихся режимов производится с целью выбора и уточнения параметров проектируемой системы. В процессе эксплуатации подобные расчеты позволяют оперативно управлять и прогнозировать работу ЭЭС. При этом осуществляется оценка допустимости режима по техническим условиям оборудования.

Постановка задачи расчета режима функционирования определяется особенностями ЭЭС как сложной технической системы, которая включает в себя большое количество элементов, вырабатывающих, преобразующих, передающих, распределяющих, потребляющих электроэнергию и образующих сложно-замкнутую разветвленную структуру.

Режимом работы ЭЭС называется *состояние* системы в любой момент времени или на некотором интервале времени.

Под *установившимся режимом* понимается такое состояние ЭЭС, когда параметры системы на рассматриваемом интервале времени сохраняются неиз-

менными или изменяются достаточно медленно. Задача расчета установившихся режимов ЭЭС сводится к определению совокупности параметров, характеризующих работу системы: напряжений в различных точках системы, токов в ее элементах, потоков и потерь мощности и т.д.

Проведение расчета установившегося режима связано с рядом основных этапов:

- предварительное преобразование и переход к расчетной схеме электрической системы;
- формирование уравнения состояния по известным исходным данным с учетом структуры расчетной схемы;
- выбор метода расчета, составление алгоритма и программы на ЭВМ;
- проведение расчета установившегося режима на ЭВМ;
- анализ точности полученных результатов.

В основе решения задачи расчета режима лежит использование математических моделей макроуровня, представляющих собой линейные уравнения состояния (например, обобщенное уравнение состояния, уравнения узловых напряжений) и нелинейные уравнения состояния (например, уравнения узловых напряжений в форме баланса мощности или в форме баланса токов).

Математические модели макроуровня, применяемые в задаче расчета установившихся режимов, основаны на законах Ома и Кирхгофа, представленных в матричной форме записи.

Рассмотрим две формы линейных уравнений состояния, которые позволяют произвести расчет установившегося режима при упрощенном представлении нагрузки и генерации мощности с помощью линейных источников тока (задающего тока).

Модель 1. Классической формой линейной модели является *обобщенное уравнение состояния*.

$$\text{1-й закон Кирхгофа:} \quad MI_B = J; \quad (4.1)$$

$$\text{2-й закон Кирхгофа:} \quad NZ_B I_B = E_K, \quad (4.2)$$

где M – матрица инцидентий 1-го рода описывает связь ветвей и узлов схемы.

Структура

Правила формирования

$$M = \begin{matrix} \text{Узлы} \\ 3 \\ \text{Л} \\ \text{У} \end{matrix} \begin{matrix} \text{Ветви} \\ j \\ \text{---} \\ m_{ij} \\ \text{---} \\ i \end{matrix} \quad m_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если ветвь выходит из узла } i \rightarrow j \\ -1, & \text{если ветвь входит в узел } i \leftarrow j \\ 0, & \text{если ветвь не связана с узлом} \end{cases}$$

M – матрица инциденций 2-го рода описывает связь ветвей и независимых контуров

Структура

Правила формирования

$$N = \begin{matrix} \text{Контур} \\ i \\ \text{У} \\ \text{Р} \\ \text{У} \end{matrix} \begin{matrix} \text{Ветви} \\ j \\ \text{---} \\ n_{ij} \\ \text{---} \\ i \end{matrix} \quad n_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если направление ветви и контура совпадает} \\ -1, & \text{если направление ветви и контура не совпадает} \\ 0, & \text{если ветвь не связана с контуром} \end{cases}$$

n – число узлов, m – число ветвей, L – число независимых контуров.

Вектор задающих токов

Матрица сопротивлений ветвей

$$J = \begin{bmatrix} J_1 \\ J_2 \\ \vdots \\ J_n \end{bmatrix} \quad Z_B = \begin{bmatrix} Z_1 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & Z_2 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & Z_m \end{bmatrix} = Y_B^{-1}$$

Вектор токов ветвей

Вектор ЭДС ветвей

Вектор контурных токов

$$I_B = \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_m \end{bmatrix} \quad E_B = \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ \vdots \\ E_m \end{bmatrix} \quad E_K = N E_B = \begin{bmatrix} E_{K1} \\ E_{K2} \\ \vdots \\ E_{KL} \end{bmatrix}$$

Обобщенное уравнение состояния, полученное на основе 1-го и 2-го законов Кирхгофа, имеет вид:

$$A I_B = F, \tag{4.3}$$

где $A = \begin{bmatrix} M \\ \dots \\ N Z_B \end{bmatrix}$ – блочная матрица коэффициентов;

$F = \begin{bmatrix} J \\ \dots \\ E_K \end{bmatrix}$ – блочная матрица свободных членов уравнений.

Представленная модель является универсальной, но не экономичной в связи с большой размерностью системы уравнений (4.3). Поэтому наибольшее распространение в практике расчета установившихся режимов получило уравнение узловых напряжений.

Модель 2. Линейная форма уравнения узловых напряжений.

$$Y_y U_\Delta = J - M Y_B E_B, \quad (4.4)$$

где $Y_y = M Y_B M^T$ – матрица узловых проводимостей; $U_\Delta = [U_i - U_6]$ – матрица узловых напряжений; U_6 – базисное напряжение балансирующего узла; $Y_B = Z_B^{-1}$ – матрица проводимостей ветвей; E_B – матрица ЭДС ветвей; J – вектор задающих токов.

Если в схеме замещения нагрузка и генерация мощности моделируются с помощью задающих токов, то $E_B = 0$ и уравнение узловых напряжений имеет вид

$$Y_y U_\Delta = J. \quad (4.5)$$

Алгоритм расчета установившегося режима по уравнению узловых напряжений включает в себя следующие этапы .

1. Расчет узловых напряжений по уравнению (4.5)

$$U_\Delta = Y_y^{-1} J.$$

2. Определение уровней напряжений в узлах $U = U_\Delta + U_6$. (4.6)

Возможно выполнение этапов 1 и 2 одновременно.

$$U = Y_y^{-1} (J - Y_6 U_6), \quad (4.7)$$

Y_6 – матрица проводимостей ветвей, связывающих узлы схемы с балансирующим узлом B .

3. Расчет падений напряжений в ветвях схемы

$$U_B = M^T U_\Delta = M^T (U - U_6). \quad (4.8)$$

4. Определение токов в ветвях схемы

$$I_B = Y_B (U_B + E_B). \quad (4.9)$$

5. Расчет потоков мощности P, Q .

Исходные данные к задаче

Таблица 4.1 – Исходные данные вариантов

№	Сопровиления ветвей, Ом											Задающие токи, кА								δ
	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6	Z7	Z8	Z9	Z10	Z11	J1	J2	J3	J4	J5	J6	J7	J8	
1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.7	0.8	0.2	0.4	0.7	0.9	0.1	3	4	6	8	9	11	6	9	$\pi/3$
2	0.3	0.2	0.5	0.6	0.7	0.8	0.2	0.4	0.6	0.9	0.1	3	5	6	7	9	11	5	9	$\pi/4$
3	0.3	0.4	0.8	0.9	0.5	0.7	0.6	0.3	0.7	0.2	0.1	2	3	5	8	6	3	7	1	$\pi/6$
4	0.2	0.5	0.7	0.9	0.6	0.4	0.3	0.6	0.9	0.3	0.8	3	2	5	7	3	4	7	6	$\pi/3$
5	0.2	0.4	0.3	0.5	0.3	0.6	0.4	0.5	0.8	0.2	0.7	2	3	6	8	4	9	6	1	$\pi/6$
6	0.5	0.3	0.6	0.9	0.7	0.8	0.5	0.4	0.6	0.4	0.2	3	5	4	8	6	5	9	6	$\pi/4$
7	0.2	0.3	0.4	0.8	0.3	0.5	0.8	0.5	0.6	0.9	0.2	8	3	4	6	5	9	7	2	$\pi/6$
8	0.3	0.5	0.4	0.5	0.6	0.9	0.8	0.5	0.7	0.8	0.7	3	8	6	4	9	10	6	8	$\pi/3$
9	0.1	0.5	0.3	0.5	0.4	0.1	0.2	0.3	0.7	0.6	0.1	2	4	3	5	6	9	7	10	$\pi/4$
10	0.2	0.3	0.5	0.6	0.8	0.2	0.3	0.4	0.9	0.6	0.7	3	5	4	5	6	8	9	4	$\pi/6$

