

Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Шаненкова Ю.Л.

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ЛАБОРАТОРНЫМ
РАБОТАМ ПО ДИСЦИПЛИНЕ
«МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В
СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ»**

Томск – 2018

ОГЛАВЛЕНИЕ

| | |
|---|-----------|
| 1. Применение математического моделирования для решения электротехнических задач | 3 |
| I. Моделирование систем электроснабжения для расчета токов короткого замыкания..... | 7 |
| 2. Моделирование схемы электроснабжения для расчёта токов короткого замыкания в сети выше 1000 В..... | 17 |
| 3. Моделирование схемы электроснабжения для расчёта токов короткого замыкания в сети выше 1000 В в среде Electronics Workbench..... | 23 |
| 4. Моделирование схемы электроснабжения для расчёта токов короткого замыкания в сети до 1000 В | 30 |
| 5. Моделирование схемы электроснабжения для расчёта токов короткого замыкания в сети до 1000 В в среде Electronics Workbench | 37 |
| II. Оптимизационные задачи электроснабжения | 42 |
| 6. Определение оптимального количества трансформаторов цеховых подстанций..... | 59 |
| 7. Оптимальное распределение компенсирующих устройств в радиальной схеме электроснабжения | 62 |
| 8. Оптимальное распределение компенсирующих устройств в магистральной схеме электроснабжения..... | 65 |
| 9. Оптимальное проектирование схемы электроснабжения..... | 67 |

1. ПРИМЕНЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ ЗАДАЧ

Цель работы: применение различных видов моделей при решении электротехнических задач в среде *Mathcad* и *Electronics Workbench*. Исследование возможностей графического моделирования для представления процессов и функций в двухмерном и трехмерном пространствах в среде *Mathcad* и *Excel*.

1.1. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

Моделирование представляет собой универсальный и эффективный метод познания окружающего мира. Процесс решения любой задачи неразрывно связан с формированием того или иного вида модели.

Модель – это материальный или мысленно представляемый объект, который в процессе познания (изучения) замещает объект-оригинал, сохраняя при этом наиболее типичные его черты, характерные для решаемой задачи.

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

Использование модели позволяет:

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

Эффективная модель должна обладать рядом свойств, таких как:

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

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

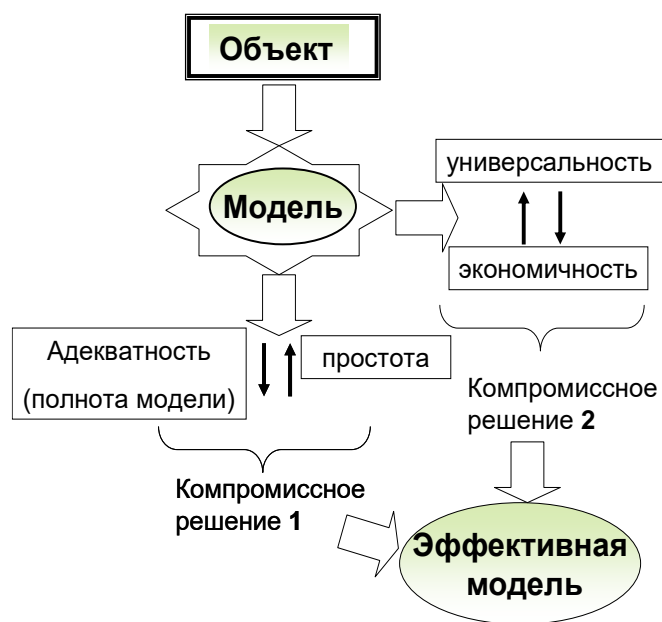


Рисунок 1.1 – Процедура формирования эффективной модели

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

К материальным можно отнести, в частности, физические модели, которые представляют собой увеличенную или уменьшенную копию объекта-оригинала. При этом допускается исследование свойств с последующим переносом их на реальный объект на основе теории подобия.

Идеальные включают в себя образные (иконические), вербальные (словесные), знаковые модели. К знаковым, в частности, относятся графические и математические модели. Графические модели позволяют с помощью графики отобразить существенные свойства объекта. Математические модели позволяют описать свойства объекта на языке математики для решения различных исследовательских задач.

В лабораторной работе исследуются возможности применения различных форм моделей для решения электротехнических задач с помощью универсальных и специализированных программных систем, таких как *Mathcad*, *Electronics Workbench*, *Microsoft Excel*.

1.2. ЗАДАНИЕ НА ВЫПОЛНЕНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

1. В качестве исходных данных задана схема электрических соединений по вариантам (таблица 1.1, рисунки 1.2 и 1.3).

