

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования

**НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

С. Г. Обухов

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Методические указания к выполнению лабораторных работ
для студентов ИнЭО, обучающихся по направлению
140400 «Электроэнергетика и электротехника»,
профиль «Электроснабжение промышленных предприятий»

Издательство
Томского политехнического университета
2014

УДК 532.5(076.5)+62–135(076.5)
ББК 22.253.3+31.363я73
О–266

Обухов С.Г.

О–266 Математическое моделирование в системах электроснабжения: методические указания к выполнению лабораторных работ по курсу «Математическое моделирование в системах электроснабжения» для студентов ИнЭО, обучающихся по направлению 140400 «Электроэнергетика и электротехника», профиль «Электроснабжение промышленных предприятий» / С.Г.Обухов; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. – 74 с.

УДК 532.5(076.5)+62–135(076.5)
ББК 22.253.3+31.363я73

Методические указания рассмотрены и рекомендованы
к изданию методическим семинаром кафедры
электроснабжения промышленных предприятий ЭНИН
« 07 » мая 2014 г., протокол №2

Зав. кафедрой ЭПП
доктор технических наук

_____ Б.В.Лукутин

Председатель учебно-методической
комиссии

_____ А.В. Кабышев

Рецензент:

доцент кафедры общей электротехники и автоматики ТГАСУ, к.т.н.
В.М.Педиков

© ГОУ ВПО НИ ТПУ, 2014
© Обухов С.Г., 2014
© Обложка. Издательство Томского
политехнического университета, 2014

1. МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Основной задачей моделирования режимов систем электроснабжения является определение предельных параметров режима в нормальных и аварийных условиях работы – значений токов, напряжений и мощностей в отдельных ветвях и узлах системы. По параметрам режима производится выбор основного электрооборудования: количества и мощности силовых трансформаторов, сечений проводников питающих линий, номинальных данных и уставок коммутационных аппаратов и аппаратов защиты и т.д.

Математические модели для анализа режимов работы систем электроснабжения строятся, как правило, на основе моделей «внутреннего механизма». Создание математической модели в этом случае обычно подразумевает составление схемы замещения исследуемой системы, определение ее параметров и расчет токов и напряжений известными математическими методами, используемыми в электротехнике при анализе электрических схем [1].

В настоящем лабораторном практикуме вопросы моделирования режимов рассматриваются на примере одной из самых распространенных задач в электроснабжении – определение токов короткого замыкания.

1.1. Теоретические сведения

Коротким замыканием (КЗ) называется преднамеренное или случайное, не предусмотренное нормальным режимом работы, электрическое соединение двух точек электрической сети между собой или землей, при котором токи в ветвях электроустановки резко возрастают, превышая наибольший допустимый ток продолжительного режима.

КЗ являются одним из основных видов аварий в системах электроснабжения, в связи с чем расчет токов КЗ является важнейшей задачей проектирования таких систем.

На стадии проектировании любой системы электроснабжения необходимо определить максимально возможные (в начале каждого участка) и минимально возможные (в конце участка) токи КЗ. По максимальным токам производится проверка сечений проводников, коммутационных и защитных аппаратов на термическую и динамическую стойкость к токам КЗ; расчет минимальных токов необходим для правильного выбора уставок аппаратов защиты.

В сетях трехфазного электрического тока короткие замыкания могут быть трехфазные, двухфазные и однофазные. Трехфазные и двухфазные короткие замыкания – это симметричные КЗ. В сетях с глухозаземленной нейтралью возможны несимметричные однофазные КЗ при замыкании одной фазы на землю или корпус электроустановки.

Полный ток короткого замыкания определяется суммой вынужденной и свободной составляющих. Вынужденная составляющая тока КЗ обусловлена действием источника питания. Она имеет периодический характер изменения с частотой, равной частоте напряжения источника. Эту составляющую называют периодической составляющей тока КЗ – $i_{пт}$. Свободная составляющая тока КЗ обусловлена изменением энергии магнитного поля в индуктивности электрической цепи, запасенной до момента возникновения КЗ. Свободная составляющая тока КЗ из-за обязательного наличия в электрической цепи активного сопротивления затухает по экспоненциальному закону без перемены знака и называется аperiodической составляющей тока КЗ – $i_{ат}$.

$$i = i_{пт} + i_{ат} \quad (1.1)$$

Наибольшее амплитудное значение полного тока наблюдается через полпериода (0.01 с) после начала КЗ. Этот ток называется ударным током короткого замыкания $i_{уд}$ и определяется как сумма амплитудного значения периодической составляющей тока и мгновенного значения аperiodической составляющей для $t = 0.01с$.

$$i_{уд} = \sqrt{2} k_{уд} I_{п0} \quad (1.2)$$

где $k_{уд}$ – ударный коэффициент тока КЗ; $I_{п0}$ – начальное действующее значение периодической составляющей тока КЗ.

Ударный коэффициент $k_{уд}$ зависит от соотношения между активным и реактивным сопротивлением цепи КЗ, т.е. от расстояния между местом КЗ и источника питания. Значения $k_{уд}$ в зависимости от места КЗ приведены в таблице 1.1 и на рисунке 1.1.

Для определения токов КЗ обычно пользуются методами математического моделирования. Процесс моделирования системы электроснабжения для расчета токов КЗ включает в себя несколько этапов.

Таблица 1.1

Ударные коэффициенты в зависимости от места короткого замыкания

Место короткого замыкания	$k_{уд}$
Выводы явнополюсного генератора с успокоительной обмоткой	1,93
Выводы турбогенератора	1,91
В цепи без учета активного сопротивления	1,8
На стороне до 1000 В трансформаторов мощностью: 1600, 2500 кВ·А 630, 1000 кВ·А 100, 250, 400 кВ·А	1,4
	1,3
	1,2
Удаленные точки КЗ с учетом активного сопротивления	по рис.1.1

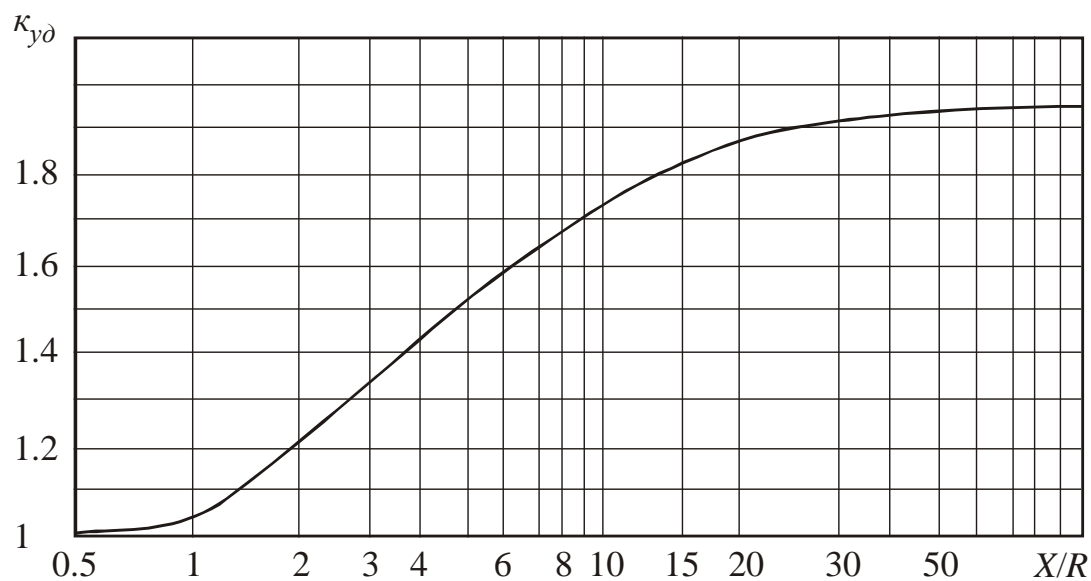


Рис. 1.1. Кривая для определения ударного коэффициента

1. Для упрощения расчетов принимают ряд допущений:

- трехфазную систему считают симметричной;
- не учитывают насыщения магнитных систем, что позволяет считать все цепи линейными, следовательно, может быть применен принцип наложения;
- пренебрегают намагничивающими токами силовых трансформаторов и емкостными проводимостями всех элементов короткозамкнутой сети (кроме воздушных линий 330 кВ и выше и кабельных линий 110 кВ и выше);
- в течение всего процесса КЗ ЭДС генераторов системы считают совпадающими по фазе;
- электродвижущие силы всех источников питания, значительно удаленных от места КЗ, считают неизменными.

Применение таких допущений вполне оправдано, так как они существенно упрощают математическое описание системы, при этом не увеличивая погрешность расчета.

Если указанные допущения принять нельзя, то расчет токов КЗ следует производить более точным способом [2, 3].

2. Для расчета токов КЗ составляется расчетная схема – упрощенная однолинейная схема электроустановки, в которой учитывают все источники питания (генераторы, синхронные компенсаторы, энергосистемы), трансформаторы, воздушные и кабельные линии, реакторы. При составлении расчетной схемы исходят из условий длительной работы электроустановок рассчитываемой сети.

3. По расчетной схеме составляется схема замещения, в которой указываются сопротивления всех элементов и намечаются точки для расчета токов КЗ. Генераторы, трансформаторы большой мощности, воздушные линии, реакторы обычно представляются в схеме замещения их индуктивными сопротивлениями, так как активные сопротивления во много раз меньше индуктивных. Кабельные линии 6-10 кВ, трансформаторы, мощностью до 1000 кВА в схеме замещения представляются индуктивными и активными сопротивлениями.

Все сопротивления схемы замещения подсчитывают в именованных (Ом) или в относительных единицах. При расчете в относительных единицах задаются базовыми величинами: напряжением $U_б$ и мощностью $S_б$.

За базовое напряжение принимают среднее номинальное напряжение той ступени, где производится расчет токов КЗ. Среднее значение напряжения принимают на 5 % выше номинального напряжения сети.

Шкала $U_{\text{ср.ном}}$: 230, 115, 37, 10.5, 6.3, 0.4, 0.23 кВ.

За базовую мощность для удобства подсчетов принимают 100, 1000 МВА или номинальную мощность самого большого трансформатора.

Для определения токов КЗ используют следующие формулы:

а) трехфазное КЗ, кА

$$I_{\text{кз}}^{(3)} = \frac{U_{\text{ср.ном}}}{\sqrt{3} Z_{\text{рез}}}, \quad (1.3)$$

где $I_{\text{кз}}^{(3)}$ – действующее значение установившегося тока КЗ; $U_{\text{ср.ном}}$ – среднее номинальное (линейное) напряжение системы, приведенное к ступени, на которой рассматривается КЗ; $Z_{\text{рез}}$ – полное (или индуктивное) сопротивление до места КЗ.

б) двухфазное КЗ, кА

$$I_{\text{кз}}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} I_{\text{кз}}^{(3)} = 0,87 I_{\text{кз}}^{(3)} \quad (1.4)$$

в) однофазное КЗ, кА

$$I_{\text{кз}}^{(1)} = \frac{U_{\text{ф}}}{\frac{Z_{\text{тр}}^{(1)}}{3} + Z_{\text{ф-0}}}. \quad (1.5)$$

где $U_{\text{ф}}$ – фазное напряжение в точке КЗ, кВ;

$Z_{\text{ф-0}}$ – полное сопротивление петли «фаза нуль» до точки КЗ, Ом;

$Z_{\text{тр}}^{(1)}$ – полное сопротивление трансформатора при однофазном КЗ, Ом.

Величина $Z_{\text{тр}}^{(1)}$ сильно зависит от схемы соединения его обмоток.

При схемах соединений Δ / Y_n и Y / Z_n величина $Z_{\text{тр}}^{(1)} / 3$ равна сопротивлению трансформатора при трех- или двухфазном КЗ и определяется по выражению:

$$Z_{\text{тр}} = \frac{u_{\text{кз}} \cdot U_{\text{ном}}^2}{100 S_{\text{ном тр}}}. \quad (1.6)$$

Для указанных схем соединений при питании от системы бесконечной мощности ток однофазного КЗ на выводах трансформатора равен току трехфазного КЗ:

$$I_{\text{кз}}^{(1)} = \frac{U_{\phi}}{Z_{\text{тр}}} = \frac{U_{\text{ном}}}{\sqrt{3} Z_{\text{тр}}} = I_{\text{кз}}^{(3)}. \quad (1.7)$$

При соединении Y / Y_n – $Z_{\text{тр}}^{(1)} \neq 3 Z_{\text{тр}}$. Определенная экспериментальным путем величина $Z_{\text{тр}}^{(1)}$ приведена в таблице 1.2.

Полное сопротивление петли короткого замыкания $Z_{\phi-0}$ состоит из сопротивлений фазного и нулевого проводов.

4. Моделирование отдельных элементов системы электроснабжения производится следующим образом:

а) Электрическая система (источник питания)

Электрическая система с достаточной для практических расчетов точностью моделируется источником ЭДС за индуктивным сопротивлением (активным сопротивлением системы обычно пренебрегают, ввиду его малости).

Величина ЭДС принимается равным среднему номинальному напряжению сети $U_{\text{ср.ном}}$, кВ.

Индуктивное сопротивление системы находится по значению мощности КЗ на выводах обмотки высшего напряжения питающего трансформатора:

$$x_{\text{сист}} = \frac{(U_{\text{ср.ном}})^2}{S_{\text{кз сист.}}},$$

где $S_{\text{кз.сист.}}$ – мощность КЗ системы, кВА.

При отсутствии данных о величине $S_{\text{кз сист.}}$ значение $x_{\text{сист}}$ может быть определено по номинальному току отключения выключателя $I_{\text{ном откл}}$, установленного в питающей сети напряжением выше 1000 В:

$$x_{\text{сист}} = \frac{U_{\text{ср.ном}}}{\sqrt{3} \cdot I_{\text{ном откл}}}.$$

Электроустановки объектов электроснабжения напряжением до 1000 В обычно запитываются от понижающих трансформаторов с номинальной мощностью $S_{\text{ном тр.}} = 25 \dots 2500$ кВА. Если мощность КЗ на стороне высшего напряжения трансформатора $S_{\text{кз сист.}} \geq 25 \cdot S_{\text{ном тр.}}$, то периодическая составляющая тока КЗ будет неизменной. В большинстве случаев для цеховых сетей это соотношение выполняется. Тогда можно считать, что КЗ в сетях до 1000 В питается от системы с неограниченной мощностью, т.е. $x_{\text{сист.}} = 0$.

б) Двухобмоточный силовой трансформатор

При моделировании схемы замещения силовых трансформаторов для расчета токов КЗ пренебрегают поперечными составляющими, которые в данной постановке задачи не актуальны.

Полное сопротивление двухобмоточных трансформаторов определяется по выражению:

$$Z_{\text{тр}} = \frac{u_{\text{кз}} U_{\text{НОМ}}^2}{100 \cdot S_{\text{НОМ.тр}}}, \text{ или } Z_{\text{тр}} = \sqrt{R_{\text{тр}}^2 + X_{\text{тр}}^2},$$

а активное и индуктивное – по соотношениям:

$$R_{\text{тр}} = \frac{\Delta P_{\text{кз}} U_{\text{НОМ}}^2}{S_{\text{НОМ}}^2}; \quad X_{\text{тр}} = \sqrt{\left(\frac{u_{\text{кз}}}{100}\right)^2 - \left(\frac{\Delta P_{\text{кз}}}{S_{\text{НОМ}}}\right)^2} \cdot \frac{U_{\text{НОМ}}^2}{S_{\text{НОМ}}}$$

где $u_{\text{кз}}$ – напряжение короткого замыкания, %; $U_{\text{НОМ}}$ – номинальное напряжение трансформатора, В; $\Delta P_{\text{кз}}$ – потери короткого замыкания, кВт; $S_{\text{НОМ}}$ – номинальная мощность трансформатора, кВА.

Сопротивление трансформатора будет приведено к тому напряжению, которое подставляется в качестве $U_{\text{НОМ}}$.

Значения сопротивлений трансформаторов приведены в таблице 1.2.

в) Проводники

В качестве проводников электрической энергии в системах электроснабжения используют воздушные линии (ВЛ), кабельные линии (КЛ), провода и шинопроводы, которые моделируются активными и индуктивными сопротивлениями:

$$R = r_0 \cdot L, \quad x = x_0 \cdot L$$

где r_0 , x_0 , – удельные активное и индуктивное сопротивления, Ом/м;

L – протяженность линии, м.

В таблице 1.3 приведены сопротивления шинопроводов, в таблице 1.5 – сопротивления проводов и кабелей. Для неизолированных проводов удельное активное сопротивление дано в таблице 1.6, реактивное в таблице 1.11. При отсутствии данных x_0 принимается в соответствии с таблицей 1.7.

г) Контактные соединения, измерительные приборы, коммутационные и защитные аппараты.

Сопротивления токопровода (шин) от трансформатора к автоматическому выключателю ориентировочно принимаются равными $R_{ш} = 0.5$ мОм, а $X_{ш} = 2.25$ мОм. Значения переходного сопротивления

контактов для различных ступеней электроснабжения даны в таблице 1.4, а неподвижных контактных соединений – в таблице 1.8.

Сопротивления первичных обмоток трансформаторов тока $R_{т.т}$ и $X_{т.т}$ приведены в таблице 1.9, а сопротивления токовых катушек расцепителей автоматических выключателей R_a и X_a и переходные сопротивления контактов R_k отключающих аппаратов – в таблице 1.10.