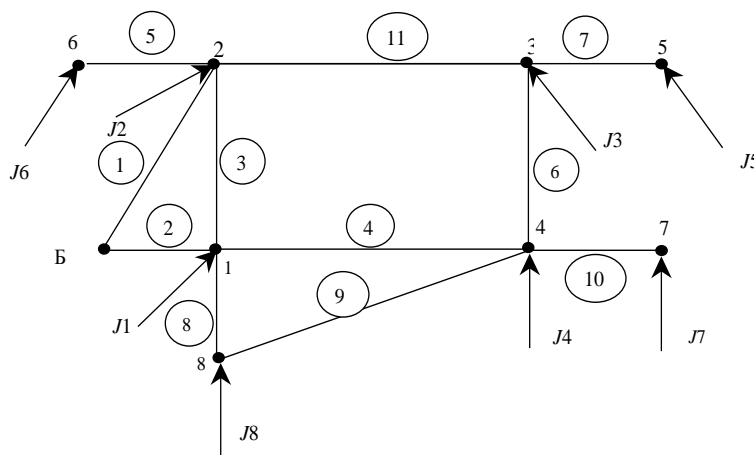


Рисунок 4.1 – Расчетная схема

$U_6 = 10,5$ кВ, $S_6 = 7$ МВА, $E_q = 1.07$, $U_c = 1$, $P_d = 60$, $T_j = 14$ с, $x_d = 1.7$, $x'_d = 0.172$, $T_{d0} = 7.26$.

Ход работы

1. Расчет установившегося режима по линейным моделям для сети постоянного тока.

- Рассчитать токи в ветвях расчетной схемы сети постоянного тока, используя обобщенное уравнение состояния. Исходные данные по вариантам приведены таблице 4.1.

Алгоритм расчета

⇒ Ввести исходные данные M, N , вектор-столбец сопротивлений ветвей Z , вектор задающих токов нагрузки J , вектор ЭДС ветвей E_B .

⇒ Сформировать диагональную матрицу сопротивлений Z_B , используя встроенную функцию $Z_B = \text{diag}(Z)$.

⇒ Рассчитать промежуточную матрицу $H = N \cdot Z_B$, матрицу контурных ЭДС E_K .

⇒ Сформировать блочные матрицы коэффициентов A и свободных членов уравнения F , используя встроенную функцию *stack*, например:

$$A := \text{stack}(M, H).$$

⇒ Рассчитать токи в ветвях схемы по обобщенному уравнению состояния через обратную матрицу коэффициентов.

• Определить параметры установившегося режима для расчетной схемы, по уравнению узловых напряжений в линейной форме.

Алгоритм расчета

⇒ Рассчитать матрицу узловых проводимостей по $Y_y = MY_B M^T$.

⇒ Определить уровни напряжений в узлах по (4.7), либо используя (4.5) и (4.6), $U_6 = 10,5$ кВ.

⇒ Расчет падений напряжений в ветвях схемы по (4.8).

⇒ Определение токов в ветвях схемы по (4.9).

• Сравнить результаты расчета – токи в ветвях схемы, полученные по **Модели 1** и **Модели 2**.

2. *Расчет установившегося режима по линейным моделям для сети переменного тока.*

• Определить параметры установившегося режима для расчетной схемы по уравнению узловых напряжений в линейной форме. Исходные данные по вариантам приведены в табл. 4.1. Расчет провести с учетом единиц измерения параметров.

Алгоритм расчета

⇒ Ввести исходные данные M , вектор-столбец сопротивлений ветвей $Z(\text{Ом})$, вектор задающих токов нагрузки $J(\text{кА})$, $U_6 = 220$ кВ.

⇒ Сформировать диагональную матрицу проводимостей ветвей в сименсах

$$Y_{B,i,i} = \frac{1}{Z_i}, \text{ где } i := 1 \dots 7.$$

⇒ Сформировать матрицу проводимостей ветвей, связывающих узлы схемы с балансирующим Y_6 в сименсах.

⇒ Рассчитать матрицу узловых проводимостей в сименсах.

⇒ Рассчитать напряжения в узлах схемы в киловольтах.

⇒ Определить модуль и фазу напряжений в киловольтах и градусах.

⇒ Рассчитать вектор падений напряжения в ветвях схемы в киловольтах.

⇒ Рассчитать токи в ветвях схемы в килоамперах.

⇒ *Осуществить проверку результатов по балансу токов*: сумма задающих токов должна быть равна току балансирующего узла с обратным знаком. Ток балансирующего узла равен алгебраической сумме токов ветвей, связанных с узлом B с учетом их направления.

Контрольные вопросы

1. ЭЭС: определение, свойства, режимы
2. Задачи и способы анализа установившихся режимов
3. Формы линейных уравнений состояния – математическая запись и физический смысл
4. Принцип выполнения практического задания, основные этапы

Содержание отчета

- 1) Номер практического занятия, тема и цель работы.
- 2) Результаты выполнения практической работы согласно заданию.
- 3) Ответы на контрольные вопросы.

Практическая работа № 5

«Расчет установившегося режима ЭЭС на основе нелинейных математических моделей»

Цель практической работы: формирование навыков моделирования установившихся режимов ЭЭС на основе нелинейных уравнений состояния в среде Mathcad.

Перечень знаний и умений для достижения цели:

знать:

- схемы замещения и способы построения математических моделей различных электротехнических объектов

уметь:

- пользоваться ПК Mathcad для решения электротехнических задач.

Учебная литература по практической работе:

Моделирование в электроэнергетике [Электронный ресурс]: учеб. пособие / А.Ф. Шаталов, И. Воротников, М. Мастепаненко, и др. ; Министерство сельского хозяйства Российской Федерации, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования Ставропольский государственный аграрный университет. - Ставрополь : Агрус, 2014. - 140 с. (ЭБС «Университетская библиотека онлайн»).

Методические рекомендации:

Нелинейные уравнения состояния позволяют произвести расчет установившегося режима при представлении нагрузки и генерации мощности с помощью нелинейных источников тока.

$$J_K(\dot{U}) = \frac{S_K^*(\dot{U})}{\sqrt{3}U_K^*}, \quad (5.1)$$

где $J_K(U)$ – нелинейный источник тока; S_K^* – мощность трех фаз узла К; U_K^* – сопряженный комплекс междуфазного напряжения узла К.

В качестве исходных данных используется $S_H = \text{const}$, $S_T = \text{const}$.

Существуют две формы представления нелинейных уравнений узловых напряжений.

Модель 3. Уравнения узловых напряжений в форме баланса токов

$$\dot{Y}_y \dot{U} = \sqrt{3} \cdot j(\dot{U}) - \dot{Y}_6 U_6. \quad (5.2)$$

Например, для трехузловой схемы:

$$\begin{cases} \dot{Y}_{11}\dot{U}_1 + \dot{Y}_{12}\dot{U}_2 + \dot{Y}_{13}\dot{U}_3 = \frac{S_1^*}{U_1^*} - \dot{Y}_{16}U_6 \\ \dot{Y}_{21}\dot{U}_1 + \dot{Y}_{22}\dot{U}_2 + \dot{Y}_{23}\dot{U}_3 = \frac{S_2^*}{U_2^*} - \dot{Y}_{26}U_6, \\ \dot{Y}_{31}\dot{U}_1 + \dot{Y}_{32}\dot{U}_2 + \dot{Y}_{33}\dot{U}_3 = \frac{S_3^*}{U_3^*} - \dot{Y}_{36}U_6, \end{cases}$$

где $Y_{i6} = -Y_{i1} - Y_{i2} - Y_{i3}$.