- Сформировать физическую модель в виде электрической схемы в *Electronics Workbench* и измерить значения токов I_1 , I_2 и I_3 . Краткое описание принципов работы в среде *Electronics Workbench* представлено в приложении 6.

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

- Сравнить результаты, полученные с помощью физической и математической моделей.

2. В качестве исходных данных задана схема электрических соединений (таблица 1.2, рисунки 1.4 и 1.5).

- Сформировать физическую модель в виде электрической схемы в *Electronics Workbench* и измерить значения токов I_1 , I_2 и I_3 .

- Сформировать математическую модель в виде системы уравнений на основе первого и второго законов Кирхгофа и рассчитать значения токов I_1 , I_2 и I_3 в среде *Mathcad* с использованием конструкции {*Given Find*};

3. Заданы статистические данные о нагрузке предприятия (таблица 1.3).

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

- Определить значения потребленной электроэнергии за сутки/год, максимальную нагрузку, среднюю нагрузку, среднюю нагрузку за наиболее загруженную смену, коэффициент использования, коэффициент максимума, коэффициент загрузки, максимальное число часов использования нагрузки, используя встроенные функции *Microsoft Excel*.

Таблица 1.1 – Исходные данные

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

Таблица 1.2 – Исходные данные

| Номер варианта | R_1 | R_2 | R_3 | E_1 | E_3 | Номер схемы |
|----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------------|
| 1 | 7 | 4 | 8 | 20 | 15 | 3 |
| 2 | 2 | 6 | 3 | 12 | 15 | 4 |
| 3 | 6 | 3 | 7 | 20 | 15 | 3 |
| 4 | 4 | 8 | 5 | 12 | 15 | 4 |
| 5 | 8 | 5 | 9 | 20 | 15 | 3 |
| 6 | 3 | 7 | 4 | 12 | 15 | 4 |
| 7 | 5 | 2 | 6 | 20 | 15 | 3 |
| 8 | 3 | 2 | 7 | 12 | 15 | 4 |
| 9 | 9 | 6 | 10 | 20 | 15 | 3 |
| 10 | 4 | 5 | 8 | 12 | 15 | 4 |

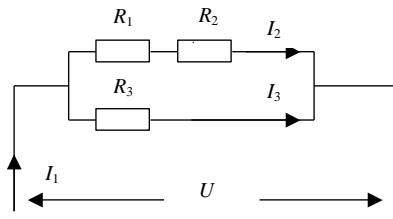


Рисунок 1.2 – Схема №1

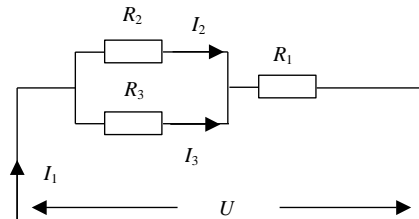


Рисунок 1.3 – Схема №2

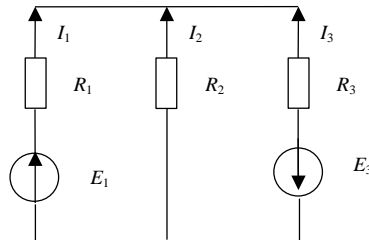


Рисунок 1.4 – Схема №3

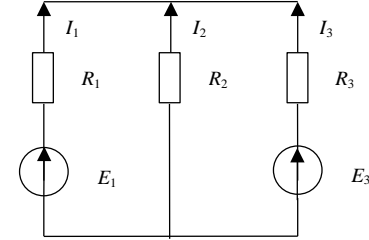


Рисунок 1.5 – Схема №4

Таблица 1.3 – Исходные данные

| Вариант №1. $P_{\text{НОМ}} = 350 \text{ МВт}$ | | Вариант №2. $P_{\text{НОМ}} = 250 \text{ МВт}$ | |
|--|-----------|--|-----------|
| Часы | P , МВт | Часы | P , МВт |
| 1-2 | 154 | 1-2 | 87 |
| 3-4 | 136 | 3-4 | 82 |
| 5-6 | 174 | 5-6 | 103 |
| 7-8 | 205 | 7-8 | 127 |
| 9-10 | 275 | 9-10 | 134 |
| 11-12 | 190 | 11-12 | 115 |
| 13-14 | 254 | 13-14 | 140 |
| 15-16 | 269 | 15-16 | 143 |
| 17-18 | 210 | 17-18 | 124 |
| 19-20 | 173 | 19-20 | 109 |
| 21-22 | 157 | 21-22 | 93 |
| 23-24 | 148 | 23-24 | 89 |

I. МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ДЛЯ РАСЧЕТА ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

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 двух составляющих: вынужденной и свободной. 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 – $i_{пр}$. 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 – $i_{ат}$.

$$i = i_{пр} + i_{ат}.$$

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 $t = 0,01$ с.

$$i_{уд} = \sqrt{2} \cdot k_{уд} \cdot I_{п0}.$$

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 и на рисунке 1.