Таблица 1.2

Сопротивления понижающих трансформаторов мощностью до 1600 кВ·А, приведенные к вторичному напряжению 0,4/0,23 кВ

Мощность, кВА	Верхний предел первичного напряжения, кВ	Схема соединений обмоток	$\Delta P_{кз}$, кВт	$u_{кз}$, %	$R_{тр}$, мОм	$X_{тр}$, мОм	$Z_{тр}$, мОм	$Z_{тр}^{(1)}$, мОм
63	10	Y/Y _H	1,28	4,5	52	102	114	1237
100	10	Y/Y _H	1,97	4,5	31,5	64,7	72	779
160	10	Y/Y _H	2,65	4,5	16,6	41,7	45	487
250	10	Y/Y _H	3,7	4,5	9,4	27,2	28,7	312
400	10	Y/Y _H	5,5	4,5	5,5	17,1	18	195
630	10	Y/Y _H	7,6	5,5	3,1	13,6	14	129
1000	10	Y/Y _H	12,2	5,5	2	8,5	8,8	81
1600	10	Y/Y _H	18	5,5	1	5,4	5,4	54

Таблица 1.3

Удельные сопротивления комплектных шинопроводов

Параметры	Тип комплектного шинопровода						
	ШМА				ШРА		
$I_{ном}$, А	1250	1600	2500	3200	250	400	630
r_0 , мОм/м	0,034	0,030	0,017	0,015	0,21	0,15	0,10
x_0 , мОм/м	0,016	0,014	0,008	0,007	0,21	0,17	0,13
$r_{0(\phi-0)}$, мОм/м	0,068	0,060	0,034	0,030	0,42	0,30	0,20
$x_{0(\phi-0)}$, мОм/м	0,053	0,060	0,075	0,044	0,42	0,24	0,26
$z_{0(\phi-0)}$, мОм/м	0,086	0,087	0,082	0,053	0,59	0,38	0,33

Таблица 1.4

Переходные сопротивления на ступенях распределения

Ступень	Место	$R_{\text{ступ.}}$, мОм	Дополнительные сведения
1	Распределительные устройства подстанции	15	Используются при отсутствии достоверных данных о контактах и их переходных сопротивлениях в сетях, питающихся от цеховых трансформаторов мощностью до 2500 кВА включительно
2	Первичные распределительные цеховые пункты	20	
3	Вторичные распределительные цеховые пункты	25	
4	Аппаратура управления электроприемников, получающих питания от вторичных РП	30	

Таблица 1.5

Активное и индуктивное сопротивления проводов и кабелей с алюминиевыми и медными жилами

Сечение, мм ²	Сопротивление, мОм/м					
	активное		индуктивное			
	алюминий	медь	провода открыто проложенные	кабель с бумажной поясной изоляцией	провода в трубах, кабель с любой изоляцией (кроме бумажной)	воздушная линия до 1000 В
2,5	12,5	7,4	0,358	0,104	0,116	—
4,0	7,81	4,63	0,343	0,095	0,107	—
6,0	5,21	3,09	0,330	0,09	0,1	—
10	3,12	1,84	0,307	0,073	0,099	—
16	1,95	1,16	0,293	0,0675	0,095	0,354
25	1,25	0,74	0,278	0,0662	0,091	0,339
35	0,894	0,53	0,268	0,0637	0,088	0,330
50	0,625	0,37	0,256	0,0625	0,085	0,317
70	0,447	0,265	0,245	0,0612	0,082	0,307
95	0,329	0,195	0,236	0,0602	0,081	0,297
120	0,261	0,154	0,229	0,0602	0,080	0,293
150	0,208	0,124	0,21	0,0596	0,079	—
185	0,169	0,1	0,21	0,0596	0,078	—
240	0,130	0,077	0,20	0,0587	0,077	—

Таблица 1.6

Активное сопротивление 1 км кабельных и воздушных линий, Ом/км

Площадь сечения, мм ²	Жила трехжильного кабеля		Фаза, выполненная проводом марки			
	алюминиевая	медная	А	АС и АСО	АСУ	М
1	—	18,5	—	—	—	—
1,5	—	12,5	—	—	—	—
2,5	12,5	7,4	—	—	—	—
4	7,81	4,63	—	—	—	—
6	5,21	3,09	—	—	—	3,06
10	3,12	1,84	—	—	—	1,84
16	1,95	1,16	1,98	2,06	—	1,2
25	1,25	0,74	1,28	1,31	—	0,74
35	0,894	0,53	0,92	0,85	—	0,54
50	0,625	0,37	0,64	0,65	—	0,39
70	0,447	0,265	0,46	0,46	—	0,28
95	0,329	0,195	0,34	0,37	—	0,2
120	0,261	0,154	0,27	0,27	0,28	0,158
150	0,208	0,124	0,21	0,21	0,21	0,128
185	0,169	0,1	0,185	0,17	0,17	0,103
240	0,13	0,077	—	0,132	0,131	0,078
300	—	—	—	0,107	0,106	—
400	—	—	—	0,08	0,079	—

Таблица 1.7

Среднее значения погонных реактивных сопротивлений линий сети

Характеристика линий	x_0 , МОм/м
Кабельные линии напряжением: до 1000 В 6–10 кВ	0,06 0,08
Изолированные провода внутренней проводки	0,11
Шинопроводы	0,15
Воздушные линии напряжением: до 1000 В 6–10 кВ 35–220 кВ 500 кВ (с тремя проводами в фазе)	0,31 0,38 0,40 0,29

Таблица 1.8

Активные переходные сопротивления неподвижных контактных соединений

Кабель		Комплектный шинопровод	
$S, \text{мм}^2$	$R_K, \text{МОм}$	$I_{\text{ном}}, \text{А}$	$R_K, \text{МОм}$
16	0,085	<i>Распределительный</i>	
25	0,064	250	0,009
35	0,056	400	0,006
50	0,043	630	0,0037
70	0,029	<i>Магистральный</i>	
95	0,027	1600	0,0034
120	0,024	2500	0,0024
185	0,021	3200	0,0012
240	0,012	4000	0,0011

Таблица 1.9

Средние значения сопротивлений первичных обмоток трансформаторов тока

Коэффициент трансформации	Сопротивления, МОм, трансформаторов тока класса точности			
	1		3	
	$X_{\text{т.т}}$	$R_{\text{т.т}}$	$X_{\text{т.т}}$	$R_{\text{т.т}}$
20/5	67	42	17	19
30/5	30	20	8	8,2
40/5	17	11	4,2	4,8
50/5	11	7	2,8	3
75/5	4,8	3	1,2	1,3
100/5	1,7	2,7	0,7	0,75
150/5	1,2	0,75	0,3	0,33
200/5	0,67	0,42	0,17	0,19
300/5	0,3	0,2	0,08	0,09
400/5	0,17	0,11	0,04	0,05
600/5	0,07	0,05	0,02	0,02

Таблица 1.10

Средние значения сопротивлений отключающих аппаратов

Номинальный ток, А	Сопротивления расцепителей авт. выключателей при 65°C, мОм		Переходные сопротивления контактов, R_k , мОм		
	R_a	X_a	авт. выкл.	рубильников	разъединителей
50	5,50	4,50	1,3	—	—
70	2,40	2,00	1,00	—	—
100	1,30	1,20	0,75	0,50	—
150	0,70	0,70	0,70	0,45	—
200	0,40	0,50	0,60	0,40	—
400	0,15	0,17	0,40	0,20	0,20
600	0,12	0,13	0,25	0,15	0,15
1000	0,10	0,10	0,15	0,08	0,08
1600	0,08	0,08	0,10	—	0,06
2000	0,07	0,08	0,08	—	0,03
2500	0,06	0,07	0,07	—	0,03
3000	0,05	0,07	0,06	—	0,02
4000	0,04	0,05	0,05	—	—

Таблица 1.11

Реактивное сопротивление неизолированных алюминиевых и сталеалюминевых проводов, Ом/км

Марка	При среднем геометрическом расстоянии между проводами, мм									
	800	1000	1500	2000	2500	3000	3500	4000	4500	5000
A-35	0,352	0,366	0,391	0,410	—	—	—	—	—	—
A-50	0,341	0,355	0,380	0,398	0,413	0,423	0,433	0,442	—	—
A-70	0,331	0,345	0,370	0,388	0,402	0,413	0,423	0,431	—	—
A-95	0,319	0,333	0,358	0,377	0,393	0,402	0,413	0,421	—	—
A-120	0,313	0,327	0,352	0,371	0,385	0,396	0,405	0,414	—	—
A-150	0,305	0,315	0,344	0,363	0,376	0,388	0,398	0,406	0,416	0,422
A-185	0,298	0,311	0,339	0,355	0,370	0,382	0,391	0,399	0,409	0,416
A-240	—	0,304	0,329	0,347	0,361	0,372	0,382	0,391	0,401	0,406
A-300	—	0,297	0,322	0,340	0,354	0,366	0,376	0,381	0,394	0,401
A-400	—	0,289	0,315	0,331	0,344	0,356	0,366	0,374	0,386	0,391
A-500	—	0,281	0,305	0,324	0,337	0,348	0,389	0,366	0,377	0,383
A-600	—	0,275	0,300	0,318	0,330	0,343	0,353	0,361	0,370	0,377
AC-16	0,374	0,389	0,411	0,430	0,442	—	—	—	—	—
AC-25	0,362	0,376	0,398	0,407	0,417	0,431	—	—	—	—
AC-35	0,346	0,362	0,385	0,403	0,412	0,429	0,438	0,446	—	—
AC-50	0,338	0,353	0,374	0,392	0,406	0,418	0,427	0,435	—	—
AC-70	0,327	0,341	0,364	0,382	0,396	0,408	0,417	0,425	0,433	0,440
AC-95	0,317	0,331	0,353	0,371	0,385	0,397	0,406	0,414	0,422	0,429
AC-120	0,309	0,323	0,347	0,365	0,379	0,391	0,400	0,408	0,416	0,423
AC-150	—	—	—	0,358	0,372	0,384	0,398	0,401	0,409	0,416
AC-185	—	—	—	—	0,365	0,377	0,386	0,394	0,402	0,409
AC-240	—	—	—	—	—	0,369	0,378	0,386	0,394	0,401
AC-300	—	—	—	—	—	0,358	0,368	0,379	0,385	0,395

1.2. Лабораторная работа № 1 «Моделирование схемы электроснабжения для расчёта токов короткого замыкания в сети выше 1000 В»

Цель работы: овладение методикой математического моделирования и расчета токов КЗ в сетях выше 1000 В.

1.2.1. Методические указания

Одной из наиболее известных программ схемотехнического моделирования является Electronics Workbench (разработка фирмы Interactive Image Technologies, www.interactiv.com). Electronics Workbench является доступным и удобным инструментом математического моделирования, предоставляющий пользователю большое количество электронных компонент и контрольно-измерительных приборов, по внешнему виду и характеристикам приближенных к их промышленным аналогам. После составления схемы и её упрощения путем оформления подсхем, моделирование начинается щелчком обычного выключателя. При этом от пользователя скрыт сложный математический алгоритм работы программы, и при ее соответствующей настройке, реальные эксперименты может проводить пользователь, имеющий квалификацию электрика, а не программиста.

Программа Electronics Workbench может быть использована для построения математической модели системы электроснабжения и расчета токов КЗ.

При построении математической модели системы электроснабжения для расчета токов КЗ в среде схемотехнического моделирования Electronics Workbench следует обратить внимание на следующие факторы:

1. По умолчанию тип измерительных приборов в программе установлен на «постоянный ток» - DC. Так как моделирование проводится для системы переменного тока нужно изменить тип используемых измерительных приборов на «переменный ток» - AC. Для этого, открыв двойным щелчком мыши, окно свойств измерительного прибора, выберите вкладку «Value», и в раскрывающемся списке «Mode» установите AC (рис. 1.2). Для уменьшения погрешности измерений можно выставить величину внутреннего сопротивления амперметра в $1 \cdot 10^{-12}$ Ом (Resistance – 1 pΩ).

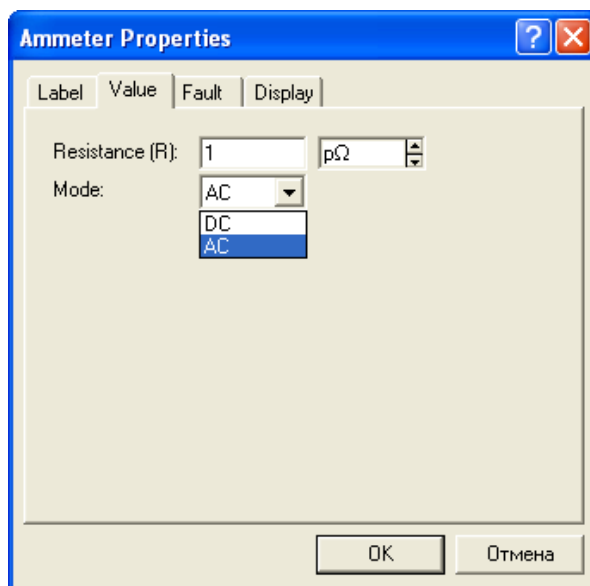


Рис.1.2. Окно свойств амперметра в редакторе Electronics Workbench

2. Величина индуктивных сопротивлений в программе задается не в Ом, а в Гн. Для перехода от величины индуктивного сопротивления, заданного в Ом, к индуктивности в Гн нужно воспользоваться известной формулой:

$$L = \frac{x}{2\pi f}, \text{ где } f - \text{ частота сети, Гц.}$$

1.2.2. Пример расчета

Для схемы электроснабжения (рис. 1.3) требуется составить схему замещения в редакторе Electronics Workbench; определить токи КЗ и составить «сводную ведомость токов КЗ».

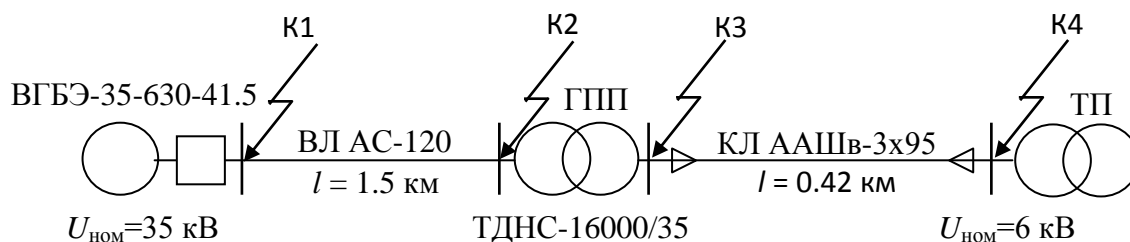


Рис.1.3. Расчетная схема распределительной сети

Определение сопротивлений

Составляем схему замещения для расчета токов КЗ в абсолютных единицах. Так как трехфазная система симметрична, достаточно составить однолинейную схему замещения одной фазы сети.

1. Сопротивление энергосистемы:

Энергосистема моделируется неизменной ЭДС за индуктивным сопротивлением $x_{\text{сист}}$.

Определяем фазную ЭДС энергосистемы:

$$e = \frac{U_{\text{ср.ном}}}{\sqrt{3}} = \frac{37}{\sqrt{3}} = 21.362 \text{ кВ}$$

Определяем сопротивление системы:

$$x_{\text{сист}} = \frac{U_{\text{ср.ном}}}{\sqrt{3} \cdot I_{\text{откл.ном}}} = \frac{37}{\sqrt{3} \cdot 41.5} = 0.515 \text{ Ом}$$

Переходим к индуктивности

$$L = \frac{x_{\text{сист}}}{2\pi f} = \frac{0.515}{2\pi \cdot 50} = 1.639 \text{ мГн}$$

2. Сопротивление воздушной линии 35 кВ:

$$r_{\text{вл}} = r_0 \cdot l = 0.27 \cdot 1.5 = 0.405 \text{ Ом}$$

$$x_{\text{вл}} = x_0 \cdot l = 0.309 \cdot 1.5 = 0.4635 \text{ Ом}$$

где: $l = 1.5$ км - длина воздушной линии;

$r_0 = 0.27$ Ом/км - активное сопротивление провода АС-120 (табл.1.6);

$x_0 = 0.309$ Ом/км - индуктивное сопротивление провода АС-120 (табл.1.11).

Переходим к индуктивности

$$L = \frac{x_{\text{вл}}}{2\pi f} = \frac{0.4635}{2\pi \cdot 50} = 1.476 \text{ мГн}$$

3. Сопротивление трансформатора ТДНС-16000/35 кВА:

$$x = \frac{u_{\text{кз}} \%}{100} \cdot \frac{U_{\text{ср.ном}}^2}{S_{\text{ном.тр}}} = \frac{10.5}{100} \cdot \frac{37^2}{16} = 8.984 \text{ Ом}$$

$$L = \frac{x_{\text{тр}}}{2\pi f} = \frac{8.984}{2\pi \cdot 50} = 28.61 \text{ мГн}$$

Примечание: сопротивление трансформатора можно приводить к любой обмотке (высшего или низшего напряжения). Соответственно сопротивления

трансформатора в схеме замещения должны находиться на том же напряжении, к которому приведен трансформатор.

$S_{\text{ном.тр}} = 16 \text{ МВА}$ - номинальная мощность трансформатора;

$u_{\text{кз}} = 10.5\%$ – напряжение короткого замыкания трансформатора;

Сопротивления трансформатора приведены к обмотке высшего напряжения.

Для моделирования силового трансформатора при расчете токов КЗ в среде Electronics Workbench удобно использовать его линейную модель, окно свойств которой представлено на рис.1.4.

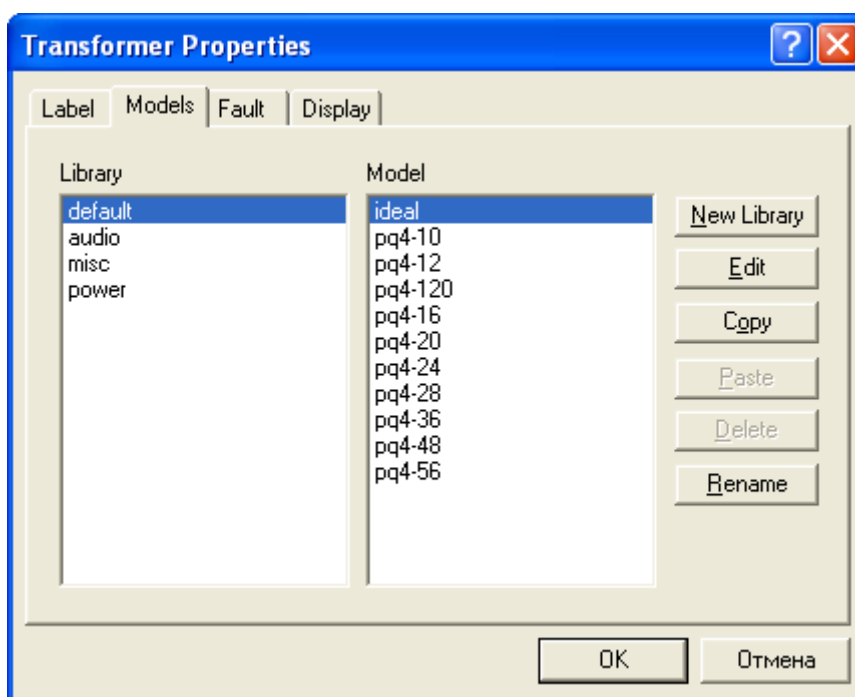


Рис.1.4. Окно свойств линейного трансформатора в редакторе Electronics Workbench

Определим коэффициент трансформации трансформатора ГПП

$$k_{\text{тр}} = \frac{U_{\text{ср.ном.ВН}}}{U_{\text{ср.ном.НН}}} = \frac{37}{6.3} = 5.873, \text{ в окне свойств на вкладке «Models» из}$$

предлагаемой библиотеки (Library) трансформаторов выберем силовой (power), Из предлагаемой базы моделей (Model) силовых трансформаторов выберем идеальный (ideal) и нажмем кнопку редактирования его свойств - Edit. Откроется окно свойств идеального силового трансформатора (рис. 1.5), в которое нужно ввести рассчитанный нами коэффициент трансформации (primary-to-secondary

turns ratio) $k_{тр} = N = 5.873$. Остальные значения параметров трансформатора изменять нет необходимости.

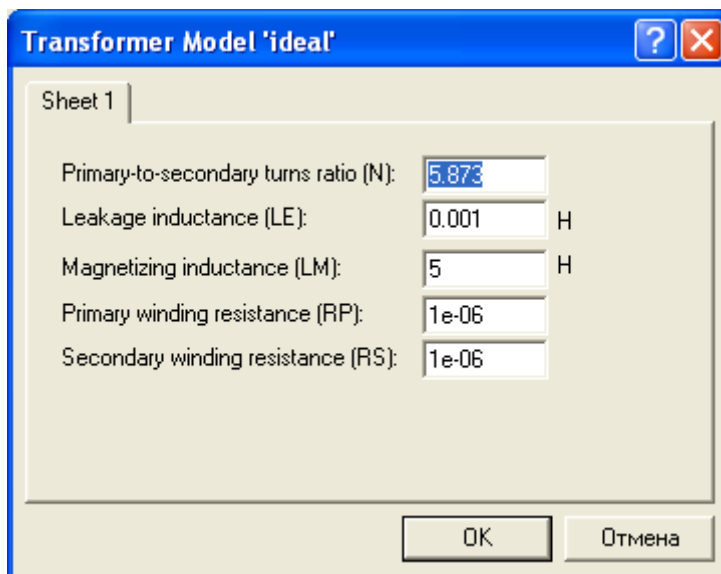


Рис.1.5. Окно свойств идеального силового трансформатора в редакторе Electronics Workbench

4. Сопротивление кабельной линии 6.3 кВ:

$$r_{кл} = r_0 \cdot l = 0.329 \cdot 0.42 = 0.138 \text{ Ом}$$

$$x_{кл} = x_0 \cdot l = 0.0602 \cdot 0.42 = 0.0263 \text{ Ом}$$

где: $l = 0.42$ км – длина кабельной линии;

$r_0 = 0.329$ Ом/км – активное сопротивление кабеля ААШв–(3х95)

(табл.1.6);

$x_0 = 0.0602$ Ом/км – индуктивное сопротивление кабеля ААШв–(3х95) (табл.1.5)

Переходим к индуктивности

$$L = \frac{x_{вл}}{2\pi f} = \frac{0.0263}{2\pi \cdot 50} = 0.081 \text{ мГн}$$

В окне схемотехнического редактора собираем схему замещения для расчета токов КЗ. Для полноты исследования введем в расчетную схему сопротивление нагрузки.