Модель 4. Уравнения узловых напряжений в форме баланса мощности

$$U^* \text{diag}(\dot{Y}_y \dot{U} + \dot{Y}_6 U_6) = S^*. \quad (5.3)$$

Например, для трехузловой схемы:

$$\begin{cases} \dot{U}_1^* (\dot{Y}_{11}\dot{U}_1 + \dot{Y}_{12}\dot{U}_2 + \dot{Y}_{13}\dot{U}_3 + \dot{Y}_{16}U_6) = S_1^*, \\ \dot{U}_2^* (\dot{Y}_{21}\dot{U}_1 + \dot{Y}_{22}\dot{U}_2 + \dot{Y}_{23}\dot{U}_3 + \dot{Y}_{26}U_6) = S_2^*, \\ \dot{U}_3^* (\dot{Y}_{31}\dot{U}_1 + \dot{Y}_{32}\dot{U}_2 + \dot{Y}_{33}\dot{U}_3 + \dot{Y}_{36}U_6) = S_3^*. \end{cases}$$

Исходные данные к задаче

Исходные данные к практическому блоку №5 приведены в Приложении 1.

Ход работы

Произвести расчет установившегося режима на основе нелинейной модели: уравнения узловых напряжений в форме баланса мощности. Исходные данные по вариантам приведены в приложении 1.

Алгоритм расчета

1. Установить индексацию массивов с единицы (по умолчанию индексы элементов массивов начинаются с нуля) $ORIGIN := 1$.

2. При выполнении работы использовать возможности работы *Mathcad* с единицами измерения. Ввести дополнительные единицы измерения, отсутствующие в системе:

$$MVA := 10^3 \cdot kV \cdot amp$$

$$Mwatt := MVA$$

$$Mvar := MVA.$$

3. Ввести исходные данные – погонные параметры ЛЭП (использовать возможности *Mathcad* работы с единицами измерения):

r_0 (ohm / km); x_0 (ohm / km); b_0 (siemens / km) – погонные параметры ЛЭП;

$l(\text{km})$ – длина ЛЭП; $P_H (\text{Mwatt}); Q_H (\text{Mvar})$ – мощность нагрузки; $U_0 = 222 \text{ kV}$ – базисное напряжение; $U_{\text{НОМ}} = 220 \text{ kV}$ – номинальное напряжение.

4. Рассчитать параметры ЛЭП:

$$R := (r0 \cdot l) \quad X := (x0 \cdot l) \quad B := (i \cdot b0 \cdot l)$$

где \rightarrow – векторная операция – действие производится над всеми составляющими вектора.

$$Z := R + i \cdot X$$

$S := -S_n$ сопряженный вектор мощности нагрузки

$$S_n := P_n + i \cdot Q_n$$

5. Сформировать матрицу узловых проводимостей.

- Составить и ввести матрицу инцидентий 1-го рода \mathbf{M} .
- Рассчитать матрицу проводимостей ветвей в *siemens*.

$$i := 1 \dots 5 \quad Y_{b_i, i} := \frac{1}{Z_i}$$

- Рассчитать матрицу узловых проводимостей в *siemens*

$$Y_y := \mathbf{M} Y_b \mathbf{M}^T$$

- Рассчитать емкостные проводимости поперечных ветвей и добавить их к диагональным собственным проводимостям узлов матрицы Y_y .

Например, первый узел расчетной схемы связан с ветвями 3 и 5 (рис. 5.1):

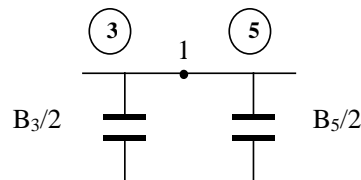


Рис. 5.1. Фрагмент расчетной схемы

$$\text{Для узла 1: } Y_{y_{1,1}} := Y_{y_{1,1}} + \frac{B_3 + B_5}{2}$$

- Добавить столбец матрицы узловых проводимостей, соответствующий балансирующему узлу.

Например, для расчетной схемы вида (рис. 5.2).

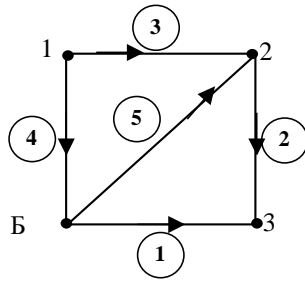


Рис. 5.2. Расчетная схема

$$Y_{y_{1,4}} := -\frac{1}{Z_4} \quad Y_{y_{2,4}} := -\frac{1}{Z_5} \quad Y_{y_{3,4}} := -\frac{1}{Z_1}$$

6. Рассчитать значения узловых напряжения с использованием нелинейных уравнений узловых напряжений в форме баланса мощности.

Пример из программы в среде Mathcad:

Начальное приближение

$$U1 := (1.0 - i \cdot 0.15) \cdot U_{non}$$

$$U2 := U1$$

$$U3 := U1$$

Решающий блок

Given

$$U1 \cdot \left(\overline{Y_{y_{1,1}}} \cdot \overline{U1} + \overline{Y_{y_{1,2}}} \cdot \overline{U2} + \overline{Y_{y_{1,3}}} \cdot \overline{U3} + \overline{Y_{y_{1,4}}} \cdot \overline{U0} \right) = S_1$$

$$U2 \cdot \left(\overline{Y_{y_{2,1}}} \cdot \overline{U1} + \overline{Y_{y_{2,2}}} \cdot \overline{U2} + \overline{Y_{y_{2,3}}} \cdot \overline{U3} + \overline{Y_{y_{2,4}}} \cdot \overline{U0} \right) = S_2$$

$$U3 \cdot \left(\overline{Y_{y_{3,1}}} \cdot \overline{U1} + \overline{Y_{y_{3,2}}} \cdot \overline{U2} + \overline{Y_{y_{3,3}}} \cdot \overline{U3} + \overline{Y_{y_{3,4}}} \cdot \overline{U0} \right) = S_3$$

$$\begin{pmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \end{pmatrix} := \text{Minerr} (U_1, U_2, U_3)$$

Функция *Minerr* позволяет определить возможное решение с минимальной ошибкой. Обозначение $\overline{Y_{y_{1,1}}}$ – сопряженное комплексное значение узловой проводимости.

7. Рассчитать значения параметров установившегося режима.

- Модуль напряжения в (kV) и фазу напряжения в градусах (deg)

В программе *Mathcad*: модуль определяется операцией $|U1|$, фаза – $\arg(U1)$.

- Значения напряжений в начале и конце каждой ветви.

Пример для схемы (рис. 5.2) из программы в среде *Mathcad*:

$$U_i := \begin{pmatrix} U_0 \\ U_2 \\ U_1 \\ U_0 \end{pmatrix} \quad U_k := \begin{pmatrix} U_3 \\ U_3 \\ U_2 \\ U_0 \\ U_2 \end{pmatrix}$$

- Значения токов в ветвях схемы в *amp*, использовать векторную операцию:

$$\longrightarrow I := \left(\frac{U_i - U_k}{\sqrt{3}} \cdot \frac{1}{Z} \right)$$

- Значения потоков мощности в начале и в конце каждой ветви:

$$\Rightarrow \text{в начале ветви } i - S_{i \text{ нач}} = \sqrt{3} \cdot U_{i \text{ нач}} \cdot I - |U_{i \text{ нач}}|^2 \cdot \frac{B_i}{2}.$$

С использованием векторных операций из программы в **Mathcad**:

$$\longrightarrow S_i := (\sqrt{3} \cdot U_i \cdot \bar{I}) - \left[(|U_i|)^2 \frac{B_i}{2} \right];$$

$$\Rightarrow \text{в конце ветви } i - S_{i \text{ кон}} = \sqrt{3} \cdot U_{i \text{ кон}} \cdot I + |U_{i \text{ кон}}|^2 \cdot \frac{B_i}{2}.$$

В среде **Mathcad** с помощью векторных операций представление аналогично.

- Значения потерь мощности в ветвях схемы:

$$\Delta P = \text{Re}(S_{\text{нач}} - S_{\text{кон}}),$$

$$\Delta Q = \text{Im}(S_{\text{нач}} - S_{\text{кон}}).$$

8. Осуществить проверку результатов по балансу мощности: баланс мощности в схеме должен соответствовать мощности балансирующего узла. Мощность балансирующего узла равна алгебраической сумме потоков мощности ветвей, связанных с узлом Б с учетом их направления.

Пример для схемы (рис. 5.2) из программы в среде **Mathcad**:

баланс мощности в схеме:

$$\sum_{i=1}^3 P_{H_i} + \sum dP + i \cdot \left(\sum_{i=1}^3 Q_{H_i} + \sum dQ \right)$$

$$\text{мощность балансирующего узла: } S_{H5} + S_{H1} - S_{K4}.$$

Контрольные вопросы

1. Моделирование установившихся режимов ЭЭС: способы
2. Уравнения узловых напряжений: математическая запись и физический смысл
3. Принцип выполнения практического задания, основные этапы

Содержание отчета

- 1) Номер практического занятия, тема и цель работы.
- 2) Результаты выполнения практической работы согласно заданию.
- 3) Ответы на контрольные вопросы.

Практическая работа № 6

«Математические методы анализа статической устойчивости установившихся режимов ЭЭС»

Цель практической работы: формирование навыков применения сосредоточенных математических моделей макроуровня для анализа статической устойчивости энергосистем.

Перечень знаний и умений для достижения цели:

знать:

- схемы замещения и способы построения математических моделей различных электротехнических объектов

уметь:

- пользоваться ПК Mathcad для решения электротехнических задач.

Учебная литература по практической работе:

Моделирование в электроэнергетике [Электронный ресурс]: учеб. пособие / А.Ф. Шаталов, И. Воротников, М. Мастепаненко, и др. ; Министерство сельского хозяйства Российской Федерации, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования Ставропольский государственный аграрный университет. - Ставрополь : Агрус, 2014. - 140 с. (ЭБС «Университетская библиотека онлайн»).

Методические рекомендации:

При проектировании и эксплуатации электроэнергетических систем решается задача анализа статической устойчивости.

Под устойчивостью понимается способность системы возвращаться в исходное или близкое к исходному состояние равновесия после малого возмущающего воздействия. Такого типа устойчивость называется статической либо устойчивостью в «малом» и является необходимым условием работоспособности любой технической системы.

При анализе электрической системы *состоянию равновесия* соответствует *нормальный установившийся режим*. В качестве *малых возмущающих воздействий* можно рассматривать, например, подключение или отключение потребителей, которые приводят к изменению параметров системы во времени и возникновению переходных процессов.

Анализ статической устойчивости, основанный на методе малых колебаний, включает в себя следующие этапы.

1. *Допускается малое возмущение* относительно исходного состояния равновесия. Под воздействием малого возмущения в электрической системе воз-

никают переходные процессы, которые описываются с помощью обыкновенных дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами.

2. Составляются *дифференциальные уравнения переходного процесса*. Для широкого класса технических систем при анализе переходных процессов используются системы дифференциальных уравнений вида:

$$\sum_{i=1}^n \left(a_{ij} \frac{d^2 x_i}{dt^2} + b_{ij} \frac{dx_i}{dt} + c_{ij} x_i \right) = F_j(t), \quad (6.1)$$

где $j = 1 \dots n$; a_{ij}, b_{ij}, c_{ij} – постоянные коэффициенты; $x_i(t)$ – переменные, характеризующие реакцию системы на малое возмущение; $F_j(t)$ – внешние силы, отражающие изменение условий работы системы.

Реакция системы на возмущающее воздействие $x_i(t)$ может быть представлена как совокупность вынужденной $x_{\text{вын } i}(t)$ и свободной $x_{\text{св } i}(t)$ составляющих. При этом для анализа устойчивости определяющее значение имеет характер изменения свободной составляющей, т. е. характер возникающих в системе свободных колебаний, который определяется внутренними свойствами системы.

Положение равновесия является асимптотически устойчивым, если выполняется условие затухания во времени свободных колебаний

$$\lim_{t \rightarrow \infty} x_{\text{св } i}(t) = 0. \quad (6.2)$$

3. *Анализ характера переходных процессов*. Как правило, дифференциальные уравнения, описывающие переходные процессы в технических системах, не линейны вследствие нелинейности физических закономерностей, связывающих параметры режима электрической системы. Для упрощения анализа при малых отклонениях все нелинейные функции линеаризуются. Считая, что возмущающее воздействие незначительно во времени и отклонения параметров режима от исходных значений $\Delta x_i(t)$ малы, можно перейти к дифференциальным уравнениям, линейным относительно $\Delta x_i(t)$. Для анализа изменения во времени свободной составляющей $\Delta x_i(t)$ в общем случае необходимо решить дифференциальное уравнение n степени:

$$a_0 \frac{d^n \Delta x}{dt^n} + a_1 \frac{d^{n-1} \Delta x}{dt^{n-1}} + \dots + a_n \Delta x = 0. \quad (6.3)$$

Используя операторный метод, можно перейти от дифференциального уравнения (6.3) к характеристическому уравнению

$$D(p) = a_0 \cdot p^n + a_1 \cdot p^{n-1} + \dots + a_n = 0. \quad (6.4)$$

Дальнейшее исследование переходных процессов, возникающих в электрической системе, определяется видом корней характеристического уравнения (6.4).

На основе *теоремы Ляпунова* положение равновесия является статически устойчивым, если все корни характеристического уравнения (6.4) имеют отрицательную вещественную часть; неустойчивым, если хоть один корень уравнения (6.4) имеет положительную вещественную часть.

Возможны *два подхода* к решению поставленной задачи.

- При степени характеристического уравнения $n = 2$ определяются корни уравнения (6.4) и устойчивость системы анализируется на основе теоремы Ляпунова, далее определяется характер изменения во времени свободной составляющей $\Delta x_i(t)$.

- При степени характеристического уравнения $n \geq 3$ об устойчивости системы судят без непосредственного решения характеристического уравнения (6.4), используя *критерии устойчивости*.

Критерии устойчивости. Анализ статической устойчивости электрических систем путем прямого отыскания корней характеристического уравнения связан с практическими трудностями, поскольку отсутствуют аналитические выражения для корней уравнений выше четвертого порядка. Однако для суждения об устойчивости системы достаточно знать то, что все корни расположены в левой полуплоскости комплексной плоскости и имеют отрицательную вещественную часть.

Определение. Условия, которые позволяют судить о наличии отрицательной вещественной части всех корней характеристического уравнения без его непосредственного решения, называются *критериями устойчивости*. Критерии устойчивости подразделяются на алгебраические и частотные.