Определим сопротивление нагрузки для одной фазы трансформатора, приняв за коэффициент загрузки силового трансформатора по активной мощности наиболее типичный случай – $K_3 = 0.7$.

$$P_{\text{ф.тр}} = K_3 \cdot S_{\text{тр.ф.ном}} = \frac{U_{\text{ф.ном}}^2}{R_H}, \text{ откуда } R_H = 3.21 \text{ Ом}$$

Математическая модель схемы электроснабжения для расчета токов КЗ в среде Electronics Workbench представлена на рис.1.6.

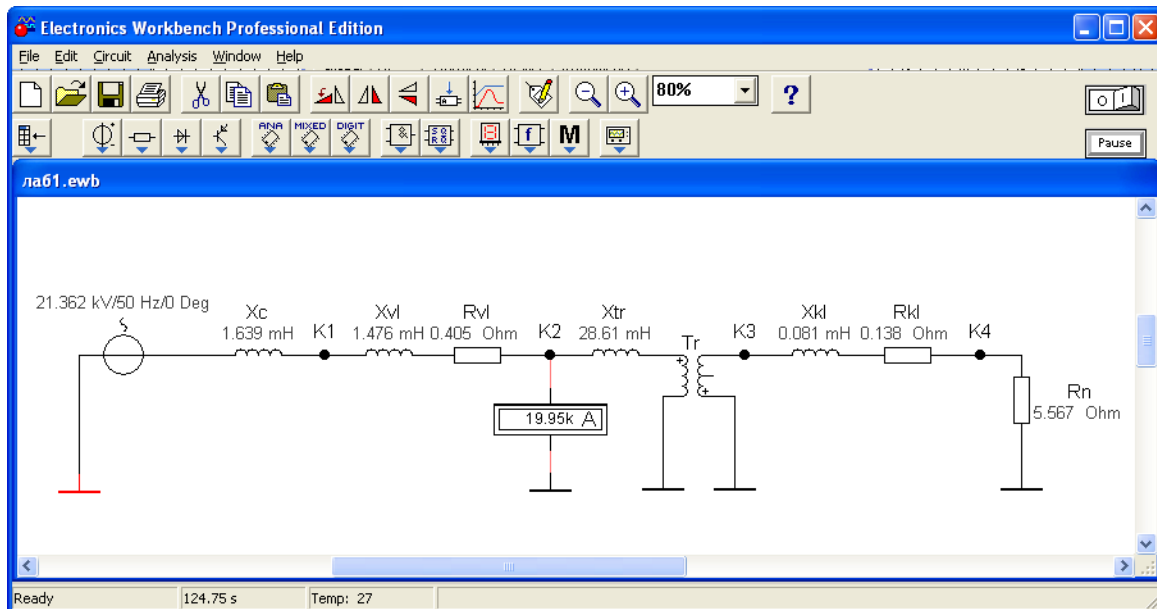


Рис.1.6. Математическая модель схемы электроснабжения для расчета токов КЗ в среде Electronics Workbench

Показания амперметра, подключенного между точкой К2 и землей, иллюстрируют установившееся значение тока КЗ в этой точке. Однако, в отличие от линейной математической модели системы электроснабжения, данная модель позволяет не только определить установившиеся значения токов КЗ в намеченных точках, но изучить поведение системы в переходных процессах.

Добавим в каждую ветвь изучаемой схемы по одному шунтирующему сопротивлению небольшого номинала (например 0.001 Ом) и ключ К для замыкания электрической цепи по команде клавиши клавиатуры ПК. Подключим к шунту электронный осциллограф. Подадим питание на схему и замкнем ключ К.

Модифицированная схема исследований приведена на рис.1.7, экран осциллографа с кривой тока КЗ в расчетной точке К4 на рис.1.8.

Так как, кривые тока и напряжения на активном элементе совпадают, мы можем визуально наблюдать переходный процесс изменения тока в процессе короткого замыкания. С помощью, имеющихся в арсенале осциллографа визиров (на рис.1.7 красная и

синие линии), легко определить величину мгновенного значения напряжения на шунтирующем резисторе в произвольный момент времени, а затем определить и величину тока.

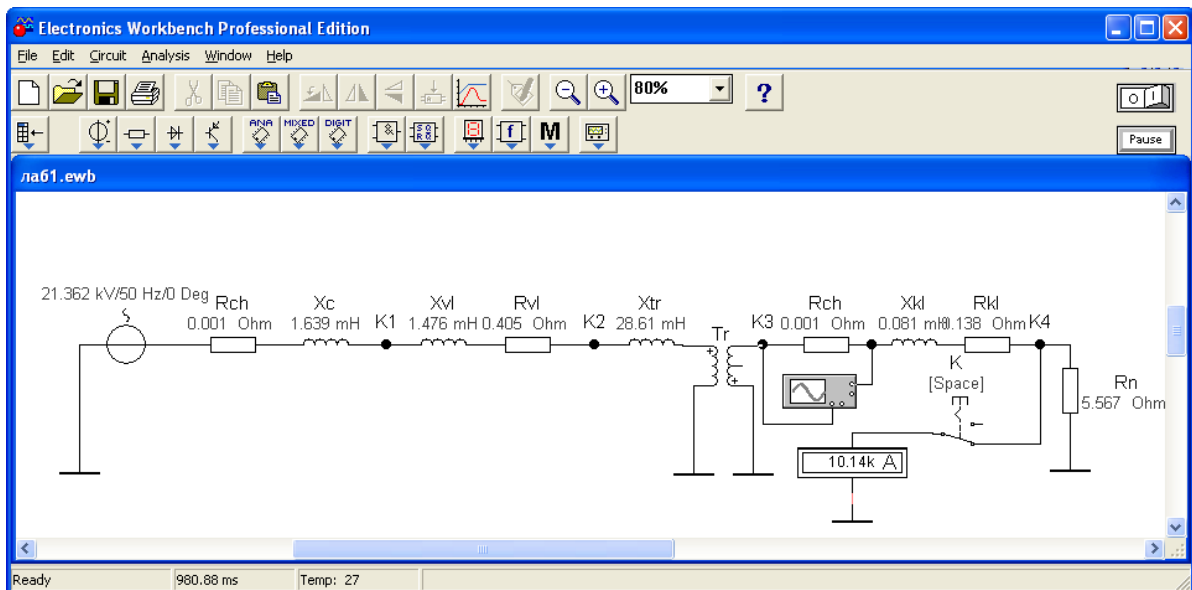


Рис.1.7. Математическая модель схемы электроснабжения для исследования переходных процессов КЗ

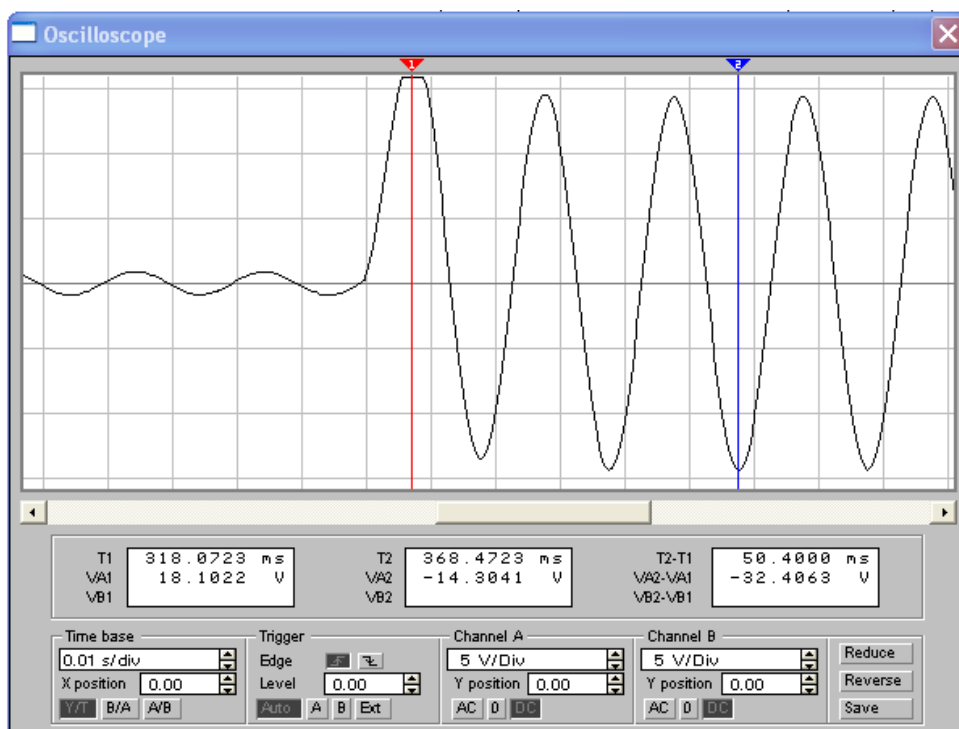


Рис.1.8. Кривая изменения тока в точке К4 во время переходного процесса КЗ

1.2.3. Задание

Для схемы электрической сети выше 1000 В (рис. 1.9) требуется составить схему замещения для определения токов КЗ в программе схемотехнического моделирования Electronics Workbench; определить сопротивления элементов схемы электроснабжения; наметить и обозначить на расчетной схеме и схеме замещения точки расчета токов КЗ; определить токи КЗ и составить «сводную ведомость токов КЗ».

Провести исследования переходных процессов изменения токов во время КЗ, определить по осциллографу значения ударного тока КЗ в каждой точке и длительность переходного процесса КЗ. Сравнить и проанализировать результаты моделирования схемы электроснабжения с результатами, полученными при выполнении ИДЗ.

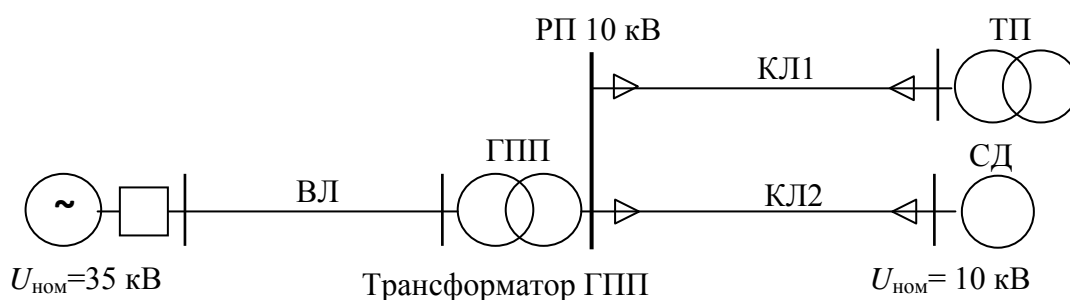


Рис.1.9. Расчетная схема распределительной сети

Варианты заданий приведены в таблице 1.12. Вариант задания определяется преподавателем.

Таблица 1.12

Варианты заданий

№ вар	Система $S_{кз}, \text{ МВА}$	ВЛ		Трансформатор ГПП		КЛ1		КЛ2	
		$S, \text{ мм}^2$	$l, \text{ км}$	$S, \text{ МВА}$	$u_{кз}, \%$	$S, \text{ мм}^2$	$l, \text{ км}$	$S, \text{ мм}^2$	$l, \text{ км}$
1	5000	АС-240	5,6	40	11	150	1,2	95	0,5
2	4000	АС-185	10,2	32	10,5	120	0,6	70	1,2
3	3000	АС-150	5,4	25	10,5	120	0,8	95	0,6
4	2000	АС-120	6,8	16	10,5	95	1,2	50	0,8
5	2000	АС-150	10,5	25	11	95	1,2	120	0,3
6	3000	АС-120	4,1	32	11	70	0,4	70	0,2
7	1000	АС-95	2,2	16	10,5	50	0,2	70	0,5
8	1000	АС-70	3,4	10	10,5	35	0,4	50	0,2
9	2000	АС-240	12,5	32	11	120	2,2	95	1,1
10	3000	АС-185	5	25	10,5	70	3,5	50	0,4

1.2.4. Требования к отчету

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

1. Цель и порядок выполнения работы.
2. Расчетную схему и схему замещения с указанием контрольных точек расчета токов КЗ.
3. Результаты расчетов сопротивлений схемы замещения.
4. Результаты расчетов токов КЗ.
5. Сводную ведомость расчета токов КЗ.
6. Выводы.

1.2.5. Контрольные вопросы

1. Каковы цели расчета КЗ ?
2. Какие условия и основные допущения принимаются при расчете токов КЗ в системах электроснабжения и почему ?
3. Назовите отличия принципиальной схемы, расчетной схемы и схемы замещения.
4. Почему при моделировании элементов схемы электроснабжения для расчета токов КЗ не учитываются их поперечные составляющие ?
5. В каких случаях допускается не учитывать активные сопротивления элементов схемы электроснабжения ?
6. Объясните понятие ударного тока КЗ, периодической и апериодической составляющих
7. На каких участках электрической сети необходимо определять токи КЗ ?
8. Что понимается под термином «относительные единицы»?
9. Как выбираются и пересчитываются базисные условия для различных ступеней напряжения электроэнергетической системы ?
10. Зависит ли результат расчета тока КЗ от выбора базисных условий ?
11. Какие математические модели нужно использовать для анализа установившихся и переходных процессов в системах электроснабжения
12. Назовите основные этапы математического моделирования системы электроснабжения для расчета токов КЗ
13. Какие математические методы используются в программах схемотехнического моделирования для определения выходных электрических параметров

14. От каких факторов зависит величина апериодической составляющей тока КЗ и длительность переходного процесса
15. От каких факторов зависит точность результатов моделирования
16. Какое действие оказывают токи КЗ на электрооборудование
17. Способы ограничения токов КЗ в системах электроснабжения

1.3. Лабораторная работа № 2 «Моделирование схемы электроснабжения для расчёта токов короткого замыкания в сети до 1000 В»

Цель работы: овладение методикой математического моделирования и расчета токов КЗ в сетях до 1000 В.

1.3.1. Методические указания

В большинстве практических случаях можно считать, что КЗ в сетях до 1000 В питается от системы с неограниченной мощностью, т.е. периодическая составляющая тока КЗ неизменна в течение всего времени существования режима КЗ:

$$I_{nt}^{(3)} = I_{кз}^{(3)}$$

При расчетах токов КЗ в установках напряжением до 1000 В необходимо учитывать активные и индуктивные сопротивления до точки КЗ всех элементов короткозамкнутой сети: силового трансформатора, проводов, кабелей и шин, токовых катушек расцепителей автоматических выключателей, первичных обмоток трансформаторов тока, переходных контактов аппаратов (определяются по справочным материалам, приведенным в п.1.1 настоящего практикума).

Сопротивление электрической дуги, возникающей в месте КЗ, рассчитывается (обычно при определении чувствительности релейных защит) по соотношению:

$$r_{д} = \frac{1000 l_{д}}{I_{д}},$$

где $I_{д}$ – ток, проходящий через дугу (принимается ток, определенный без учета сопротивления дуги при КЗ в том же месте); $l_{д}$ – длина дуги (м), равна расстоянию между токоведущими частями.

При расчете однофазных токов КЗ значения удельных индуктивных сопротивлений петли «фаза-нуль» принимается равным:

$x_0 = 0.15$ мОм/м – для КЛ до 1 кВ и проводов в трубах;
 $x_0 = 0.6$ мОм/м – для ВЛ до 1 кВ;
 $x_0 = 0.4$ мОм/м – для изолированных открыто проложенных проводов;
 $x_0 = 0.2$ мОм/м – для шинопроводов.

Расчет параметров цепи и токов КЗ выполняется в именованных единицах, напряжение принимается на 5% выше номинального напряжения сети (т.е. $U_{\text{ср. ном}}$)

1.3.2. Пример расчета

Для схемы электроснабжения цеховой сети (рис. 1.10) определить токи КЗ и составить «сводную ведомость токов КЗ». Питание распределительного шкафа ШР выполнено кабелем АНРГ с открытой прокладкой по стене; для питания отдельных электроприемников цеха используются провода АВВГ с прокладкой в трубах. Для подключения измерительных приборов в схеме электроснабжения установлены трансформаторы тока ТА1 и ТА2 с классом точности 1.0.

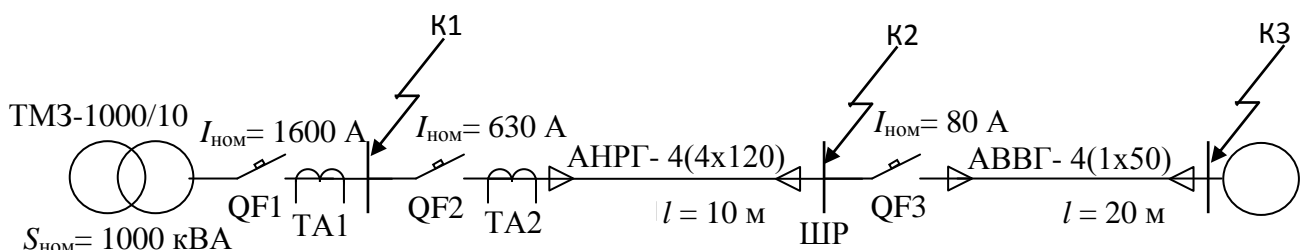


Рис.1.10. Расчетная схема распределительной сети

Расчет ведем в абсолютных единицах. Сопротивления элементов схемы электроснабжения приводим к номинальному напряжению вторичной обмотки 0.4 кВ.

Определяем сопротивления для расчета трехфазного КЗ

1. Сопротивления трансформатора (табл. 1.2):
 $R_{\text{тр}} = 2.0$ мОм $X_{\text{тр}} = 8.5$ мОм
2. Сопротивления автоматического выключателя QF1 (табл.1.10):
 $R_{\text{QF1}} = 0.08$ мОм $X_{\text{QF1}} = 0.08$ мОм $R_{\text{kQF1}} = 0.1$ мОм
3. Сопротивления автоматического выключателя QF2 (табл.1.10):
 $R_{\text{QF2}} = 0.12$ мОм $X_{\text{QF2}} = 0.13$ мОм $R_{\text{kQF2}} = 0.25$ мОм
4. Сопротивления первичной обмотки трансформатора тока ТА2 (табл.1.9):

$$R_{ТА2} = 0.07 \text{ мОм} \quad X_{ТА2} = 0.05 \text{ мОм}$$

Примечание: сопротивления трансформатора тока ТА1 можно не учитывать ввиду их малости.

5. Сопротивления кабельной линии КЛ1 (удельные сопротивления из табл.1.5):

$R_{КЛ1} = r_0 \cdot l / n = 0.261 \cdot 10 / 4 = 0.653 \text{ мОм}$ (с учетом 4 параллельно проложенных кабелей)

$$X_{КЛ1} = x_0 \cdot l = 0.08 \cdot 10 = 0.8 \text{ мОм}$$

6. Сопротивления автоматического выключателя QF3 (табл.1.10):

$$R_{QF3} = 2.4 \text{ мОм} \quad X_{QF3} = 2.0 \text{ мОм} \quad R_{кQF3} = 1.0 \text{ мОм}$$

7. Сопротивления кабельной линии КЛ2 (удельные сопротивления из табл.1.5):

$$R_{КЛ2} = r_0 \cdot l = 0.625 \cdot 20 = 12.5 \text{ мОм} \quad X_{КЛ2} = x_0 \cdot l = 0.085 \cdot 20 = 1.7 \text{ мОм}$$

8. Переходные сопротивления ступеней распределения (табл. 1.4):

$$R_{рунн} = 15 \text{ мОм} \quad R_{ШР} = 25 \text{ мОм}$$

9. Активные переходные сопротивления неподвижных контактных соединений (табл.1.8):

$$R_{кКЛ1} = 0.024 \text{ мОм} \quad R_{кКЛ2} = 0.043 \text{ мОм}$$

Схема замещения цеховой сети для расчета токов трехфазного и двухфазного КЗ представлена на рис.1.11.

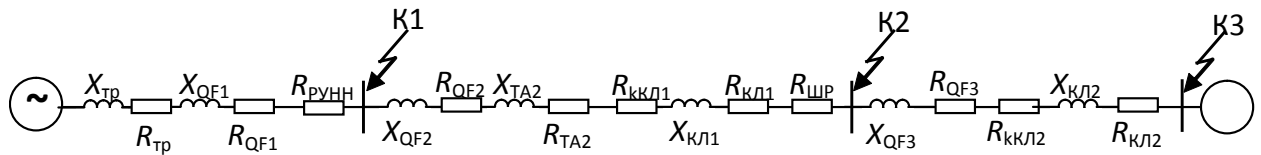


Рис.1.11. Схема замещения цеховой сети

Упростим схему замещения, определив эквивалентные сопротивления на участках схемы между точками КЗ:

$$R_1 = R_{тр} + R_{QF1} + R_{рунн} = 2 + 0.08 + 15 = 17.08 \text{ мОм}$$

$$X_1 = X_{тр} + X_{QF1} = 8.5 + 0.08 = 8.58 \text{ мОм}$$

$$R_2 = R_{QF2} + R_{ТА2} + R_{кКЛ1} + R_{КЛ1} + R_{ШР} = 0.12 + 0.07 + 0.024 + 0.653 + 25 = 25.87 \text{ мОм}$$

$$X_2 = X_{QF2} + X_{ТА2} + X_{КЛ1} = 0.13 + 0.05 + 0.8 = 8.98 \text{ мОм}$$

$$R_3 = R_{QF3} + R_{кКЛ2} + R_{КЛ2} = 2.4 + 0.043 + 12.5 = 14.943 \text{ мОм}$$

$$X_3 = X_{QF3} + X_{КЛ2} = 2.0 + 1.7 = 3.7 \text{ мОм}$$

Упрощенная схема замещения представлена на рис. 1.12.

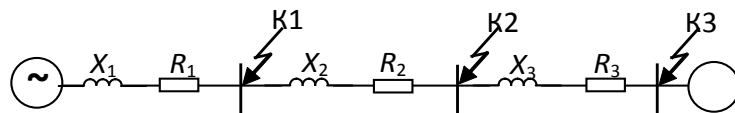


Рис.1.12. Упрощенная схема замещения цеховой сети

Расчет трехфазных и двухфазных токов КЗ

Ток трехфазного КЗ определяется по формуле:

$$I_{\text{КЗ}}^{(3)} = \frac{U_{\text{ср.ном}}}{\sqrt{3} Z_{\text{рез}}}, \text{ кА}$$

где $Z_{\text{рез}}$ – полное сопротивление до точки КЗ, Ом.

Точка К1:

$$Z_{\text{рез}} = \sqrt{R_1^2 + X_1^2} = \sqrt{17.08^2 + 8.08^2} = 18.88 \text{ мОм}$$

Периодическая составляющая тока трехфазного КЗ

$$I_{\text{КЗ}}^{(3)} = \frac{400 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 18.08} = 12.77 \text{ кА}$$

По рис.1.1 определим $k_{\text{уд}}$. Для этого требуется определить $X_1/R_1=0.47$, откуда $k_{\text{уд}} = 1.0$

Ударный ток КЗ

$$i_{\text{уд}} = \sqrt{2} k_{\text{уд}} I_{\text{кз}} = \sqrt{2} \cdot 1.0 \cdot 12.77 = 18.1 \text{ кА}$$

Ток двухфазного КЗ

$$I_{\text{КЗ}}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} I_{\text{КЗ}}^{(3)} = 0.87 I_{\text{КЗ}}^{(3)} = 0.87 \cdot 12.77 = 11.1 \text{ кА}$$

Точка К2:

$$Z_{\text{рез}} = \sqrt{(R_1+R_2)^2 + (X_1+X_2)^2} = \sqrt{(17.08+25.87)^2 + (8.08+8.18)^2} = 45.9 \text{ мОм}$$

Периодическая составляющая тока трехфазного КЗ

$$I_{\text{КЗ}}^{(3)} = \frac{400 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 45.9} = 5.0 \text{ кА}$$

По рис.1.1 определим $k_{\text{уд}}$. Для этого требуется определить $X/R \leq 0.5$, откуда $k_{\text{уд}} = 1.0$

Ударный ток КЗ

$$i_{\text{уд}} = \sqrt{2} k_{\text{уд}} I_{\text{кз}} = \sqrt{2} \cdot 1.0 \cdot 5.0 = 7.1 \text{ кА}$$

Ток двухфазного КЗ

$$I_{\text{кз}}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} I_{\text{кз}}^{(3)} = 0.87 I_{\text{кз}}^{(3)} = 0.87 \cdot 5.0 = 4.35 \text{ кА}$$

Точка КЗ:

$$Z_{\text{рез}} = \sqrt{(R_1 + R_2 + R_3)^2 + (X_1 + X_2 + X_3)^2} = \\ \sqrt{(17.08 + 25.87 + 14.94)^2 + (8.08 + 8.18 + 3.7)^2} = 61.2 \text{ мОм}$$

Периодическая составляющая тока трехфазного КЗ

$$I_{\text{кз}}^{(3)} = \frac{400 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 61.2} = 3.77 \text{ кА}$$

По рис.1.1 определим $k_{\text{уд}}$. Для этого требуется определить $X/R \leq 0.5$, откуда $k_{\text{уд}} = 1.0$

Ударный ток КЗ

$$i_{\text{уд}} = \sqrt{2} k_{\text{уд}} I_{\text{кз}} = \sqrt{2} \cdot 1.0 \cdot 3.77 = 5.33 \text{ кА}$$

Ток двухфазного КЗ

$$I_{\text{кз}}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} I_{\text{кз}}^{(3)} = 0.87 I_{\text{кз}}^{(3)} = 0.87 \cdot 3.77 = 3.28 \text{ кА}$$

Расчет однофазных КЗ

Определим сопротивления и составим схему замещения для расчета токов однофазного КЗ.

Сопротивления трансформатора по табл. 1.2 $Z_{\text{тр}}^{(1)} = 81 \text{ мОм}$

К схеме замещения, изображенной на рис.1.11 нужно добавить сопротивления нулевых проводников.

Сопротивления нулевой жилы кабельных линий КЛ1 и КЛ2 (удельные сопротивления из табл.1.5):

$R_{0\text{-КЛ1}} = r_0 \cdot l / n = 0.261 \cdot 10 / 4 = 0.653 \text{ мОм}$ (с учетом 4 параллельно проложенных кабелей)

$$R_{0\text{-КЛ2}} = r_0 \cdot l = 0.625 \cdot 20 = 12.5 \text{ мОм}$$

Кроме этого изменятся индуктивные сопротивления кабельных линий

$$X_{\text{КЛ1}} = x_0 \cdot l = 0.4 \cdot 10 = 4 \text{ мОм}$$

$$X_{\text{КЛ2}} = x_0 \cdot l = 0.15 \cdot 20 = 3 \text{ мОм}$$

Значения удельных индуктивных сопротивлений определены по рекомендациям, приведенным в п.1.3.1.

Схема замещения цеховой сети для расчета токов однофазного КЗ представлена на рис.1.13.

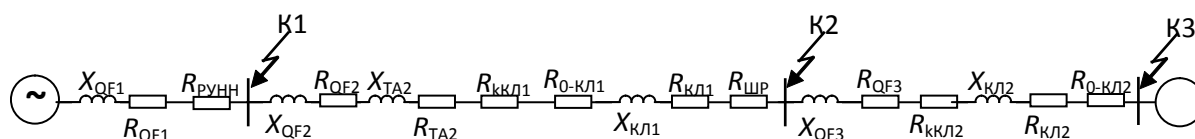


Рис.1.13. Схема замещения цеховой сети для расчета однофазных КЗ

Упростим схему замещения, определив эквивалентные сопротивления на участках схемы между точками КЗ:

$$R_1 = R_{QF1} + R_{PYNH} = 0.08 + 15 = 15.08 \text{ мОм}$$

$$X_1 = X_{QF1} = 0.08 = 8.08 \text{ мОм}$$

$$R_2 = R_{QF2} + R_{TA2} + R_{KКЛ1} + R_{КЛ1} + R_{ШП} + R_{0-КЛ1} = \\ = 0.12 + 0.07 + 0.024 + 0.653 + 25 + 0.653 = 26.52 \text{ мОм}$$

$$X_2 = X_{QF2} + X_{TA2} + X_{КЛ1} = 0.13 + 0.05 + 0.8 = 8.18 \text{ мОм}$$

$$R_3 = R_{QF3} + R_{KКЛ2} + R_{КЛ2} + R_{0-КЛ2} = 2.4 + 0.043 + 12.5 + 12.5 = 27.44 \text{ мОм}$$

$$X_3 = X_{QF3} + X_{КЛ2} = 2.0 + 1.7 = 3.7 \text{ мОм}$$

Упрощенная схема замещения цеховой сети для расчета токов однофазных КЗ не изменится (рис. 1.12), однако значения сопротивлений будут другими.

Ток однофазного КЗ определяется по формуле

$$I_{K3}^{(1)} = \frac{U_{\phi}}{\frac{Z_{TP}^{(1)}}{3} + Z_{\phi-0}}$$

где U_{ϕ} – фазное напряжение в точке КЗ, кВ;

$Z_{\phi-0}$ – полное сопротивление петли «фаза нуль» до точки КЗ, Ом;

$Z_{TP}^{(1)}$ – полное сопротивление трансформатора при однофазном КЗ,

Ом.

Точка К1:

$$Z_{\phi-0} = \sqrt{R_1^2 + X_1^2} = \sqrt{15.08^2 + 8.08^2} = 17.1 \text{ мОм}$$

$$I_{K3}^{(1)} = \frac{230 \cdot 10^3}{\frac{81}{3} + 17,1} = 5.2 \text{ кА}$$

Точка К2:

$$Z_{\phi-0} = \sqrt{(R_1 + R_2)^2 + (X_1 + X_2)^2} = \sqrt{(15.08 + 26.52)^2 + (8.08 + 8.18)^2} = 44.67$$

МОм

$$I_{\text{кз}}^{(1)} = \frac{230 \cdot 10^3}{27 + 44.67} = 3.2 \text{ кА}$$

Точка К3:

$$Z_{\phi-0} = \sqrt{(R_1 + R_2 + R_3)^2 + (X_1 + X_2 + X_3)^2} = \sqrt{(15.08 + 26.52 + 27.44)^2 + (8.08 + 8.18 + 3.7)^2} = 71.9 \text{ МОм}$$

$$I_{\text{кз}}^{(1)} = \frac{230 \cdot 10^3}{27 + 71.9} = 2.3 \text{ кА}$$

Сводная ведомость токов КЗ

Расчетные точки		К1	К2	К3
Токи КЗ, кА	$I_{\text{кз}}^{(1)}$	5.2	3.2	2.3
	$I_{\text{кз}}^{(2)}$	11.1	4.35	3.28
	$I_{\text{кз}}^{(3)}$	12.8	5.0	3.8
	$i_{\text{уд}}$	18.1	7.1	5.3

1.3.3. Задание

Для схемы цеховой сети до 1000 В (рис. 1.14) определить токи КЗ и составить «сводную ведомость токов КЗ». Питание распределительного шкафа ШР от распределительного устройства РУ цеховой подстанции выполнено шинопроводом ШНП. Для питания отдельных электроприемников используются четыре одножильных провода марки АПРТО одинакового сечения с прокладкой в трубах.

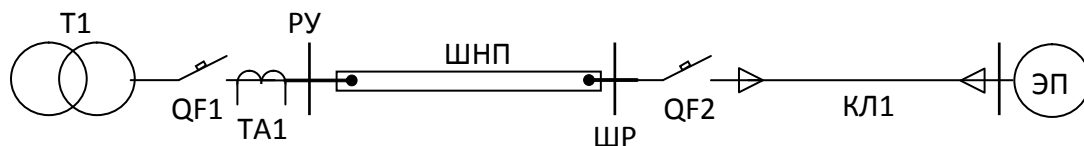


Рис.1.14. Схема электроснабжения цеховой сети

Варианты заданий приведены в таблице 1.13. Вариант задания определяется преподавателем.

Таблица 1.13

Варианты заданий

№ вар	T1	QF1	ШНП		QF2	КЛ1		№ вар	T1	QF1	ШНП		QF2	КЛ1	
	$S_{\text{НОМ}}$, кВА	$I_{\text{НОМ}}$, А	$I_{\text{НОМ}}$, А	l , м	$I_{\text{НОМ}}$, А	S , мм ²	l , м		$S_{\text{НОМ}}$, кВА	$I_{\text{НОМ}}$, А	$I_{\text{НОМ}}$, А	l , м	$I_{\text{НОМ}}$, А	S , мм ²	l , м
1	1600	2500	2500	30	250	120	10	11	1600	2500	2500	10	80	25	20
2	1000	1600	1600	25	200	95	15	12	1000	1600	1600	20	100	35	10
3	630	1000	1250	20	160	70	5	13	630	1000	1250	30	125	50	20
4	400	630	630	15	125	50	10	14	400	630	630	20	160	70	25
5	250	400	400	10	100	35	15	15	250	400	400	10	200	95	25
6	1600	2500	3200	10	80	25	20	16	1600	2500	3200	20	250	120	10
7	1000	1600	2500	15	250	120	10	17	1000	1600	2500	30	250	120	5
8	630	1000	1600	20	200	95	5	18	630	1000	1600	15	160	95	15
9	400	630	1000	25	160	95	20	19	400	630	1000	20	125	70	10
10	250	400	630	30	125	70	10	20	250	400	630	25	100	50	20

1.3.4. Требования к отчету

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

1. Цель и порядок выполнения работы
2. Расчетную схему и схему замещения с указанием контрольных точек расчета токов КЗ
3. Результаты расчетов сопротивлений схем замещения
4. Результаты расчетов токов КЗ
5. Сводную ведомость расчета токов КЗ
6. Выводы

1.3.5. Контрольные вопросы

1. Какие особенности моделирования схемы электроснабжения для расчета токов однофазного КЗ
2. Какое влияние оказывает схема соединения обмоток цехового трансформатора на токи однофазного КЗ
3. Какие различия в моделировании схем электроснабжения для расчета токов КЗ в сетях до и выше 1000 В
4. Какие меры можно принять для ограничения токов КЗ в цеховых сетях

1.4. Лабораторная работа № 3 «Моделирование схемы электроснабжения для расчёта токов короткого замыкания в сети до 1000 В в среде Electronics Workbench»

Цель работы: овладение методикой математического моделирования и расчета токов КЗ в сетях до 1000 В в среде схемотехнического моделирования Electronics Workbench

1.4.1. Пример моделирования

Для схемы электроснабжения (лаб. работа №2, рис. 1.10) требуется составить схемы замещения в редакторе Electronics Workbench; определить токи КЗ и составить «сводную ведомость токов КЗ».

Моделирование схемы цеховой сети для расчета токов трехфазного и двухфазного КЗ

Схема замещения одной фазы сети для расчета токов КЗ определена в предыдущей лабораторной работе (рис. 1.12). Соберем данную схему в схемотехническом редакторе, дополнив ее амперметром на выводе источника питания и активным сопротивлением нагрузки.

Определим сопротивление нагрузки для одной фазы цехового трансформатора, приняв за коэффициент загрузки силового трансформатора по активной мощности наиболее типичный случай – $K_3 = 0.7$.

$$P_{\text{ф.тр}} = K_3 \cdot S_{\text{тр.ф.ном}} = \frac{U_{\text{ф.ном}}^2}{R_{\text{H}}} = 233 \text{ кВт}, \text{ откуда } R_{\text{H}} = 0.21 \text{ Ом}$$

В окне редактора выделим все элементы схемы замещения для одной фазы сети, скопируем их в буфер обмена и сделаем две вставки. Соберем схему моделируемой системы электроснабжения в трехфазном исполнении, для чего выполним необходимые соединения. Сделаем систему питающих ЭДС симметричной, установив угол сдвига фаз В и С 120 и 240 градусов соответственно. Для этого нужно открыть окно редактора свойств источника переменного напряжения (AC Voltage Source) и внести соответствующие изменения (рис. 1.15).

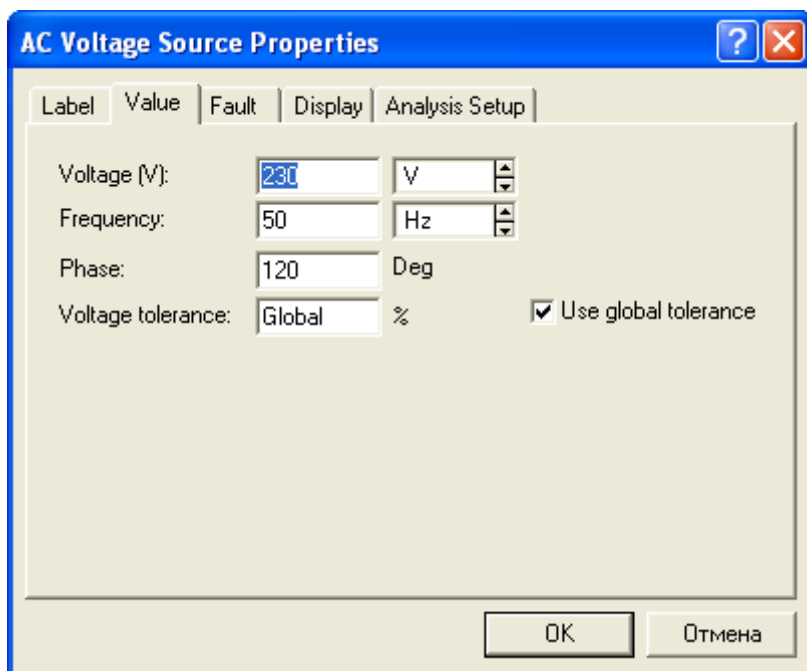


Рис.1.15. Окно свойств источника переменного напряжения

Математическая модель схемы электроснабжения для расчета токов трехфазных и двухфазных КЗ в среде Electronics Workbench представлена на рис.1.16.