Алгебраический критерий Гурвица

Для использования критерия Гурвица составляется *определитель Гурвица* по следующим правилам:

- по главной диагонали располагаются коэффициенты уравнения (6.4) в порядке возрастания индексов начиная с a_1 ;
- построчно помещаются коэффициенты только с четными или только с нечетными индексами, при этом влево от диагонали индексы уменьшаются, а вправо – увеличиваются;
- все недостающие коэффициенты заменяются нулями.

Например, для характеристического уравнения $n = 3$ определитель Гурвица имеет вид:

$$\Delta_3 = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 & 0 \\ a_0 & a_2 & 0 \\ 0 & a_1 & a_3 \end{vmatrix}. \quad (6.5)$$

Затем выделяются миноры относительно главной диагонали определителя Гурвица Δ_3 и применяется *критерий Гурвица*: для устойчивости системы

необходимо и достаточно, чтобы при $a_0 > 0$ все главные диагональные миноры определителя Гурвица были положительны.

Условия устойчивости для Δ_3 :

$$a_0 > 0,$$

$$\Delta_1 = a_1 > 0,$$

$$\Delta_2 = a_1 a_2 - a_3 a_0 > 0,$$

$$\Delta_3 = a_1 a_2 a_3 - a_3^2 a_0 = a_3 \Delta_2 > 0.$$

Частотный критерий устойчивости Михайлова

В основу критерия Михайлова положен принцип аргумента, известный из теории функций комплексного переменного.

Для применения критерия Михайлова необходимо заменить $p = j\omega$, где ω – частота свободных колебаний, и подставить в выражение (6.4). Например, для характеристического уравнения $n = 3$:

$$\begin{aligned} D(j\omega) &= a_0(j\omega)^3 + a_1(j\omega)^2 + a_2(j\omega) + a_3 = -a_0j\omega^3 - a_1\omega^2 + a_2j\omega + a_3 = \\ &= U(\omega) + jV(\omega), \\ U(\omega) &= -a_1\omega^2 + a_3, \end{aligned} \tag{6.6}$$

$$V(\omega) = -a_0\omega^3 + a_2\omega = \omega(-a_0\omega^2 + a_2).$$

Вектор $D(j\omega)$, изображенный в декартовых координатах на плоскости, при изменении $0 < \omega < \infty$ вращается и концом вектора описывает кривую, которая называется *годографом* характеристического уравнения.

Практическая формулировка критерия Михайлова: система будет устойчива, если при возрастании $0 < \omega < \infty$ годограф, начинаясь на положительной части вещественной оси, проходит последовательно в положительном направлении n квадрантов, где n – степень характеристического уравнения. Такое перемещение годографа соответствует повороту вектора характеристического многочлена $D(j\omega)$ на угол $n \cdot \frac{\pi}{2}$.

С использованием практической формулировки критерия Михайлова можно построить годографы устойчивых систем, которые имеют жесткую конфигурацию в зависимости от степени характеристического уравнения (рис. 6.1).

Таким образом, изменяя частоту свободных колебаний $0 < \omega < \infty$, нужно построить годограф Михайлова, и по его конфигурации сделать вывод о статической устойчивости системы с учетом степени характеристического уравнения.

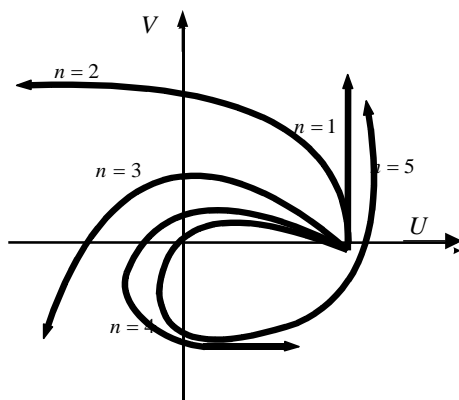


Рис. 6.1. Годографы устойчивых систем

Имеется возможность анализа устойчивости системы по критерию Михайлова без построения годографа. Для того чтобы система была устойчива, необходимо и достаточно, чтобы выполнялись следующие условия:

$$\begin{aligned} &\triangleright U(\omega=0) = a_n > 0; \\ &\triangleright \frac{\partial V}{\partial \omega}(\omega=0) = a_{n-1} > 0; \end{aligned} \quad (6.7)$$

- \triangleright корни уравнений $U(\omega) = 0$ $V(\omega) = 0$ должны быть перемежающимися (чередующимися на числовой оси).

Исходные данные к задаче

Ход работы

Произвести анализ статической устойчивости системы, для которой рассчитан установившийся режим в практическом блоке № 4, на основе линейного уравнения узловых напряжений. Продолжить программу практического блока № 4 (раздел 4.2) в среде *Mathcad*.

Анализ статической устойчивости системы проведем при отсутствии нагрузки в узлах и подключении к узлу 5 синхронного неявнополюсного генератора. Эквивалентная схема приведена на рис. 6.2.

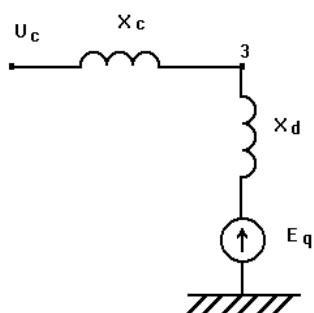


Рис. 6.2. Эквивалентная расчетная схема

Алгоритм расчета

1. Ввод исходных данных

- Ввести дополнительные исходные данные

E_q – синхронная ЭДС ;

x_d – индуктивное сопротивление по продольной оси ;

U_c – напряжение системы ; T_j – постоянная инерции, в с ;

R_d – коэффициент демпфирования ;

δ – угол между вектрами U_c и E_q .

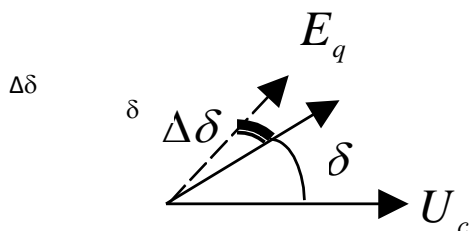


Рис. 6.3.

Для перевода в относительные единицы ввести базисные параметры

$$S_{\delta} = S_{\Gamma \text{ ном}}, \quad U_{\delta} = U_{\Gamma \text{ ном}};$$

- перевести их в относительные единицы

$$T_j(\text{o.e.}) = T_j(\text{с})\omega_0 = T_j(\text{с}) \cdot 314; \quad (6.8)$$

- рассчитать значение эквивалентного сопротивления системы x_c , которое соответствует диагональному элементу матрицы узловых сопротивлений Z_y

$$Z_y := Y_y^{-1}. \quad (6.9)$$

Поскольку синхронная машина подключена к узлу 5, то $x_c = Z_{y5,5}$;

- перевести эквивалентное сопротивление в относительные единицы:

$$x_c(\text{o.e.}) = x_c(\text{Ом}) \cdot \frac{S_{\delta}}{U_{\delta}^2}. \quad (6.10)$$

2. Анализ статической устойчивости по корням характеристического уравнения.

Если не учитывать переходные процессы в обмотке возбуждения генератора, но учесть демпфирующие моменты, дифференциальное уравнение относительно $\Delta\delta$ имеет вид:

$$T_j \frac{d^2 \Delta\delta}{dt^2} + P_d \frac{d\Delta\delta}{dt} + c_1 \Delta\delta = 0. \quad (6.11)$$

• Используя операторный метод $\frac{d\Delta\delta}{dt} = p$, перейти к характеристическому уравнению

$$T_j p^2 + P_d p + c_1 = 0. \quad (6.12)$$

• Рассчитать коэффициент c_1 уравнения (6.12), определяется исходя из соотношения

$$c_1 = \frac{E_q U_c}{x_{d\Sigma}} \cos \delta, \quad (6.13)$$

где значение $x_{d\Sigma}$ определяется по формуле

$$x_{d\Sigma} = x_c + x_d. \quad (6.14)$$

• Определить значения корней характеристического уравнения (6.12) p_1, p_2 , на основе *теоремы Ляпунова* сделать вывод об устойчивости системы.