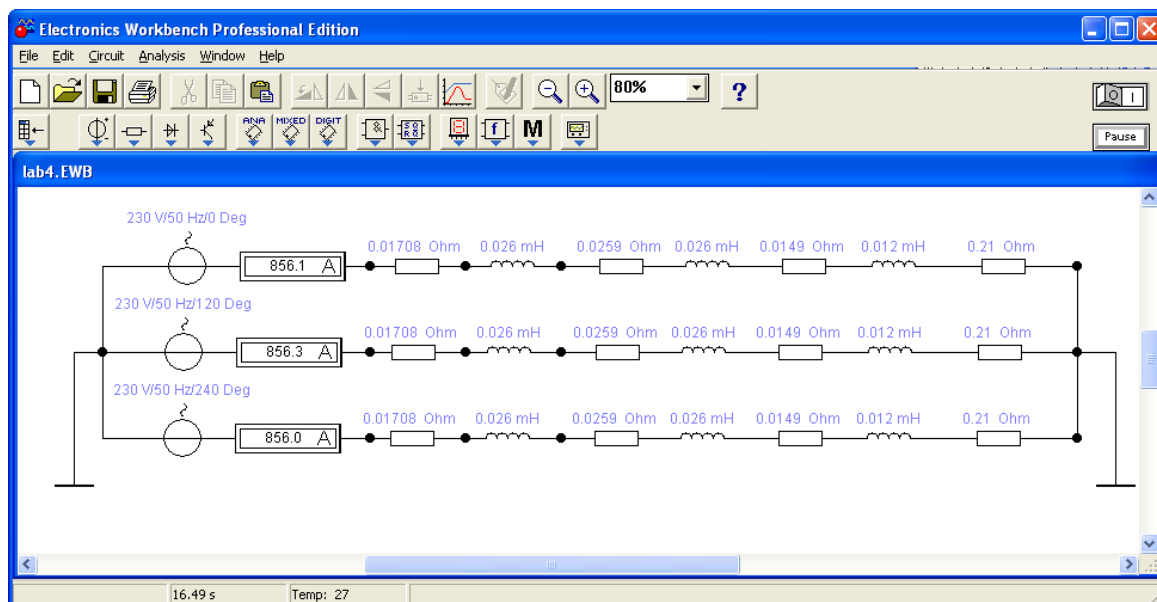


Рис.1.16. Схема цеховой сети в режиме номинальной нагрузки

Для удобства исследования дополним математическую модель коммутационными ключами (Switch), управляемыми клавишами с клавиатуры и для каждого ключа назначим свою клавишу. Для этого нужно открыть окно свойств каждого ключа и внести необходимые изменения (рис. 1.17).

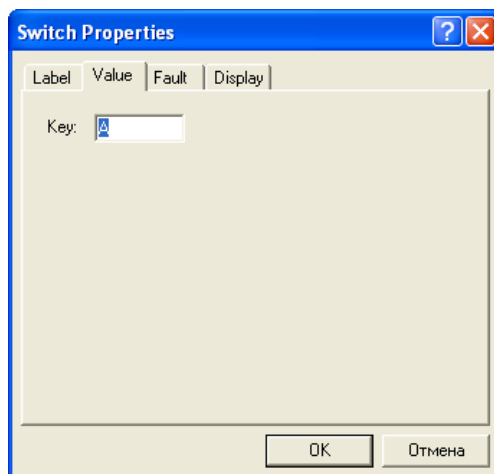


Рис.1.17. Окно свойств ключа

На рис. 1.18 представлена математическая модель системы электроснабжения для исследования режимов трех-, двухфазных КЗ. На рисунке показана схема в режиме трехфазного КЗ в точке К1.

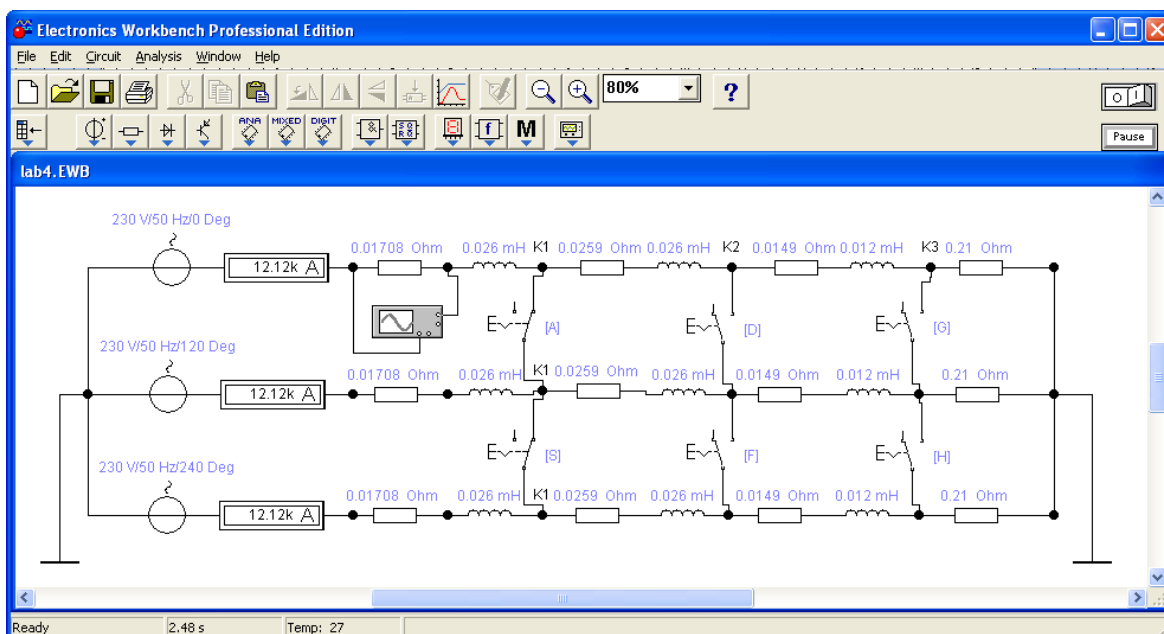


Рис.1.18. Схема цеховой сети в режиме трехфазного КЗ в точке К1

Замыкая соответствующие ключи можно провести исследования цеховой системы электроснабжения в режимах трехфазных и двухфазных КЗ.

Моделирование схемы цеховой сети для анализа режима однофазного КЗ

Принципиальное отличие режима однофазного КЗ от двух-, трехфазных заключается в том, что режим работы сети в этом случае является несимметричным. И если в режимах трех-, двухфазных КЗ нулевой провод остается ненагруженным, то в режиме однофазного КЗ по нулевому проводу протекает ток короткого замыкания. Это легко увидеть на математической модели, подключив между общей точкой фазных ЭДС и землей амперметр.

Для исследования схемы электроснабжения в режимах однофазного КЗ нужно добавить в математическую модель сопротивления нулевых проводников и учесть изменение сопротивления трансформатора.

Сопротивление силового трансформатора при загрузке одной фазы (однофазное КЗ) по табл. 1.2 $Z_{\text{тр}}^{(1)} = 81 \text{ мОм}$

Приведем к одной фазе $Z_{\text{тр.ф}}^{(1)} = Z_{\text{тр}}^{(1)} / 3 = 27 \text{ мОм}$

Будем считать сопротивление силового трансформатора чисто индуктивным.

Сопротивления нулевых жил кабельных линий КЛ1 и КЛ2 определены в лабораторной работе № 2:

$$R_{0\text{-КЛ1}} = 0.653 \text{ мОм}$$

$$R_{0\text{-КЛ2}} = 12.5 \text{ мОм}$$

Дополним математическую модель двумя сопротивлениями: активным $R_0 = R_{0\text{-КЛ1}} + R_{0\text{-КЛ2}} = 13.15 \text{ мОм}$ и реактивным $X_0 = 27 \text{ мОм}$.

Подключим эти сопротивления между общей точкой ЭДС и землей и добавим еще три ключа. Математическая модель готова к исследованию режимов однофазных КЗ.

На рис. 1.19 представлена математическая модель системы электроснабжения для исследования всех возможных режимов КЗ. На рисунке представлена модель схемы цеховой сети в режиме однофазного КЗ на землю фазы С в точке К1.

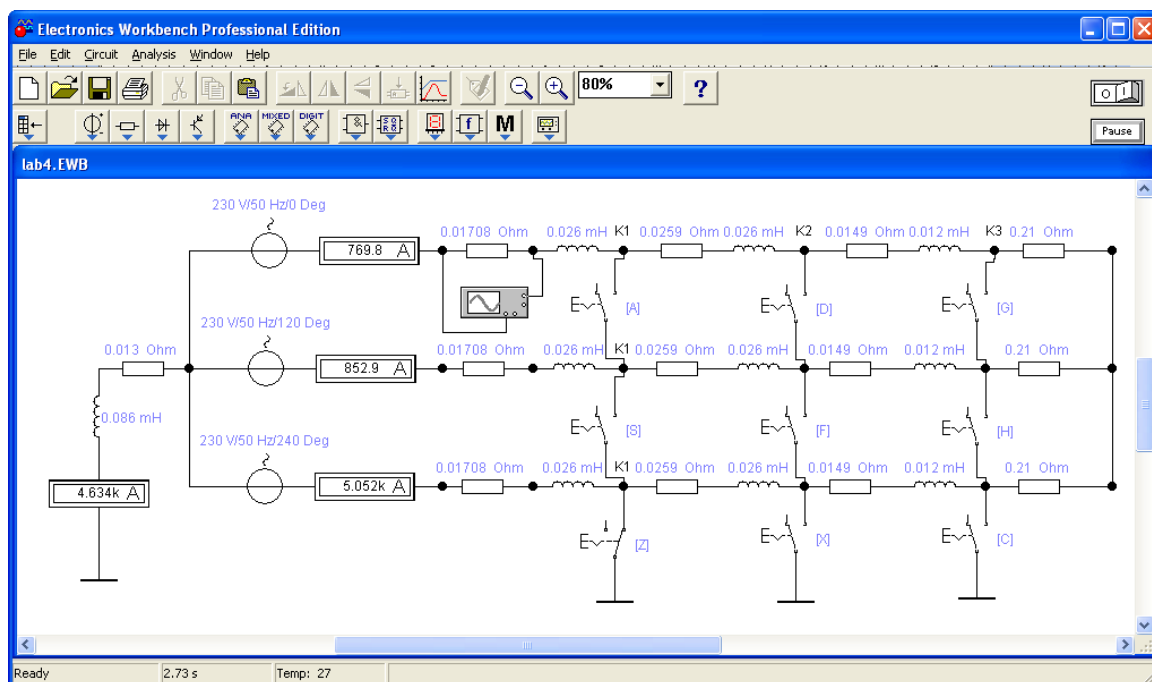


Рис.1.19. Схема цеховой сети в режиме однофазного КЗ фазы С в точке К1

1.4.2. Задание

Для схемы электрической сети до 1000 В (рис. 1.14) требуется составить математическую модель цеховой системы электроснабжения для исследования режимов КЗ в программе схемотехнического моделирования Electronics Workbench; определить токи КЗ и составить «сводную ведомость токов КЗ».

Провести исследования переходных процессов изменения токов во время КЗ, определить по осциллографу значения ударного тока КЗ в каждой точке и длительность переходного процесса КЗ. Сравнить и проанализировать результаты моделирования схемы электроснабжения с результатами, полученными в лабораторной работе №2.

1.4.3. Требования к отчету

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

1. Цель и порядок выполнения работы
2. Значения токов КЗ, определенные методом математического моделирования
3. Сводную ведомость токов КЗ
4. Выводы

1.4.4. Контрольные вопросы

1. Какие математические модели нужно использовать для анализа установившихся и переходных процессов в системах электроснабжения
2. Какие математические методы используются в программах схемотехнического моделирования для определения выходных электрических параметров
3. От каких факторов зависит величина апериодической составляющей тока КЗ и длительность переходного процесса
4. От каких факторов зависит точность результатов моделирования
5. Какое действие оказывают токи КЗ на электрооборудование
6. Способы ограничения токов КЗ в системах электроснабжения

2. ОПТИМИЗАЦИОННЫЕ ЗАДАЧИ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Целью оптимизационных расчетов в электроснабжении обычно является выбор оптимального с экономической точки зрения варианта из нескольких технически приемлемых. Необходимость проведения оптимизационных расчетов при проектировании систем электроснабжения связана с тем, что большинство, решаемых при проектировании задач являются многофакторными: возможен выбор различных сечений проводников, мощности и количества силовых трансформаторов, мест установки основного электрооборудования и т.д. При этом выбор оптимального варианта не всегда возможен на основании обычных технико-экономических расчетов. В этих случаях пользуются оптимизационными методами, которые базируются на основе специализированных математических моделей.

По способу описания объекта математические модели для решения оптимизационных задач чаще всего являются функциональными, а для их математического описания и решения используют специальные математические приемы и методы. [4].

2.1. Теоретические сведения

При проектировании и эксплуатации систем электроснабжения часто приходится иметь дело с многовариантными задачами, т.е. с задачами в которых из некоторого множества допустимых по техническим условиям решения нужно выбрать одно, которое является лучшим по какому либо критерию.

Такое решение принято называть *оптимальным*, а задачи, в которых производится поиск такого решения, получили название *оптимизационных задач*.

Применительно к системам электроснабжения оптимизационные задачи приходится решать при выборе напряжения электрических сетей, выборе числа и мощности источников питания, выборе оптимальной конфигурации электрической сети, выборе сечений проводников, определении рационального распределения источников реактивной мощности, выборе мест размещения источников питания и т.д.

В качестве *критериев оптимальности* в большинстве практических задач электроснабжения используются экономические показатели (себестоимость, прибыль, финансовые затраты и т.п.), хотя в

некоторых случаях могут быть использованы и другие: минимум потерь напряжения (энергии), надежность электроснабжения, качество электроэнергии и т.л.

Таким образом, *критерием оптимальности является количественная оценка оптимизируемого качества объекта.*

На основании выбранного критерия оптимальности составляется целевая функция, представляющая собой зависимость критерия оптимальности от параметров, влияющих на ее значение. Вид критерия оптимальности или целевой функции определяется конкретной задачей оптимизации.

Соответственно, *задача оптимизации сводится к нахождению экстремума целевой функции.*

При решении оптимизационных задач после выбора параметров оптимизации (сечения проводников, количество трансформаторов и т.д.), необходимо определить ограничения на эти параметры. При этом ограничения могут накладываться как по техническим, так и по экономическим соображениям.

В общем случае математическая модель оптимизационной задачи содержит три базовых компонента: целевая функция, ограничения, граничные условия.

Целевая функция представляет собой математическую запись критерия оптимальности:

$$Z(x_1, x_2, \dots, x_n) \rightarrow \text{extr}$$

где x_1, x_2, \dots, x_n – искомые переменные, значения которых необходимо определить в процессе решения задачи.

Ограничения представляют собой различные технические, экономические и другие условия, которые необходимо учесть при решении задачи:

$$f_j(x_1, x_2, \dots, x_n) (\leq \text{или } =) b_j \text{ где } j = 1, 2, \dots, m$$

Граничные условия определяют диапазон изменения искомым переменных:

$$d_i \leq x_i \leq D_i, \text{ где } i = 1, 2, \dots, n$$

d_i, D_i – нижняя и верхняя граница диапазона изменения переменной x_i соответственно.

Наиболее распространенным случаем граничных условий искомым переменных в реальных технических задачах является их неотрицательность – $x_i \geq 0$.

Для решения оптимизационных задач используют специальные математические приемы и методы, которые получили название *методов математического программирования.*

В соответствии с характером зависимости между переменными в выражении целевой функции оптимизационные задачи классифицируются на *задачи линейного программирования* и *задачи нелинейного программирования*.

Кроме того, по характеру изменения искомые переменные могут иметь *непрерывный*, *целочисленный* или *дискретный* характер. Соответственно, задачи оптимизации, в которых имеются целочисленные или дискретные переменные, подразделяются на задачи *целочисленного* или *дискретного программирования*.

Примерами непрерывных переменных являются значения тока и мощности в линии электропередачи; целочисленными переменными являются количество силовых трансформаторов и компенсирующих устройств; дискретными переменными являются сечения проводников и мощности трансформаторов, которые выбираются из стандартного ряда.

Важное влияние на вид оптимизационной задачи накладывает характер исходной информации. Если исходная информация однозначно определена, то она называется *детерминированной*; если же она носит случайный характер и подчиняется законам теории вероятностей, то она называется *случайной*. Исходная информация, которая носит неопределенный характер и не подчиняется теории вероятностей, называется *недетерминированной*.

Оптимизационные задачи, в которых исходная информация носит случайный характер, классифицируются как задачи *стохастического программирования*, а задачи, в которых исходная информация не определена, могут быть решены с помощью *теории игр*.

Существуют и другие виды классификации задач оптимизации, основной целью которых является выявление специфических особенностей тех или иных задач, играющих важную роль при разработке методов их решения.

2.2. Решение задач математического программирования средствами MS Excel

Электронные таблицы MS Excel содержат в своем составе специализированные средства, которые позволяют решать большинство типовых практических задач оптимизации.

При решении оптимизационных задач пользователь должен иметь представление об основах математического моделирования и уметь составлять оптимизационные математические модели. Кроме того, от пользователя требуется знание основных методов математического

д) ввести ограничения и граничные условия (в окне "Поиск решения"):

- ячейки со значениями переменных,
- граничные условия для допустимых значений переменных,
- соотношения между правыми и левыми частями ограничений.

2. Решить задачу:

а) установить параметры решения задачи (в окне "Поиск решения"),

б) запустить задачу на решение (в окне "Поиск решения ";

в) выбрать формат вывода решения (в окне "Результаты поиска решения")

Рассмотрим решение оптимизационной задачи линейного программирования средствами MS Excel на конкретном примере.

Задача 1

Предприятие выпускает три вида продукции: табуретки, столы и стулья. На изготовление каждого изделия требуется три вида сырья: ткань, доски и фурнитура. Для упрощения задачи будем считать, что расход энергетических, трудовых и других ресурсов на изготовления каждого вида продукции одинаков. Нормы расхода каждого вида сырья на изготовление одного изделия и прибыль от его реализации приведены в табл. 2.1. При планировании производственной программы необходимо учесть ограничения на каждый вид сырьевого ресурса, которые составляют 80, 120, 60 для ткани, досок и фурнитуры соответственно. Требуется определить, в каком количестве нужно выпускать каждый вид изделия, чтобы получить максимальную прибыль (маркетинговую ситуацию на рынке не учитываем – все что произвели, сразу продали).

Таблица 2.1.

Исходные данные к задаче 1

	Табурет	Стул	Стол
Ткань	1	3	2
Доски	2	4	8
Фурнитура	1	2	4
Прибыль	25	70	120

Решение.

Математическая модель решаемой задачи будет иметь следующий вид.

$$\begin{aligned} & \text{Целевая функция} \\ Z = 25 \cdot x_1 + 70 \cdot x_2 + 120 \cdot x_3 & \rightarrow \max \end{aligned} \quad (2.1)$$

$$\begin{aligned} & \text{Система ограничений} \\ & \left. \begin{aligned} 1 \cdot x_1 + 3 \cdot x_2 + 2 \cdot x_3 &\leq 80 \\ 2 \cdot x_1 + 4 \cdot x_2 + 8 \cdot x_3 &\leq 120 \\ 1 \cdot x_1 + 2 \cdot x_2 + 4 \cdot x_3 &\leq 60 \end{aligned} \right\} \end{aligned} \quad (2.2)$$

$$\begin{aligned} & \text{Граничные условия} \\ x_1 \geq 0, x_2 \geq 0, x_3 \geq 0 \end{aligned} \quad (2.3)$$

Из математической модели задачи видно, что целевая функция имеет линейную зависимость от переменных, значит решаемая задача является задачей линейного программирования.

На рабочем листе книги MS Excel создадим экранную форму для ввода условий задачи, рис.2.1

	A	B	C	D	E	F	G
1		Переменные					
2	Вид	Табурет	Стул	Стол			
3	Значение	0	0	0			
4	Нижн. граница	>=0	>=0	>=0			
5	Верх. граница						
6	Козфф. ЦФ	25	70	120	=СУММПРОИЗВ(В3:D3;В6:D6)	Тип	max
7							
8		Ограничения					
9	Вид				Левая часть	Знак	Пр. часть
10	Ткань	1	3	2	=СУММПРОИЗВ(В3:D3;В10:D10)	<=	80
11	Доски	2	4	8	=СУММПРОИЗВ(В3:D3;В11:D11)	<=	120
12	Фурнитура	1	2	4	=СУММПРОИЗВ(В3:D3;В12:D12)	<=	60
13							
14							

Рис. 2.1. Экранная форма задачи 1

В экранной форме на рис. 2.1 каждой переменной и каждому коэффициенту задачи поставлена в соответствие конкретная ячейка в Excel. Имя ячейки состоит из буквы, обозначающей столбец, и цифры, обозначающей строку, на пересечении которых находится объект задачи линейного программирования. Переменным задачи соответствуют ячейки В3:D3, коэффициентам целевой функции (ЦФ) соответствуют ячейки В6:D6, правым частям ограничений соответствуют ячейки G10:G12.

В ячейку Е6, в которой будет отображаться значение ЦФ, необходимо ввести формулу, по которой это значение будет рассчитано.

В экранной форме значение целевой функции можно вычислить по формуле:

$$E6 = \text{СУММПРОИЗВ}(B3:D3;B6:D6) \quad (2.4)$$

Формулы для расчета левых частей системы ограничений (2.2) разместим в ячейках E10:E12. Для экранной формы, представленной на рис.2.1, они могут быть рассчитаны по следующим формулам

$$\left. \begin{aligned} E10 &= \text{СУММПРОИЗВ}(B3:D3;B10:D10) \\ E11 &= \text{СУММПРОИЗВ}(B3:D3;B11:D11) \\ E12 &= \text{СУММПРОИЗВ}(B3:D3;B12:D12) \end{aligned} \right\}$$

Экранная форма готова для решения задачи линейного программирования.

В качестве начального приближения значений искомым переменных примем нулевые значения, для чего введем в ячейки B3:D3 нули.

Для решения задачи линейного программирования средствами MS Excel в меню СЕРВИС нужно выбрать команду ПОИСК РЕШЕНИЯ.

Примечание. При первоначальном обращении к инструменту поиска решения в главном меню СЕРВИС можно не обнаружить операции ПОИСК РЕШЕНИЯ. Это означает, что компонент поиска решения в программе MS Excel не установлен. Для установки компонента необходимо выбрать в меню СЕРВИС команду НАДСТРОЙКИ и в открывшемся диалоговом окне установить галочку в строке ПОИСК РЕШЕНИЯ, рис.2.2.

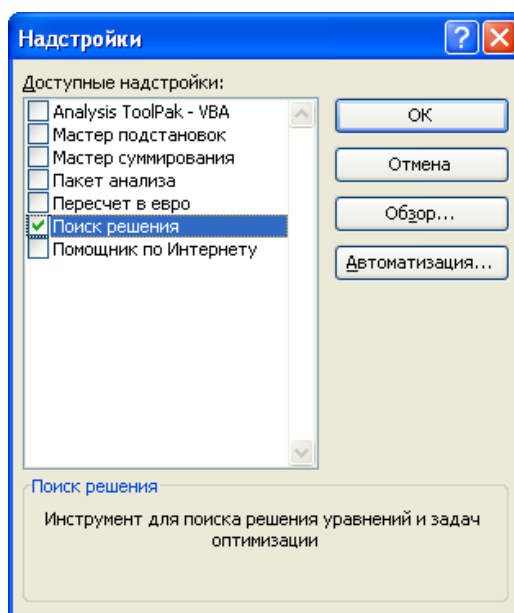


Рис.2.2. Диалоговое окно установки дополнительных компонент MS Excel

При установке дополнительных компонент программы MS Excel может потребоваться установочный диск пакета MS Office.

Параметры решения задачи устанавливаются в диалоговом окне «Поиск решения», представленном на рис. 2.3

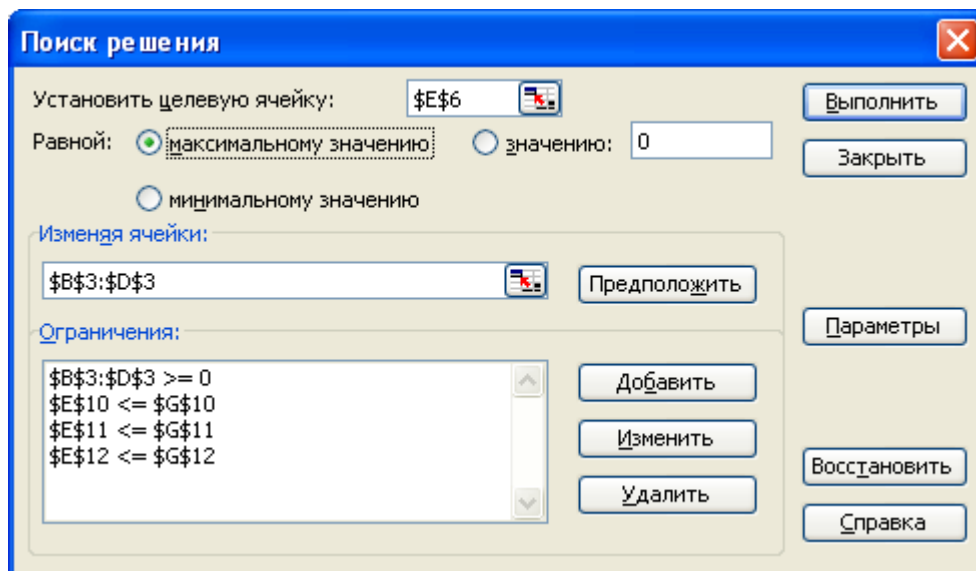


Рис.2.3. Диалоговое окно «Поиск решения» задачи 1

В открывшемся диалоговом окне необходимо выбрать целевую ячейку (в нашей задаче E6), установить переключатель характера решаемой задачи в требуемое положение (в нашем случае «максимальное значение»), в поле «Изменяя ячейки» указать ячейки, которые должны изменяться в процессе поиска решения задачи (в нашей задаче B3:D3). После этого в поле «Ограничения» нужно ввести ограничения и граничные условия решаемой задачи оптимизации.

Для того, чтобы добавить ограничение, нужно нажать кнопку ДОБАВИТЬ, и в открывшемся диалоговом окне «Добавление ограничения» установить ссылку на требуемую ячейку, вид и значение ограничения (рис.2.4).

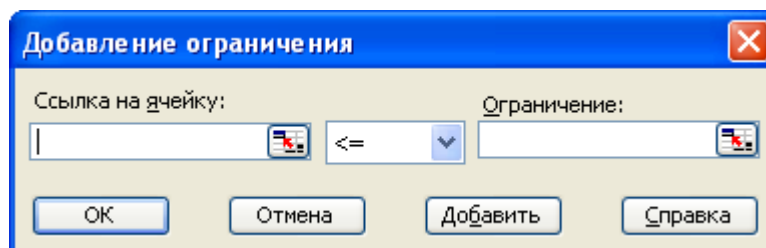


Рис.2.4. Диалоговое окно «Добавление ограничения»

В соответствии с заданными условиями и экранной формой решаемой нами задачи в нашем случае требуется ввести 4 ограничения:

- значения ячеек E10:E12 должны быть меньше или равны значениям ячеек G10:G12 соответственно (система ограничений 2.2);
- значения ячеек B3:D3 должны быть больше или равны нулю (граничные условия 2.3).

Для решения задач оптимизации определенного класса необходима установка конкретных параметров поиска решения. Для этого нужно нажать кнопку ПАРАМЕТРЫ и заполнить некоторые поля окна «Параметры поиска решения» (рис. 2.5).

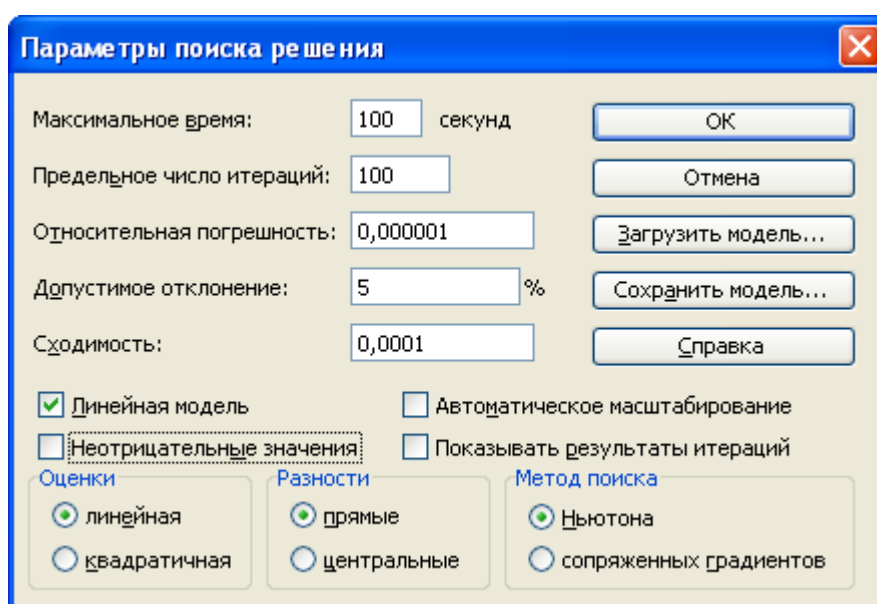


Рис.2.5. Диалоговое окно «Параметры поиска решения»

Параметр «Максимальное время» служит для назначения времени (в секундах), выделяемого на решение задачи. В поле можно ввести время, не превышающее 32 767 секунд (более 9 часов).

Параметр «Предельное число итераций» служит для управления временем решения задачи путем ограничения числа промежуточных вычислений. В поле можно ввести количество итераций, не превышающее 32 767.

Параметр «Относительная погрешность» служит для задания точности, с которой определяется соответствие ячейки целевому значению или приближение к указанным границам. Поле должно содержать число из интервала от 0 до 1. Чем меньше количество десятичных знаков во введенном числе, тем ниже точность. Высокая

точность увеличит время, которое требуется для того, чтобы сошелся процесс оптимизации.

Параметр «Допустимое отклонение» служит для задания допуска на отклонение от оптимального решения в целочисленных задачах. При указании большего допуска поиск решения заканчивается быстрее.

Параметр «Сходимость» применяется только при решении нелинейных задач.

Установка флажка «Линейная модель» обеспечивает ускорение поиска решения линейной задачи за счет применения симплекс-метода.

Установленные по умолчанию значения параметров подходят для большинства решаемых задач. Оставим их без изменения, отметив галочкой «Линейная модель», так как наша задача линейная.

Подтвердим установленные параметры нажатием кнопки ОК.

Запуск задачи на решение производится из окна «Поиск решения» путем нажатия кнопки ВЫПОЛНИТЬ.

На экране появляется окно «Результаты поиска решения», представленное на рис.2.6.

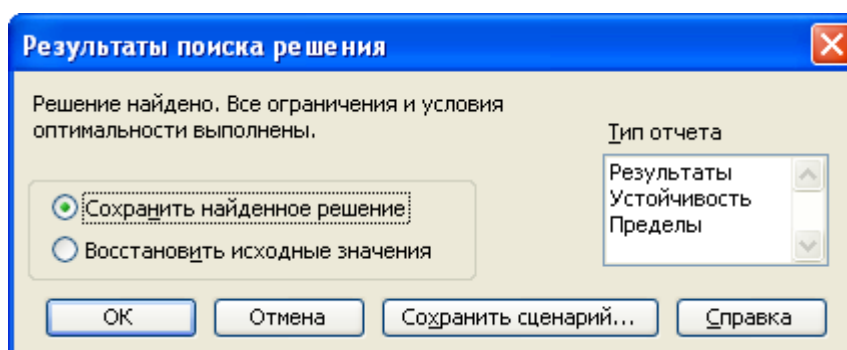


Рис.2.6. Диалоговое окно «Результаты поиска решения»

Примечание. Иногда при решении оптимизационных задач характер выводимых в диалоговом окне «Результаты поиска решения» сообщений может быть другим: «Поиск не может найти подходящего решения» или «Значения целевой ячейки не сходятся». Вывод таких сообщений не всегда свидетельствуют о характере оптимального решения задачи, а чаще о том, что при вводе условий задачи в Excel были допущены ошибки, не позволяющие Excel найти оптимальное решение, которое в действительности существует.

Если решение оптимизационной задачи найдено, мы можем сохранить его в ячейках экранной формы и просмотреть три типа отчетов «Результаты», «Устойчивость», «Пределы», которые предлагает Excel для анализа полученного решения. Нажмем в диалоговом окне

«Результаты поиска решения» кнопку ОК и сохраним результаты решения в экранной форме.

Экранная форма с результатами решения задачи представлена на рис.2.7.

	A	B	C	D	E	F	G	H
1		Переменные						
2	Вид	Табурет	Стул	Стол				
3	Значение	0	25	2,5				
4	Нижн. граница	>=0	>=0	>=0				
5	Верх. граница				Целевая функция	Тип		
6	Козфф. ЦФ	25	70	120	2050	max		
7								
8		Ограничения						
9	Вид				Левая часть	Знак	Пр. часть	
10	Ткань	1	3	2	80	<=	80	
11	Доски	2	4	8	120	<=	120	
12	Фурнитура	1	2	4	60	<=	60	
13								
14								

Рис. 2.7. Экранная форма задачи 1 с результатом решения

Из результатов решения задачи, представленных на рис.2.7, следует, что для получения максимальной прибыли в планируемом производственном периоде а размере 2050 у.е. мы должны произвести 25 стульев и 2.5 стола. При этом запасы всех наших ресурсов (ткани, досок и фурнитуры) будут израсходованы полностью без остатка.

С практической точки зрения полученное решение не имеет смысла, так как производство 0.5 стола если теоретически и возможно, то получение прибыли от его реализации крайне затруднительно.

С математической точки зрения при решении задачи мы допустили ошибку, выполнив решение без учета того, что наша задача относится к классу задач целочисленного программирования – переменные: табуретки, столы и стулья могут быть только целыми числами. Для исправления ошибки выберем в меню СЕРВИС команду ПОИСК РЕШЕНИЯ и в поле «Ограничения» добавим еще одно ограничение – ячейки В3:D3 должны быть целыми числами (рис.2.8).

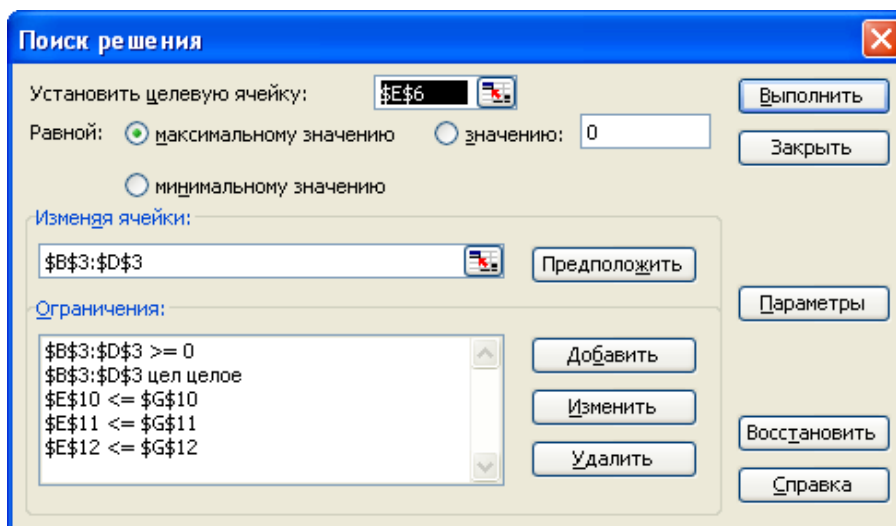


Рис.2.8. Диалоговое окно «Поиск решения» целочисленной задачи 1

Экранная форма с результатами решения задачи линейного целочисленного программирования представлена на рис.2.9.

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	Переменные							
2	Вид	Табурет	Стул	Стол				
3	Значение	0	24	3				
4	Нижн. граница	>=0	>=0	>=0				
5	Верх. граница							
6	Козэф. ЦФ	25	70	120	Целевая функция	Тип		
					2040	max		
7								
8	Ограничения							
9	Вид				Левая часть	Знак	Пр. часть	
10	Ткань	1	3	2		78	<=	80
11	Доски	2	4	8		120	<=	120
12	Фурнитура	1	2	4		60	<=	60
13								
14								

Рис. 2.9. Экранная форма задачи 1 с результатом решения

Выберем в диалоговом окне «Результаты поиска решения» (рис.2.6) тип отчета «Результаты» и нажмем кнопку ОК.

MS Excel автоматически создаст в рабочей книге новый лист «Отчет по результатам 1», представленный на рис. 2.10.

Ячейка	Имя	Исходное значение	Результат
\$E\$6	Козфф. ЦФ Целевая функция	0	2040

Ячейка	Имя	Исходное значение	Результат
\$B\$3	Значение Табурет	0	0
\$C\$3	Значение Стул	0	24
\$D\$3	Значение Стол	0	3

Ячейка	Имя	Значение	Формула	Статус	Разница
\$E\$10	Ткань Левая часть	78	\$E\$10<=\$G\$10	не связан.	2
\$E\$11	Доски Левая часть	120	\$E\$11<=\$G\$11	связанное	0
\$E\$12	Фурнитура Левая часть	60	\$E\$12<=\$G\$12	связанное	0
\$B\$3	Значение Табурет	0	\$B\$3>=0	связанное	0
\$C\$3	Значение Стул	24	\$C\$3>=0	не связан.	24
\$D\$3	Значение Стол	3	\$D\$3>=0	не связан.	3
\$B\$3	Значение Табурет	0	\$B\$3=целое	связанное	0
\$C\$3	Значение Стул	24	\$C\$3=целое	связанное	0
\$D\$3	Значение Стол	3	\$D\$3=целое	связанное	0

Рис.2.10 Отчет по результатам решения задачи

Отчет состоит из трех таблиц.

В первой таблице указана ячейка целевой функции, ее исходное (начальное) значение и полученный оптимальный результат – 2040 у.е.

Во второй таблице приведены номера ячеек, наименование, исходное и полученные в результате решения задачи значения переменных: табуретов, стульев и столов. Из таблицы видно, что для получения максимальной прибыли мы должны произвести 24 стула и 3 стола. Изготавливать табуретки в данной постановке задачи экономически не целесообразно.

В третьей таблице представлены данные по ограничениям решаемой задачи. Из таблицы видно, что при планируемом оптимальном объеме производства доски и фурнитура будут израсходованы полностью, а ткани останется 2 у.е.

2.2.2. Решение задач нелинейного программирования

Решение задач нелинейного программирования принципиально ничем не отличается от решения задач линейного и целочисленного программирования. Единственное отличие заключается в том, что при установке параметров поиска решения в диалоговом окне «Параметры поиска решения» (рис. 2.5), необходимо снять галочку в строке «Линейная модель».

Кроме того, процедура поиска решения задач нелинейного программирования более критична к исходным начальным данным.

Для решения задач нелинейного программирования в Excel реализовано два метода: метод Ньютона и метод сопряженных градиентов Флетчера-Ривса. Выбор метода решения производится в диалоговом окне «Параметры поиска решения». В качестве критерия останова поиска решения в Excel используется следующее условие:

$$\Delta f_k = \left| \frac{f(x^{k-1}) - f(x^k)}{f(x^k)} \right| \leq \varepsilon \quad (2.6)$$

Значение ε вводится в окне «Параметры поиска решения» в строке «Относительная погрешность».

В соответствии с выражением (2.6) начальные значения переменных желательно назначать близкими к оптимальным значениям, что значительно ускорит процесс решения задачи. Обязательным условием является требование неравенства целевой функции в начальной точке нулю, иначе при вычислении погрешности по выражению (2.6) возможно деление на ноль.

2.2.3. Решение транспортной задачи

Транспортная задача (ТЗ) является частным типом задачи линейного программирования и определяется как задача разработки наиболее экономичного плана перевозки продукции одного вида из нескольких пунктов отправления в пункты назначения. При этом величина транспортных расходов прямо пропорциональна объему перевозимой продукции и задается с помощью тарифов на перевозку единицы продукции.

Задачи транспортного типа широко распространены в практике. К ним сводятся многие задачи линейного программирования – задачи о назначениях, сетевые, календарного планирования и др.

И хотя ТЗ может быть решена одним из методов решения любой задачи линейного программирования, ее математическая модель и структура ограничений имеют ряд специфических особенностей.