• Построить график переходного процесса по выражениям:

▪ если корни $p_1 = \alpha_1, p_2 = \alpha_2$ — действительные, то $\Delta\delta(t) = C_1 e^{\alpha_1 t} + C_2 e^{\alpha_2 t}$;

▪ если корни комплексно-сопряженные ($p_{1,2} = \alpha \pm j\beta$), то

$$\Delta\delta(t) = 2C e^{\alpha t} \sin(\beta t + \varphi), \text{ где } C = \sqrt{A^2 + B^2}, \varphi = \arctg \frac{A}{B}.$$

3. *Анализ статической устойчивости по алгебраическому критерию Гурвица.*

Если учесть не только демпфирующие моменты, но и переходные процессы в обмотке возбуждения генератора, то в этом случае характеристическое уравнение будет иметь третий порядок

$$D(p) = a_0 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + a_0 = 0. \quad (6.15)$$

• Рассчитать коэффициенты уравнения (6.15) исходя из соотношений

$$a_0 = T_j T_d'; \quad a_1 = T_j + P_d T_d'; \quad a_2 = c_2 T_d' + P_d; \quad a_3 = c_1.$$

где T_d' — *переходная постоянная времени генератора по продольной оси.*

Значение коэффициента c_1 вычисляется по (7.12), а для определения c_2 используется выражение.

$$c_2 = c_1 + \frac{x_d - x'_d}{x_{d\Sigma} x'_{d\Sigma}} U_c^2 \sin^2 \delta, \quad (6.16)$$

где x'_d – переходное реактивное сопротивление генератора по продольной оси

$$x'_{d\Sigma} = x'_d + x_c. \quad (6.17)$$

Переходная постоянная времени генератора T'_d рассчитывается из выражения

$$T'_d = \frac{x'_{d\Sigma}}{x_{d\Sigma}} T_{d0}, \quad (6.18)$$

T_{d0} – постоянная времени обмотки возбуждения синхронной машины при разомкнутой обмотке статора.

- Составить определитель Гурвица и рассчитать миноры определителя относительно главной диагонали.

Пример расчета определителя из программы в среде **Mathcad**:

$$\Delta_3 := \begin{vmatrix} a_1 & a_3 & 0 \\ a_0 & a_2 & 0 \\ 0 & a_1 & a_3 \end{vmatrix}.$$

- Сделать вывод об устойчивости системы по критерию Гурвица.

Контрольные вопросы

1. Сосредоточенные математические модели макроуровня: определение, физический смысл
2. Дифференциальные уравнения переходного процесса: математическая запись и физический смысл
3. Алгебраический критерий Гурвица: математическая запись и физический смысл
4. Частотный критерий устойчивости Михайлова
5. Принцип выполнения практического задания, основные этапы

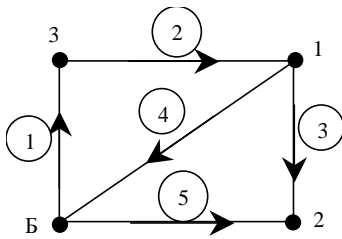
Содержание отчета

- 1) Номер практического занятия, тема и цель работы.
- 2) Результаты выполнения практической работы согласно заданию.
- 3) Ответы на контрольные вопросы.

Вариант 1

Расчетная схема

Исходные данные



$$r_0 = \begin{bmatrix} 0.12 \\ 0.125 \\ 0.09 \\ 0.085 \\ 0.085 \end{bmatrix} \cdot \frac{ohm}{km} \quad x_0 = \begin{bmatrix} 0.43 \\ 0.42 \\ 0.429 \\ 0.423 \\ 0.425 \end{bmatrix} \cdot \frac{ohm}{km}$$

$$b_0 = \begin{bmatrix} 2.57 \\ 2.51 \\ 2.564 \\ 2.528 \\ 2.54 \end{bmatrix} \cdot 10^{-6} \cdot \frac{siemens}{km} \quad l = \begin{bmatrix} 90 \\ 85 \\ 130 \\ 125 \\ 140 \end{bmatrix} \cdot km$$

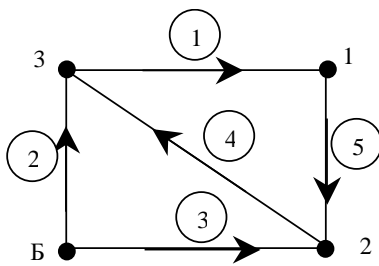
Мощности нагрузки узлов:

$$P_H = \begin{bmatrix} 60 \\ 80 \\ 120 \end{bmatrix} \cdot Mwatt \quad Q_H = \begin{bmatrix} 30 \\ 45 \\ 70 \end{bmatrix} \cdot Mvar$$

Вариант 2

Расчетная схема

Исходные данные



$$r_0 = \begin{bmatrix} 0.13 \\ 0.125 \\ 0.039 \\ 0.075 \\ 0.095 \end{bmatrix} \cdot \frac{\text{ohm}}{\text{km}} \quad x_0 = \begin{bmatrix} 0.46 \\ 0.44 \\ 0.43 \\ 0.425 \\ 0.45 \end{bmatrix} \cdot \frac{\text{ohm}}{\text{km}}$$

$$b_0 = \begin{bmatrix} 2.749 \\ 2.63 \\ 2.56 \\ 2.54 \\ 2.69 \end{bmatrix} \cdot 10^{-6} \cdot \frac{\text{siemens}}{\text{km}} \quad l = \begin{bmatrix} 100 \\ 185 \\ 120 \\ 85 \\ 110 \end{bmatrix} \cdot \text{km}$$

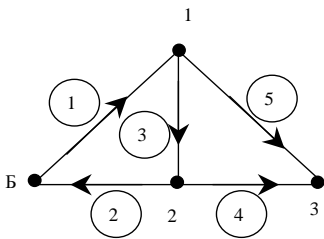
Мощности нагрузки узлов:

$$P_H = \begin{bmatrix} 80 \\ 180 \\ 100 \end{bmatrix} \cdot \text{Mwatt} \quad Q_H = \begin{bmatrix} 50 \\ 75 \\ 60 \end{bmatrix} \cdot \text{Mvar}$$

Вариант 3

Расчетная схема

Исходные данные



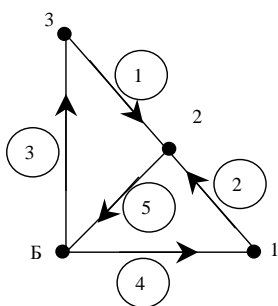
$$r_0 = \begin{bmatrix} 0.15 \\ 0.12 \\ 0.069 \\ 0.085 \\ 0.15 \end{bmatrix} \cdot \frac{\text{ohm}}{\text{km}} \quad x_0 = \begin{bmatrix} 0.36 \\ 0.34 \\ 0.45 \\ 0.42 \\ 0.43 \end{bmatrix} \cdot \frac{\text{ohm}}{\text{km}}$$

$$b_0 = \begin{bmatrix} 2.152 \\ 2.032 \\ 2.69 \\ 2.51 \\ 2.57 \end{bmatrix} \cdot 10^{-6} \cdot \frac{\text{siemens}}{\text{km}}$$

$$l = \begin{bmatrix} 90 \\ 85 \\ 125 \\ 185 \\ 130 \end{bmatrix} \cdot \text{km}$$