Стандартная ТЗ формулируется следующим образом. Имеется m пунктов отправления (или пунктов производства) A_1, \dots, A_m , в которых сосредоточены запасы однородных продуктов в количестве a_1, \dots, a_m единиц. Имеется n пунктов назначения (или пунктов потребления) B_1, \dots, B_n , потребность которых в указанных продуктах составляет b_1, \dots, b_n единиц. Известны также транспортные расходы C_{ij} , связанные с перевозкой единицы продукта из пункта A_i в пункт B_j , $i = 1, 2, \dots, m$; $j = 1, 2, \dots, n$.

Требуется составить такой план перевозок (откуда, куда и сколько единиц продукта везти), чтобы удовлетворить спрос всех пунктов потребления за счет реализации всего продукта, произведенного всеми пунктами производства, при минимальной общей стоимости всех перевозок.

Пусть x_{ij} - количество единиц продукта, поставляемого из пункта A_i в пункт B_j . Подлежащие минимизации суммарные затраты на перевозку продуктов из всех пунктов производства во все пункты потребления выражаются формулой:

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n C_{ij} \cdot x_{ij} \rightarrow \min \quad (2.7)$$

Таким образом, целевая функция ТЗ представляет собой транспортные расходы на осуществление всех перевозок в целом.

Математическая модель ТЗ содержит также две группы ограничений.

Первая группа ограничений указывает, что запас продукции в любом пункте отправления должен быть равен суммарному объему перевозок продукции из этого пункта

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = a_i, \text{ где } i = 1, \dots, m \quad (2.8)$$

Вторая группа ограничений указывает, что суммарные перевозки продукции в некоторый пункт потребления должны полностью удовлетворить спрос на продукцию в этом пункте.

$$\sum_{i=1}^m x_{ij} = b_j, \text{ где } j = 1, \dots, n \quad (2.9)$$

Объемы перевозок - неотрицательные числа, так как перевозки из пунктов потребления в пункты производства исключены:

$$x_{ij} \geq 0, \text{ } i = 1, \dots, m; j = 1, \dots, n. \quad (2.10)$$

Из (2.8), (2.9) следует, что сумма запасов продукции во всех пунктах отправления должна равняться суммарной потребности во всех пунктах потребления, то есть:

$$\sum_{i=1}^m a_i = \sum_{j=1}^n b_j \quad (2.11)$$

Если условие (2.11) выполняется, то ТЗ называется *сбалансированной* (замкнутая модель), в противном случае – *несбалансированной* (открытая модель). Поскольку ограничения модели ТЗ (2.8), (2.9) могут быть выполнены только при сбалансированной ТЗ, то при построении транспортной модели необходимо проверять условие баланса (2.11). В случае, когда суммарные запасы превышают суммарные потребности, необходим дополнительный фиктивный пункт потребления, который будет формально потреблять существующий излишек запасов, то есть

$$b_{\phi} = \sum_{i=1}^m a_i - \sum_{j=1}^n b_j \quad (2.12)$$

Если суммарные потребности превышают суммарные запасы, то необходим дополнительный фиктивный пункт отправления, формально восполняющий существующий недостаток продукции в пунктах отправления:

$$a_{\phi} = \sum_{j=1}^n b_j - \sum_{i=1}^m a_i \quad (2.13)$$

Введение фиктивного потребителя или отправителя повлечет необходимость формального задания фиктивных тарифов C_{ij}^{ϕ} (реально не существующих) для фиктивных перевозок.

Так как нас интересует суммарная стоимость всех перевозок, можно принять величину фиктивного тарифа равной нулю $C_{ij}^{\phi}=0$, что не изменит значение искомой целевой функции.

Рассмотрим процедуру решения транспортной задачи на конкретном примере.

Задача 2

Крупная оптовая фирма занимается поставкой некоего товара в магазины города. Товар поставляется из трех складов, месячные запасы которых составляют 1500, 1300 и 1600 единиц товара соответственно. Товар нужно развести по трем магазинам, месячные потребности которых равны 2100, 1600 и 1000 единиц товара соответственно. Транспортные расходы по доставке единицы товара из соответствующего склада в соответствующий магазин приведены в табл.2.2. Необходимо определить оптимальные по транспортным расходам способы доставки товара со складов в магазины.

Таблица 2.2

Транспортные расходы по доставке товара, руб/шт.

Магазины \ Склады	Магазин 1	Магазин 2	Магазин 3
Склад 1	80	200	70
Склад 2	100	105	120
Склад 3	120	70	90

Составим в MS Excel транспортную матрицу для решения задачи, рис.2.11

	А	В	С	Д	Е
1	Склады	Магазины			Запасы товара, шт
2		Магазин 1	Магазин 2	Магазин 3	
3		Стоимость перевозки товара, руб/шт.			
4	Склад 1	80	200	70	1500
5	Склад 2	100	105	120	1300
6	Склад 3	120	70	90	1600
7	Потребность в товаре, шт.	2100	1600	1000	

Рис.2.11 Транспортная матрица задачи в MS Excel

Проверяем баланс ТЗ.

Суммарные запасы составляют $\sum_{i=1}^m a_i = 4400$ шт. товара, суммарная

потребность $\sum_{j=1}^n b_j = 4700$ шт.

Транспортная задача не сбалансирована – спрос превышает предложение. Приведем ТЗ к сбалансированной, добавив еще один фиктивный склад, стоимость перевозки товара в который будет равна нулю.

Определим количество товара на фиктивном складе

$a_{\phi} = \sum_{j=1}^n b_j - \sum_{i=1}^m a_i = 4700 - 4400 = 300$ шт. и внесем изменения в лист книги MS Excel (рис.2.12).

	А	В	С	Д	Е
1	Склады	Магазины			Запасы товара, шт
2		Магазин 1	Магазин 2	Магазин 3	
3		Стоимость перевозки товара, руб/шт.			
4	Склад 1	80	200	70	1500
5	Склад 2	100	105	120	1300
6	Склад 3	120	70	90	1600
7	Фиктивн. Склад	0	0	0	300
8	Потребность в товаре, шт.	2100	1600	1000	

Рис.2.12 Сбалансированная транспортная матрица

Сбалансированность транспортной матрицы легко проверить средствами Excel, последовательно вычислив суммы ячеек В8:Д8 и Е4:Е7. Суммы должны быть одинаковыми.

Создадим экранную форму решения ТЗ, для чего выделим на листе книги все ячейки транспортной матрицы, создадим ее копию и внесем в копию необходимые исправления. За начальные условия перевозимого количества товара примем нули, рис.2.13.

	А	В	С	Д	Е
1	Склады	Магазины			Запасы товара, шт
2		Магазин 1	Магазин 2	Магазин 3	
3		Стоимость перевозки товара, руб/шт.			
4	Склад 1	80	200	70	1500
5	Склад 2	100	105	120	1300
6	Склад 3	120	70	90	1600
7	Фиктивн. Склад	0	0	0	300
8	Потребность в товаре, шт.	2100	1600	1000	
9					
10					
11	Склады	Магазины			Запасы товара, шт
12		Магазин 1	Магазин 2	Магазин 3	
13		Количество перевозимого товара, шт.			
14	Склад 1	0	0	0	
15	Склад 2	0	0	0	
16	Склад 3	0	0	0	
17	Фиктивн. Склад	0	0	0	
18	Потребность в товаре, шт.				
19	Стоимость перевозок, руб				

Рис.2.13 Транспортная матрица и экранная форма решения ТЗ

Заполним полученную экранную форму необходимыми формулами. Для этого удобно воспользоваться встроенными в Excel математическими формулами СУММ() и СУММПРОИЗВ(), рис.2.14.

	A	B	C	D	E
1			Магазины		
2	Склады	Магазин 1	Магазин 2	Магазин 3	Запасы товара, шт
3		Стоимость перевозки товара, руб/шт.			
4	Склад 1	80	200	70	1500
5	Склад 2	100	105	120	1300
6	Склад 3	120	70	90	1600
7	Фиктивн. Склад	0	0	0	300
8	Потребность в товаре, шт.	2100	1600	1000	
9					
10					
11			Магазины		
12	Склады	Магазин 1	Магазин 2	Магазин 3	Запасы товара, шт
13		Количество перевозимого товара, шт.			
14	Склад 1	0	0	0	=СУММ(B14:D14)
15	Склад 2	0	0	0	=СУММ(B15:D15)
16	Склад 3	0	0	0	=СУММ(B16:D16)
17	Фиктивн. Склад	0	0	0	=СУММ(B17:D17)
18	Потребность в товаре, шт.	=СУММ(B14:B17)	=СУММ(C14:C17)	=СУММ(D14:D17)	
19	Стоимость перевозок, руб	=СУММПРОИЗВ(B4:B7;B14:B17)	=СУММПРОИЗВ(C4:C7;C14:C17)	=СУММПРОИЗВ(D4:D7;D14:D17)	=СУММ(B19:D19)
20					

Рис.2.14 Экранная форма решения ТЗ с введенными формулами

Ячейка E19 содержит формулу для вычисления значения целевой функции – суммарной стоимости всех транспортных перевозок.

Выберем в меню СЕРВИС команду ПОИСК РЕШЕНИЯ и установим в диалоговом окне формы «Поиск решения» целевую ячейку, требуемый вид зависимости целевой функции, диапазон ячеек переменных и ограничения в соответствии с условиями решаемой ТЗ аналогично примеру Задачи 1, п.2.2.1, рис.2.15.

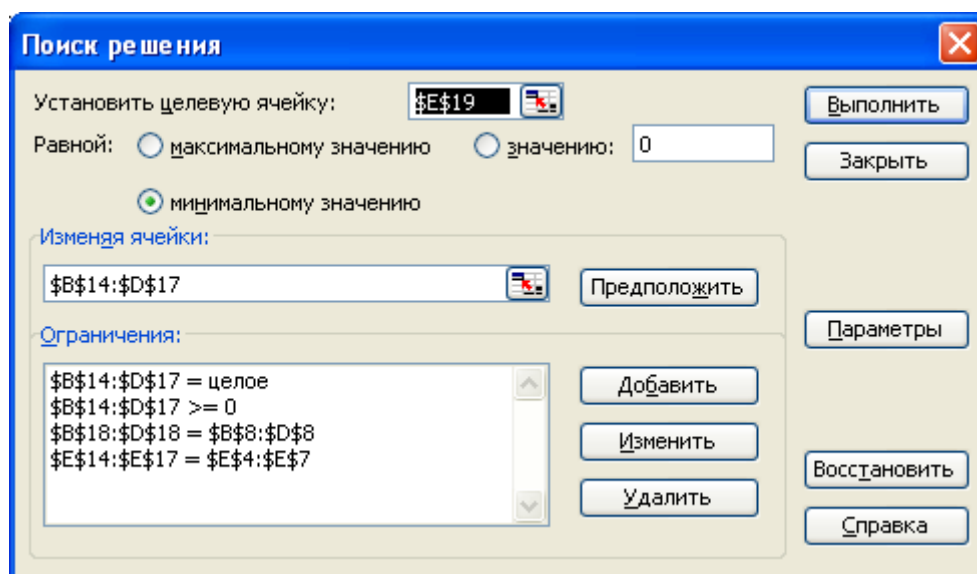


Рис.2.15 Окно форма «Поиск решения» ТЗ

Нажмем кнопку «Параметры» и в открывшемся диалоговом окне формы «Параметры поиска решения» отметим галочкой «Линейная модель», так как решаемая нами ТЗ является задачей линейного программирования.

После выполнения процедуры поиска решения на рабочем листе книги получим решение ТЗ, рис.2.16.

	А	В	С	Д	Е
11	Склады	Магазины			Запасы товара, шт
12		Магазин 1	Магазин 2	Магазин 3	
13		Количество перевозимого товара, шт.			
14	Склад 1	500	0	1000	1500
15	Склад 2	1300	0	0	1300
16	Склад 3	0	1600	0	1600
17	Фиктивн. Склад	300	0	0	300
18	Потребность в товаре, шт.	2100	1600	1000	
19	Стоимость перевозок, руб	170000	112000	70000	352000

Рис.2.16 Результат решения ТЗ на листе книги MS Excel

2.3. Лабораторная работа № 4 «Определение оптимального количества трансформаторов цеховых подстанций»

Цель работы: овладение методикой математического моделирования и решения оптимизационных задач электроснабжения.

2.3.1. Задание

От шин 10 кВ главной понизительной подстанции (ГПП) предприятия осуществляется электроснабжение цехов с суммарными расчетными нагрузками P_p и Q_p . (рис. 2.17). Определить оптимальное количество цеховых трансформаторов напряжением 10/0.4 кВ с заданными номинальной мощностью $S_{тр}$ и коэффициентом загрузки k_3 при условии, что со стороны питания потребляемая реактивная мощность не должна превышать значения Q_c . Устройства для компенсации реактивной мощности могут быть установлены как на шинах 10 кВ ГПП Q_{10} , так и на шинах 0.4 кВ цеховых трансформаторов Q_{04} .

Исходные данные для решения задачи приведены в табл. 2.3. Затраты на единицу мощности трансформаторов и компенсирующих устройств обозначены через Z .

Необходимо составить математическую модель задачи, создать экранную форму и решить задачу в программе MS Excel.

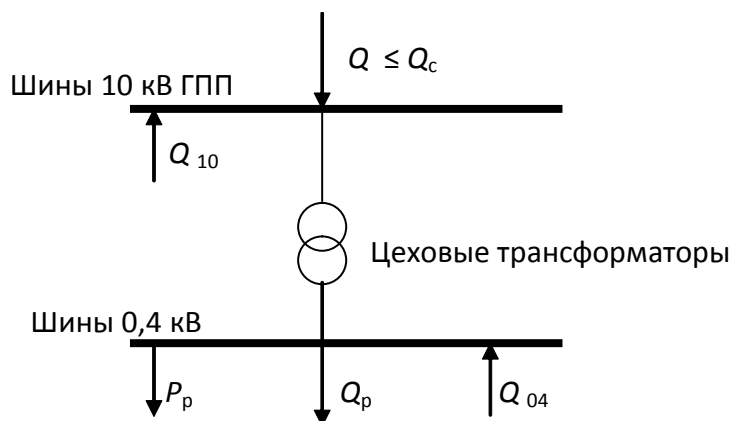


Рис.2.17 Расчетная схема электроснабжения предприятия

Таблица 2.3

Исходные данные

№ вар	P_p , МВА	Q_p , МВар	k_3	$S_{тр}$, кВА	$Z_{тр}$, у.е./кВА	Z_{04} , у.е./кВар	Z_{10} , у.е./кВар
1	20	18	0.7	1000	9	10	4
2	25	20	0.75	1600	10	9	4.5
3	30	25	0.8	2500	9	8	4
4	33	29	0.85	1000	10	8,5	5
5	35	30	0.9	1600	9	10	5
6	28	24	0.75	2500	11	9	4.5
7	33	25	0.8	1000	10	8	3.8
8	30	28	0.7	1600	12	9	5
9	32	27	0.75	2500	11	10	4
10	26	22	0.8	630	12	9	3.8
11	28	25	0.7	1000	10	10	5
12	24	20	0.75	630	10	9	4
13	30	25	0.8	1600	9	8	3.5
14	25	20	0.7	630	10	9	5
15	23	19	0.8	1000	9	9	5

2.3.2. Методические указания

По заданным расчетным активной P_p и реактивной Q_p нагрузкам определяется полная расчетная нагрузка

$$S_p = \sqrt{P_p^2 + Q_p^2} \quad (2.14)$$

По величине S_p и заданному коэффициенту загрузки k_3 определяется максимальное количество цеховых трансформаторов с заданной номинальной мощностью $S_{тр}$

$$N_{\max} = \frac{S_p}{S_{тр} \cdot k_3} \quad (2.15)$$

При полной компенсации реактивной мощности на шинах 0,4 кВ ($Q_p = Q_{04}$) количество цеховых трансформаторов будет минимальным

$$N_{\min} = \frac{P_p}{S_{тр} \cdot k_3} \quad (2.16)$$

Значения N_{\max} и N_{\min} округляются до ближайших больших целых чисел.

Оптимальное количество цеховых трансформаторов N , подлежащее определению, будет лежать в пределах $N_{\max} \geq N \geq N_{\min}$.

Величина мощности компенсирующих устройств на шинах 0,4 кВ, позволяющая сократить количество трансформаторов на единицу составит

$$Q_{04}^1 = \frac{Q_p}{N_{\max} - N_{\min}} \quad (2.17)$$

Для определения оптимального количества трансформаторов необходимо найти минимум целевой функции

$$Z = Z_{\text{тр}} \cdot S_{\text{тр}} \cdot N + Z_{04} \cdot Q_{04} + Z_{10} \cdot Q_{10} \quad (2.18)$$

представляющей собой суммарные затраты на цеховые трансформаторы и компенсирующие устройства на 0.4 и 10 кВ.

Минимум целевой функции (2.18) ищется при следующих ограничениях:

1. Суммарная величина мощности компенсирующих устройств на шинах 0,4 и 10 кВ должна быть равна расчетной реактивной нагрузке (перекомпенсация не допускается)

$$Q_{04} + Q_{10} = Q_p \quad (2.19)$$

2. Искомое количество трансформаторов, уменьшаемое за счет установки компенсирующих устройств на шинах 0.4 кВ, определится условием

$$N \geq N_{\max} - \frac{Q_{04}}{Q_{04}^1} \quad (2.20)$$

Решение задачи должно выполняться при граничных условиях

$$N \geq 0, Q_{04} \geq 0, Q_{10} \geq 0. \quad (2.21)$$

Задача приведена к формализованному виду для решения в MS Excel.

2.3.3. Требования к отчету

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

1. Цель и порядок выполнения работы
2. Математическую модель задачи и результаты промежуточных расчетов
3. Краткую характеристику математической модели
4. Результаты расчетов в среде MS Excel
5. Краткий анализ решения
6. Выводы

2.3.4. Контрольные вопросы

1. Каковы основные этапы решения задач линейного программирования в MS Excel
2. Каков вид и способы задания формул для целевой ячейки и ячеек левых частей ограничений

3. Каким образом в MS Excel задается направление оптимизации целевой функции
4. Какие ячейки экранной формы выполняют иллюстративную функцию, а какие необходимы для решения задачи
5. Поясните общий порядок работы с формой «Поиск решения»
6. Назовите разновидности задач линейного программирования

2.4. Лабораторная работа № 5 «Оптимальное распределение компенсирующих устройств в радиальной схеме электроснабжения»

Цель работы: овладение методикой математического моделирования и решения оптимизационных задач электроснабжения.

2.4.1. Задание

Питание цеховых трансформаторных подстанций промышленного предприятия осуществляется от шин $U = 10$ кВ главной понизительной подстанции (ГПП) кабельными линиями по радиальной схеме (рис.2.18).

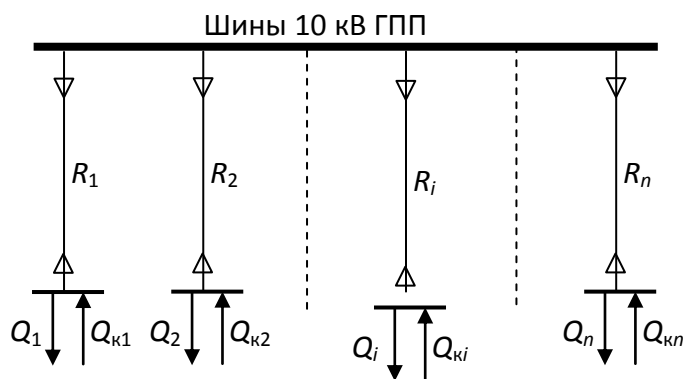


Рис.2.18 Расчетная схема электроснабжения предприятия

Значения активных сопротивлений кабельных линий R_i , реактивные нагрузки цехов Q_i и суммарная мощность компенсирующих устройств Q_k приведены в табл.2.4.