Мощности нагрузки узлов:

$$P_H = \begin{bmatrix} 100 \\ 160 \\ 90 \end{bmatrix} \cdot \text{Mwatt} \quad Q_H = \begin{bmatrix} 50 \\ 85 \\ 40 \end{bmatrix} \cdot \text{Mvar}$$



$$r_0 = \begin{bmatrix} 0.13 \\ 0.11 \\ 0.059 \\ 0.35 \\ 0.25 \end{bmatrix} \cdot \frac{\text{ohm}}{\text{km}} \quad x_0 = \begin{bmatrix} 0.46 \\ 0.34 \\ 0.42 \\ 0.41 \\ 0.45 \end{bmatrix} \cdot \frac{\text{ohm}}{\text{km}}$$

$$b_0 = \begin{bmatrix} 2.749 \\ 2.032 \\ 2.51 \\ 2.451 \\ 2.69 \end{bmatrix} \cdot 10^{-6} \cdot \frac{\text{siemens}}{\text{km}} \quad l = \begin{bmatrix} 98 \\ 95 \\ 135 \\ 150 \\ 110 \end{bmatrix} \cdot \text{km}$$

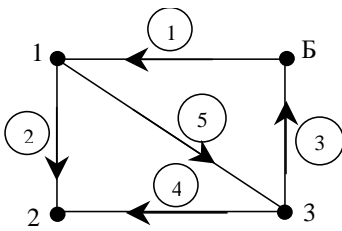
Мощности нагрузки узлов:

$$P_H = \begin{bmatrix} 80 \\ 130 \\ 190 \end{bmatrix} \cdot \text{Mwatt} \quad Q_H = \begin{bmatrix} 50 \\ 85 \\ 80 \end{bmatrix} \cdot \text{Mvar}$$

Вариант 5

Расчетная схема

Исходные данные



$$r_0 = \begin{bmatrix} 0.14 \\ 0.11 \\ 0.045 \\ 0.25 \\ 0.13 \end{bmatrix} \cdot \frac{\text{ohm}}{\text{km}} \quad x_0 = \begin{bmatrix} 0.4 \\ 0.35 \\ 0.47 \\ 0.41 \\ 0.4 \end{bmatrix} \cdot \frac{\text{ohm}}{\text{km}}$$

$$b_0 = \begin{bmatrix} 2.39 \\ 2.092 \\ 2.809 \\ 2.451 \\ 2.391 \end{bmatrix} \cdot 10^{-6} \cdot \frac{\text{siemens}}{\text{km}} \quad l = \begin{bmatrix} 96 \\ 121 \\ 130 \\ 75 \\ 120 \end{bmatrix} \cdot \text{km}$$

Мощности нагрузки узлов:

$$P_H = \begin{bmatrix} 60 \\ 75 \\ 120 \end{bmatrix} \cdot \text{Mwatt} \quad Q_H = \begin{bmatrix} 30 \\ 35 \\ 60 \end{bmatrix} \cdot \text{Mvar}$$

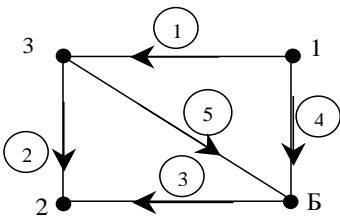
Вариант 6

Расчетная схема

Исходные данные

$$r_0 = \begin{bmatrix} 0.12 \\ 0.13 \\ 0.2 \\ 0.21 \\ 0.12 \end{bmatrix} \cdot \frac{\text{ohm}}{\text{km}} \quad x_0 = \begin{bmatrix} 0.42 \\ 0.43 \\ 0.39 \\ 0.4 \\ 0.25 \end{bmatrix} \cdot \frac{\text{ohm}}{\text{km}}$$

$$b_0 = \begin{bmatrix} 2.51 \\ 2.57 \\ 2.331 \\ 2.391 \\ 1.494 \end{bmatrix} \cdot 10^{-6} \cdot \frac{\text{siemens}}{\text{km}} \quad l = \begin{bmatrix} 90 \\ 187 \\ 110 \\ 57 \\ 110 \end{bmatrix} \cdot \text{km}$$



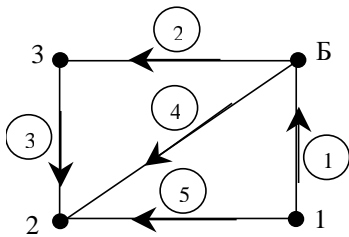
Мощности нагрузки узлов:

$$P_H = \begin{bmatrix} 90 \\ 120 \\ 110 \end{bmatrix} \cdot \text{Mwatt} \quad Q_H = \begin{bmatrix} 50 \\ 65 \\ 55 \end{bmatrix} \cdot \text{Mvar}$$

Вариант 7

Расчетная схема

Исходные данные



$$r_0 = \begin{bmatrix} 0.11 \\ 0.12 \\ 0.382 \\ 0.25 \\ 0.12 \end{bmatrix} \cdot \frac{\text{ohm}}{\text{km}} \quad x_0 = \begin{bmatrix} 0.4 \\ 0.45 \\ 0.39 \\ 0.39 \\ 0.45 \end{bmatrix} \cdot \frac{\text{ohm}}{\text{km}}$$

$$b_0 = \begin{bmatrix} 2.391 \\ 2.69 \\ 2.331 \\ 2.331 \\ 2.69 \end{bmatrix} \cdot 10^{-6} \cdot \frac{\text{siemens}}{\text{km}}$$

$$l = \begin{bmatrix} 85 \\ 180 \\ 120 \\ 87 \\ 90 \end{bmatrix} \cdot \text{km}$$

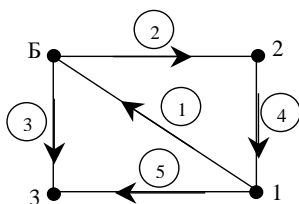
Мощности нагрузки узлов:

$$P_H = \begin{bmatrix} 70 \\ 180 \\ 120 \end{bmatrix} \cdot \text{Mwatt} \quad Q_H = \begin{bmatrix} 30 \\ 90 \\ 65 \end{bmatrix} \cdot \text{Mvar}$$

Вариант 8

Расчетная схема

Исходные данные



$$r_0 = \begin{bmatrix} 0.21 \\ 0.15 \\ 0.38 \\ 0.12 \\ 0.14 \end{bmatrix} \cdot \frac{\text{ohm}}{\text{km}} \quad x_0 = \begin{bmatrix} 0.35 \\ 0.22 \\ 0.4 \\ 0.4 \\ 0.45 \end{bmatrix} \cdot \frac{\text{ohm}}{\text{km}}$$

$$b_0 = \begin{bmatrix} 2.092 \\ 1.315 \\ 2.391 \\ 2.391 \\ 2.69 \end{bmatrix} \cdot 10^{-6} \cdot \frac{\text{siemens}}{\text{km}} \quad l = \begin{bmatrix} 115 \\ 80 \\ 50 \\ 77 \\ 92 \end{bmatrix} \cdot \text{km}$$

Мощности нагрузки узлов:

$$P_H = \begin{bmatrix} 60 \\ 110 \\ 90 \end{bmatrix} \cdot \text{Mwatt} \quad Q_H = \begin{bmatrix} 30 \\ 70 \\ 45 \end{bmatrix} \cdot \text{Mvar}$$

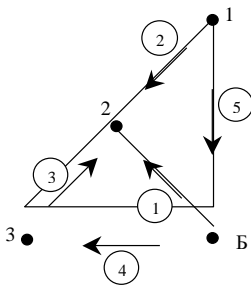
Вариант 9

Расчетная схема

Исходные данные

$$r_0 = \begin{bmatrix} 0.31 \\ 0.17 \\ 0.27 \\ 0.12 \\ 0.13 \end{bmatrix} \cdot \frac{\text{ohm}}{\text{km}} \quad x_0 = \begin{bmatrix} 0.45 \\ 0.4 \\ 0.37 \\ 0.5 \\ 0.6 \end{bmatrix} \cdot \frac{\text{ohm}}{\text{km}}$$

$$b_0 = \begin{bmatrix} 2.692 \\ 2.391 \\ 2.211 \\ 2.989 \\ 3.586 \end{bmatrix} \cdot 10^{-6} \cdot \frac{\text{siemens}}{\text{km}} \quad l = \begin{bmatrix} 95 \\ 86 \\ 67 \\ 89 \\ 119 \end{bmatrix} \cdot \text{km}$$