Технические данные нерегулируемых конденсаторных установок, используемых на предприятии, приведены в таблице 2.5.

Требуется найти оптимальный вариант распределения компенсирующих устройств заданной суммарной мощности Q_k между

цеховыми подстанциями по условию минимума потерь активной мощности в линиях. Найти теоретически возможный и практический минимум потерь активной мощности в системе электроснабжения.

Таблица 2.4

Исходные данные

№ вар	R_1 , Ом	R_2 , Ом	R_3 , Ом	R_4 , Ом	Q_1 , кВар	Q_2 , кВар	Q_3 , кВар	Q_4 , кВар	Q_k , кВар
1	0.1	0.2	0.3	0.4	4000	3000	1000	2000	7500
2	0.15	0.1	0.3	0.25	1000	2000	3000	4000	7500
3	0.35	0.25	0.2	0.1	2500	3500	1000	2000	6000
4	0.4	0.3	0.25	0.2	1000	2000	2500	3500	6000
5	0.25	0.25	0.1	0.1	1500	3500	3500	1500	7500
6	0.1	0.1	0.25	0.25	2500	2000	2000	2500	6600
7	0.25	0.1	0.25	0.1	3000	1500	1500	3000	6600
8	0.15	0.25	0.15	0.25	1500	2500	2500	2500	6000
9	0.2	0.4	0.3	0.1	2500	2500	2500	2500	7500
10	0.4	0.3	0.2	0.1	1500	1500	3000	3000	6600
11	0.4	0.4	0.2	0.15	1000	2000	3000	4000	7500
12	0.25	0.15	0.1	0.4	2000	3000	2500	2500	7500
13	0.25	0.25	0.4	0.1	1500	3000	3000	1500	6600
14	0.2	0.3	0.35	0.25	2000	2500	2000	2500	6600
15	0.35	0.45	0.2	0.25	1000	4000	1500	2500	6000

Таблица 2.5

Технические данные нерегулируемых конденсаторных установок

Тип	Номинальное напряжение, кВ	Шкала номинальных мощностей, кВар
УК-10-Q УЗ	10.5	300, 600, 900, 1200, 1500, 1800

2.4.2. Методические указания

Потери активной мощности в линии при передаче по ней реактивной мощности определяются выражением:

$$\Delta P = \frac{Q^2 \cdot R}{U^2}, \text{ Вт} \quad (2.24)$$

где Q – значение передаваемой по линии реактивной мощности, кВар; R – активное сопротивление линии, Ом; U – номинальное напряжение, кВ.

Суммарные потери активной мощности в радиальной схеме электроснабжения от реактивных нагрузок Q_i при установке у каждой нагрузки компенсирующего устройства мощностью Q_{ki} можно определить по выражению

$$\Delta P = \sum_{i=1}^n \frac{(Q_i - Q_{ki})^2 \cdot R_i}{U^2} \quad (2.25)$$

где n – количество узлов нагрузки (цеховых трансформаторных подстанций).

Выражение (2.25) является целевой функцией решаемой задачи. Требуется найти минимум целевой функции при следующих ограничениях

1. Мощность устанавливаемых компенсирующих устройств должна быть положительной

$$Q_{ki} \geq 0, i = 1, 2 \dots n \quad (2.26)$$

2. Суммарная мощность устанавливаемых компенсирующих устройств должна быть равна заданной Q_k

$$\sum_{i=1}^n Q_{ki} = Q_k \quad (2.27)$$

Выражения (2.25)-(2.27) являются математической моделью решаемой задачи с непрерывными переменными. Решение данной задачи позволяет определить теоретически возможный минимум потерь активной мощности в системе электроснабжения, достижение которого возможно только при использовании в каждом узле нагрузки регулируемых источников реактивной мощности, например синхронных компенсаторов. Однако такое решение требует значительных капитальных затрат, поэтому на практике для компенсации реактивной мощности на промышленных предприятиях обычно используют нерегулируемые статические конденсаторные батареи. В этом случае мощность компенсирующих устройств может изменяться только с дискретным шагом, величина которого зависит от

типа и технических характеристик используемых конденсаторных установок.

Для конденсаторных батарей, технические характеристики которых приведены в табл.1.5, шаг дискретизации составляет 300 кВар.

Для нахождения практического минимума потерь активной мощности в системе электроснабжения требуется формализовать математическую модель, описываемую выражениями (2.25)-(2.27), к математической модели с дискретными переменными. В общем случае, способы формализации математических уравнений могут быть различными, выбор же конкретного варианта определяется исследователем самостоятельно.

2.4.3. Требования к отчету

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

1. Цель и порядок выполнения работы
2. Математические модели задачи и результаты промежуточных расчетов
3. Краткую характеристику математических моделей
4. Результаты расчетов в среде MS Excel
5. Краткий анализ решения
6. Выводы

2.4.4. Контрольные вопросы

1. В чем заключается различие решения задач линейного и нелинейного программирования в среде MS Excel
2. Каковы особенности математических моделей дискретной оптимизации
3. В чем заключается различие задач условной и безусловной оптимизации
4. Каким образом в MS Excel задачи математического программирования приводятся к целочисленным
5. Поясните общий порядок работы с формой «Поиск решения»
6. Назовите разновидности задач линейного программирования

2.5. Лабораторная работа № 6 «Оптимальное распределение компенсирующих устройств в магистральной схеме электроснабжения»

Цель работы: овладение методикой математического моделирования и решения оптимизационных задач электроснабжения.

2.5.1. Задание

Питание группы потребителей промышленного предприятия осуществляется от шин $U = 10$ кВ главной понизительной подстанции (ГПП) кабельными линиями по магистральной схеме (рис.2.19).

Значения активных сопротивлений кабельных линий R_i , реактивные нагрузки потребителей Q_i и суммарную мощность компенсирующих устройств Q_k возьмем из условий предыдущей задачи (табл.2.4).

Технические данные нерегулируемых конденсаторных установок, используемых на предприятии, приведены в таблице 2.5.

Требуется найти оптимальный вариант распределения компенсирующих устройств заданной суммарной мощности Q_k между узлами нагрузки по условию минимума потерь активной мощности в линиях. Найти теоретически возможный и практический минимум потерь активной мощности в системе электроснабжения.

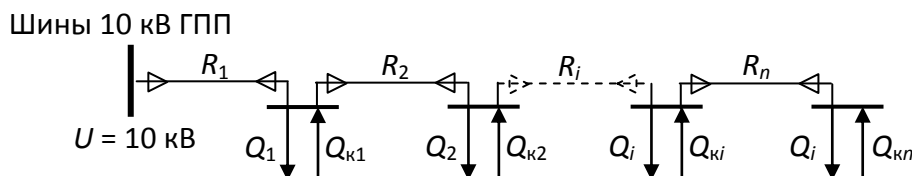


Рис.1.19 Расчетная схема электроснабжения группы потребителей предприятия

2.5.2. Методические указания

Суммарные потери активной мощности в магистральной линии при передаче по ней реактивной мощности определяются выражением:

$$\Delta P = \frac{1}{U^2} \left(R_1 \cdot \left(\sum_1^n Q_i - \sum_1^n Q_{ki} \right)^2 + R_2 \cdot \left(\sum_2^n Q_i - \sum_2^n Q_{ki} \right)^2 + \dots + \right. \\ \left. + R_i \cdot \left(\sum_i^n Q_i - \sum_i^n Q_{ki} \right)^2 + R_n \cdot (Q_n - Q_{kn})^2 \right), \text{ Вт} \quad (2.28)$$

где Q_i , Q_{kii} – значения потребляемой и компенсирующей реактивной мощности в узле нагрузки соответственно, кВар; R_i – активное сопротивление участка линии, Ом; U – номинальное напряжение, кВ, n – количество узлов нагрузки.

Выражение (2.28) представляет собой целевую функцию решаемой задачи. Требуется найти минимум целевой функции при следующих ограничениях

1. Мощность устанавливаемых компенсирующих устройств должна быть положительной

$$Q_{ki} \geq 0, i = 1, 2 \dots n \quad (2.29)$$

2. Суммарная мощность устанавливаемых компенсирующих устройств должна быть равна заданной Q_k

$$\sum_{i=1}^n Q_{ki} = Q_k \quad (2.30)$$

Выражения (2.28)-(2.30) являются математической моделью решаемой задачи с непрерывными переменными.

Разработайте экранную форму математической модели задачи и найдите ее решение средствами MS Excel.

Последовательно произвольно измените сопротивления участков линий R_i схемы электроснабжения и значения потребляемой реактивной мощности Q_i в узлах нагрузки, так чтобы суммарные значения сопротивлений и потребляемой реактивной мощности остались неизменными ($\sum R_i = \text{const}$, $\sum Q_i = \text{const}$). Найдите решения и проанализируйте полученные результаты.

Преобразуйте математическую модель задачи в модель с целочисленными дискретными переменными и найдите ее решение. Проведите анализ полученных результатов.

Сформулируйте условия размещения компенсирующих устройств в магистральных схемах электроснабжения.

2.5.3. Требования к отчету

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

1. Цель и порядок выполнения работы

2. Математические модели задачи и результаты промежуточных расчетов
3. Краткую характеристику математических моделей
4. Результаты расчетов в среде MS Excel
5. Краткий анализ решений
6. Выводы

2.5.4. Контрольные вопросы

1. Какое влияние на потери мощности в сети оказывает место размещения компенсирующих устройств
2. Какие источники реактивной мощности используются на промышленных предприятиях, их достоинства и недостатки
3. Для чего нужно компенсировать реактивную мощность в электрических сетях
4. Каким образом в MS Excel задачи математического программирования приводятся к целочисленным
5. Поясните общий порядок работы с формой «Поиск решения»
6. Назовите разновидности задач линейного программирования
7. Что является графическим решением задачи линейного программирования
8. В чем заключается основная идея симплекс-метода решения задач линейного программирования

2.6. Лабораторная работа № 7 «Оптимальное проектирование схемы электроснабжения»

Цель работы: овладение методикой математического моделирования и решения оптимизационных задач электроснабжения.

2.6.1. Задание

Производится проектирование схемы электроснабжения сетевого района нефтедобывающей компании. Определены требуемая мощность производственных объектов и располагаемый резерв мощности близлежащих подстанций. Известны также расстояния от производственных объектов до каждой подстанции (табл.2.6).

Требуется определить оптимальную с точки зрения минимума приведенных затрат схему электроснабжения сетевого района.

Таблица 2.6

Исходные данные на проектирование

№ вар		Резерв мощности, МВт	Мощность производственных объектов, МВт					
			Объект 1	Объект 2	Объект 3	Объект 4	Объект 5	Объект 6
			25	40	30	10	20	15
Расстояние от объекта до подстанции, км								
1	П/ст 1	50	15	30	18	42	16	19
	П/ст 2	80	25	12	21	30	20	40
	П/ст 3	40	30	16	25	25	32	42
2	П/ст 1	50	25	25	10	15	15	20
	П/ст 2	50	25	20	25	20	25	20
	П/ст 3	60	25	15	30	35	20	10
3	П/ст 1	50	10	20	25	25	20	15
	П/ст 2	40	30	20	20	25	10	20
	П/ст 3	80	30	25	25	20	15	15
4	П/ст 1	60	10	10	10	20	20	20
	П/ст 2	60	30	30	20	15	15	30
	П/ст 3	40	35	15	35	30	25	20
5	П/ст 1	80	30	20	10	10	20	30
	П/ст 2	60	15	15	35	35	35	15
	П/ст 3	40	20	10	30	30	20	10

2.6.2. Методические указания

Приведенные годовые затраты на сооружение и эксплуатацию электрической сети определяются по выражению:

$$Z_{\text{пр}} = p_n \cdot K + C_3, \text{ руб} \quad (2.31)$$

где p_n – нормативный коэффициент капитальных вложений; K – капитальные вложения; C_3 – стоимость потерь электроэнергии в проводах ЛЭП.

Величина капитальных вложений на сооружение ЛЭП зависит от ее сечения и длины:

$$K = (a + b \cdot S) \cdot l \quad (21.32)$$

где a, b – расчетные коэффициенты; S, l – сечение и длина ЛЭП соответственно.

Стоимость потерь электрической энергии в проводах ЛЭП определяется законом Джоуля-Ленца:

$$C_3 = 3 \cdot I^2 \cdot R \cdot \text{Ц} \cdot t \quad (2.33)$$

где I, R – ток в фазе линии и ее активное сопротивление; Ц – отпускная цена кВт·ч электрической энергии; t – число часов работы линии в год.

Активное сопротивление линии можно определить по выражению:

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad (2.34)$$

где ρ – удельное сопротивление материала провода.

Сечения проводников в сетях высокого напряжения определяются по экономической плотности тока:

$$S = \frac{I}{J_{\text{ЭК}}} \quad (2.35)$$

Преобразуя выражение (2.31) с учетом (2.32)-(2.35), получим:

$$Z_{\text{пр}} = a \cdot l + \left(\frac{b}{J_{\text{ЭК}}} + 3 J_{\text{ЭК}} \cdot \rho \cdot \text{Ц} \cdot t \right) \cdot I \cdot l \quad (2.36)$$

Для n участков электрической сети суммарные приведенные затраты определяются выражением:

$$Z_{\text{пр}} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n k_1 \cdot l_{ij} + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n k_2 \cdot l_{ij} \cdot I_{ij} \quad (2.37)$$

где I_{ij} – ток, потребляемый j -м потребителем с i -й подстанции; l_{ij} – расстояние от j -го потребителя до i -й подстанции; k_1, k_2 – постоянные коэффициенты.

Для достижения минимальных приведенных затрат достаточно минимизировать второй член уравнения (2.37), при этом значение коэффициента k_2 можно не учитывать. С учетом того, что ток в линии прямо пропорционален передаваемой по ней мощности, получим выражение целевой функции решаемой задачи:

$$Z = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n l_{ij} \cdot P_{ij} \rightarrow \min \quad (2.38)$$

Требуется найти минимум целевой функции при следующих ограничениях

1. Суммарная мощность, потребляемая всеми потребителями с одной подстанции должна быть равна располагаемой мощности подстанции

$$\sum_{i=1}^m P_{ij} = P_i, \quad i = 1, 2 \dots m \quad (2.39)$$

2. Суммарная мощность, передаваемая всеми подстанциями одному потребителю должна быть равна требуемой мощности этого объекта

$$\sum_{j=1}^n P_{ij} = P_j, \quad j = 1, 2 \dots n \quad (2.40)$$

3. Величина мощности, передаваемой по линии должна быть положительной

$$P_{ij} \geq 0 \quad (2.41)$$

Выражения (2.38)-(2.41) являются математической моделью решаемой задачи.

Перед решением задачи необходимо проверить баланс располагаемой и требуемой мощности и при необходимости привести задачу к сбалансированной.

Разработайте экранную форму математической модели задачи и найдите ее решение средствами MS Excel.

2.6.3. Требования к отчету

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

1. Цель и порядок выполнения работы
2. Математическую модель задачи и результаты промежуточных расчетов
3. Краткую характеристику математической модели
4. Результаты расчетов в среде MS Excel
5. Краткий анализ решения
6. Выводы

2.6.4. Контрольные вопросы

1. Дайте определение транспортной задачи линейного программирования
2. Какие основные отличия между сбалансированной и несбалансированной транспортными задачами
3. Какие возможные области применения транспортных задач при проектировании и эксплуатации систем электроснабжения
4. Особенности транспортной задачи с учетом транзита мощности
5. Назовите разновидности задач линейного программирования

ЛИТЕРАТУРА:

1. В.А.Веников, Г.В.Веников. Теория подобия и моделирования. М: Высш. шк. 1984 г.
2. Кабышев А.В., Обухов С.Г. Расчет и проектирование систем электроснабжения объектов и установок /Учебное пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 2006. –248 с.
3. Справочник по электроснабжению и электрооборудованию. В 2 т./ Под ред. А.А. Федорова. т.1, т.2, - М.: Энергоатомиздат, 1986, 1987 гг.
4. Костин В.Н. Оптимизационные задачи электроэнергетики. Учеб. пособие / Санкт-Петербург, 2008, - 123 с.
5. Математическая статистика: Учеб. для вузов / В.Б. Горяинов, И.В. Павлов, Г.М. Цветкова и др.; Под ред. В.С. Зарубина, А.П. Кршченко. — М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. -424 с. (Сер. Математика в техническом университете; Вып. XVII).

СОДЕРЖАНИЕ

1. МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ	3
1.1. Теоретические сведения	3
1.2. Лабораторная работа № 1 «Моделирование схемы электроснабжения для расчёта токов короткого замыкания в сети выше 1000 В»	15
1.2.1. Методические указания	15
1.2.2. Пример расчета	16
1.2.3. Задание.....	22
1.2.4. Требования к отчету	23
1.2.5. Контрольные вопросы.....	23
1.3. Лабораторная работа № 2 «Моделирование схемы электроснабжения для расчёта токов короткого замыкания в сети до 1000 В».....	24
1.3.1. Методические указания	24
1.3.2. Пример расчета	25
1.3.3. Задание.....	30
1.3.4. Требования к отчету	31
1.3.5. Контрольные вопросы.....	31
1.4. Лабораторная работа № 3 «Моделирование схемы электроснабжения для расчёта токов короткого замыкания в сети до 1000 В в среде Electronics Workbench»	32
1.4.1. Пример моделирования.....	32
1.4.2. Задание.....	36
1.4.3. Требования к отчету	36
1.4.4. Контрольные вопросы.....	37
2. ОПТИМИЗАЦИОННЫЕ ЗАДАЧИ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ	38
2.1. Теоретические сведения	38
2.2. Решение задач математического программирования средствами MS Excel ...	40
2.2.1. Решение задач линейного программирования.....	41
2.2.2. Решение задач нелинейного программирования.....	51
2.2.3. Решение транспортной задачи	51
2.3. Лабораторная работа № 4 «Определение оптимального количества трансформаторов цеховых подстанций».....	58
2.3.1. Задание.....	58
2.3.2. Методические указания	59
2.3.3. Требования к отчету	60
2.3.4. Контрольные вопросы.....	60
2.4. Лабораторная работа № 5 «Оптимальное распределение компенсирующих устройств в радиальной схеме электроснабжения».....	61
2.4.1. Задание.....	61
2.4.2. Методические указания	63
2.4.3. Требования к отчету	64
2.4.4. Контрольные вопросы.....	64
2.5. Лабораторная работа № 6 «Оптимальное распределение компенсирующих устройств в магистральной схеме электроснабжения»	65
2.5.1. Задание.....	65

2.5.2. Методические указания	65
2.5.3. Требования к отчету	66
2.5.4. Контрольные вопросы.....	67
2.6. Лабораторная работа № 7 «Оптимальное проектирование схемы электропитания»	67
2.6.1. Задание.....	67
2.6.2. Методические указания	68
2.6.3. Требования к отчету	70
2.6.4. Контрольные вопросы.....	70
ЛИТЕРАТУРА:	71

Учебное издание

ОБУХОВ Сергей Геннадьевич

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИИ

Методические указания к выполнению лабораторных работ

Научный редактор доктор физико-математических наук,
профессор *А.В. Кабышев*

Редактор *С.Г. Обухов*

Компьютерная верстка *С.Г. Обухов*

Дизайн обложки *И.О. Фамилия*

Подписано к печати 05.11.2011. Формат 60x84/16. Бумага «Снегурочка».

Печать XEROX. Усл.печ.л. 9,01. Уч.-изд.л. 8,16.


Заказ . Тираж 100 экз.



Национальный исследовательский Томский политехнический университет
Система менеджмента качества

Издательства Томского политехнического университета сертифицирована
NATIONAL QUALITY ASSURANCE по стандарту BS EN ISO 9001:2008



ИЗДАТЕЛЬСТВО  ТПУ . 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30
Тел./факс: 8(3822)56-35-35, www.tpu.ru