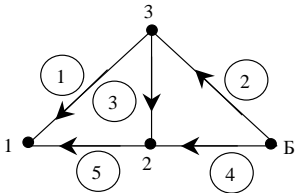
Мощности нагрузки узлов:

$$P_H = \begin{bmatrix} 89 \\ 176 \\ 95 \end{bmatrix} \cdot \text{Mwatt} \quad Q_H = \begin{bmatrix} 40 \\ 85 \\ 45 \end{bmatrix} \cdot \text{Mvar}$$

Вариант 10

Расчетная схема

Исходные данные



$$r_0 = \begin{bmatrix} 0.21 \\ 0.15 \\ 0.38 \\ 0.12 \\ 0.14 \end{bmatrix} \cdot \frac{\text{ohm}}{\text{km}}$$

$$x_0 = \begin{bmatrix} 0.35 \\ 0.22 \\ 0.4 \\ 0.4 \\ 0.45 \end{bmatrix} \cdot \frac{\text{ohm}}{\text{km}}$$

$$b_0 = \begin{bmatrix} 2.092 \\ 1.315 \\ 2.391 \\ 2.391 \\ 2.69 \end{bmatrix} \cdot 10^{-6} \cdot \frac{\text{siemens}}{\text{km}}$$

$$l = \begin{bmatrix} 115 \\ 80 \\ 50 \\ 77 \\ 92 \end{bmatrix} \cdot \text{km}$$

Мощности нагрузки узлов:

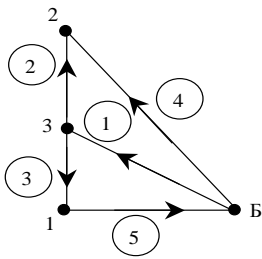
$$P_H = \begin{bmatrix} 60 \\ 110 \\ 90 \end{bmatrix} \cdot \text{Mwatt}$$

$$Q_H = \begin{bmatrix} 30 \\ 70 \\ 45 \end{bmatrix} \cdot \text{Mva}$$

Вариант 11

Расчетная схема

Исходные данные



$$r_0 = \begin{bmatrix} 0.21 \\ 0.17 \\ 0.38 \\ 0.19 \\ 0.13 \end{bmatrix} \cdot \frac{\text{ohm}}{\text{km}} \quad x_0 = \begin{bmatrix} 0.39 \\ 0.26 \\ 0.41 \\ 0.41 \\ 0.45 \end{bmatrix} \cdot \frac{\text{ohm}}{\text{km}}$$

$$b_0 = \begin{bmatrix} 2.331 \\ 1.554 \\ 2.451 \\ 2.451 \\ 2.69 \end{bmatrix} \cdot 10^{-6} \cdot \frac{\text{siemens}}{\text{km}} \quad l = \begin{bmatrix} 95 \\ 88 \\ 56 \\ 110 \\ 95 \end{bmatrix} \cdot \text{km}$$

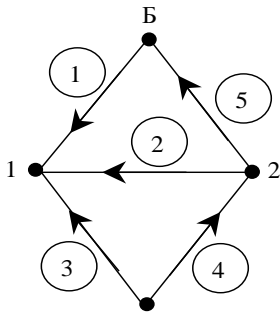
Мощности нагрузки узлов:

$$P_H = \begin{bmatrix} 120 \\ 90 \\ 75 \end{bmatrix} \cdot \text{Mwatt} \quad Q_H = \begin{bmatrix} 60 \\ 40 \\ 35 \end{bmatrix} \cdot \text{Mvar}$$

Вариант 12

Расчетная схема

Исходные данные



$$r_0 = \begin{bmatrix} 0.24 \\ 0.14 \\ 0.3 \\ 0.12 \\ 0.13 \end{bmatrix} \cdot \frac{\text{ohm}}{\text{km}} \quad x_0 = \begin{bmatrix} 0.25 \\ 0.2 \\ 0.35 \\ 0.2 \\ 0.4 \end{bmatrix} \cdot \frac{\text{ohm}}{\text{km}}$$

$$b_0 = \begin{bmatrix} 1.494 \\ 1.195 \\ 2.092 \\ 1.195 \\ 2.391 \end{bmatrix} \cdot 10^{-6} \cdot \frac{\text{siemens}}{\text{km}} \quad l = \begin{bmatrix} 95 \\ 88 \\ 56 \\ 77 \\ 95 \end{bmatrix} \cdot \text{km}$$

Мощности нагрузки узлов:

$$P_H = \begin{bmatrix} 90 \\ 110 \\ 80 \end{bmatrix} \cdot \text{Mwatt} \quad Q_H = \begin{bmatrix} 40 \\ 70 \\ 35 \end{bmatrix} \cdot \text{Mvar}$$

Рекомендуемая литература

1. Моделирование в электроэнергетике [Электронный ресурс]: учеб. пособие / А.Ф. Шаталов, И. Воротников, М. Мастепаненко, и др. ; Министерство сельского хозяйства Российской Федерации, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования Ставропольский государственный аграрный университет. - Ставрополь : Агрус, 2014. - 140 с. (ЭБС «Университетская библиотека онлайн»).
2. Костин, В.Н. Электроэнергетические системы и сети : учеб. пособие / В. Н. Костин. - Санкт-Петербург : Троицкий мост, 2015. - 304 с.
3. Идельчик В.И. Электрические системы и сети. Учебник для вузов. – Москва: Энергоатомиздат, 1989. – 592с.
4. Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле: Учебник для вузов/ Л.А. Бессонов, 9-е изд. – Москва: Гардарики, 2001. – 317 с.
5. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи: Учебник для вузов/ Л.А. Бессонов, 9-е изд. – М.: Гардарики, 2001. – 638 с.
6. Мельников, Н.А. Электрические сети и системы: учеб. / Н. А. Мельников, 2-е изд., стереотип. - Москва: Энергия, 1975. – 463 с.
7. Голубев М. Л. Методы расчета токов короткого замыкания в распределительных сетях. Москва: Энергия, 1967. – 59 с. (ЭБС «Университетская библиотека онлайн»)
8. Короткие замыкания и несимметричные режимы электроустановок: учебное пособие для студентов вузов / И.П. Крючков, В.А. Старшинов, Ю.П. Гусев, М.В. Пираторов. – Москва: Издательский дом МЭИ, 2008. – 471 с.
9. Переходные процессы в электроэнергетических системах: учебник для вузов / И.П. Крючков, В.А. Старшинов, Ю.П. Гусев, М.В. Пираторов; под ред. И.П. Крюčkова. – 2-е изд., стер. – Москва: Издательский дом МЭИ, 2009. – 414 с.

10. Рекус, Г.Г. Сборник задач и упражнений по электротехнике и основам электроники: учеб. пособие / Г.Г. Рекус, А.И. Белоусов. – изд. 2-е, перераб. - Москва: Директ-Медиа, 2014. – 417 с. (ЭБС «Университетская библиотека онлайн»)

Локальный электронный методический материал

Дарья Константиновна Кугучева

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ

Редактор И. Голубева

Локальное электронное издание

Уч.-изд. л. 3,8. Печ. л. 3,5

Издательство федерального государственного бюджетного
образовательного учреждения высшего образования
«Калининградский государственный технический университет».
236022, Калининград, Советский проспект, 1