Таблица 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 | | 1,80 |
| На стороне до 1000 В трансформаторов мощностью: | 1600, 2500 кВА | 1,40 |
| | 630, 1000 кВА | 1,30 |
| | 100, 250, 400 кВА | 1,20 |
| Удаленные точки КЗ с учетом активного сопротивления | | По рис. 1 |

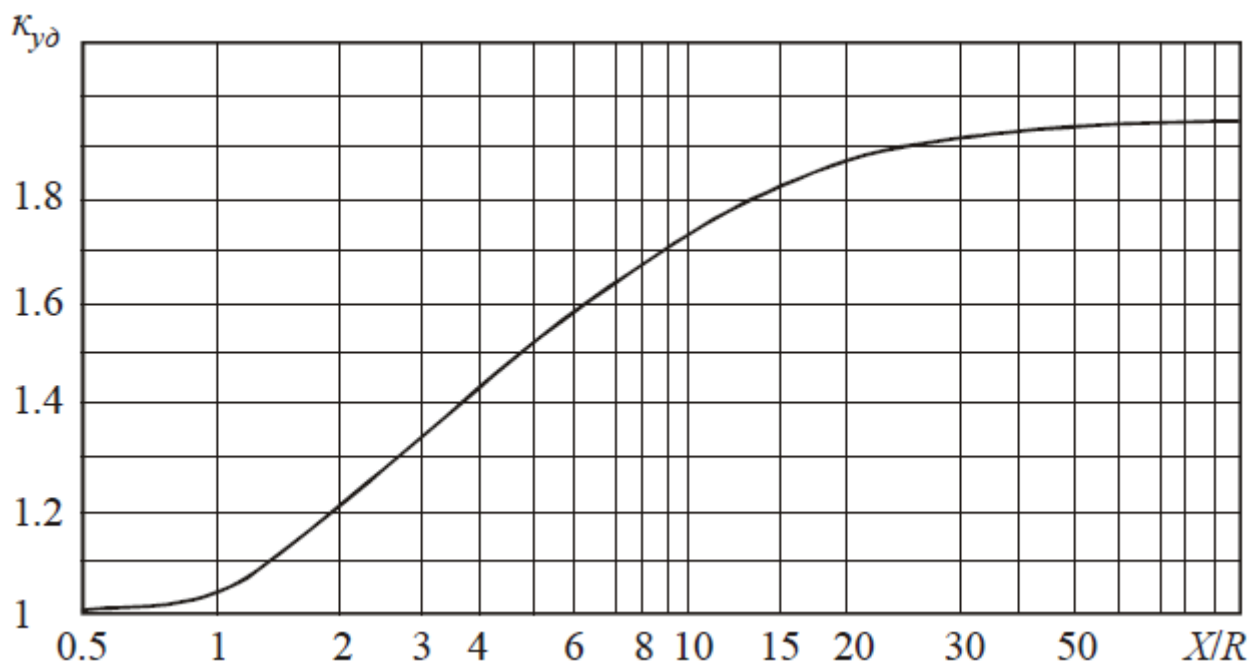


Рисунок 1 – Кривая для определения ударного коэффициента

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

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. 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_6 и мощностью S_6 .

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

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

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

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

в) однофазное КЗ, кА

$$I_{\text{кз}}^{(1)} = \frac{U_{\phi}}{\frac{Z_{\text{тр}}^{(1)}}{3} + Z_{\phi-0}},$$

где U_{ϕ} – фазное напряжение в точке КЗ, кВ; $Z_{\phi-0}$ – полное сопротивление петли «фаза нуль» до точки КЗ, Ом; $Z_{\text{тр}}^{(1)}$ – полное сопротивление трансформатора при однофазном КЗ, Ом.

Величина $Z_{\text{тр}}^{(1)}$ сильно зависит от схемы соединения его обмоток. При схемах соединений $\Delta / Y_{\text{н}}$ и $Y / Z_{\text{н}}$ величина $Z_{\text{тр}}^{(1)} / 3$ равна сопротивлению трансформатора при трех- или двухфазном КЗ и определяется по выражению:

$$Z_{\text{тр}}^{(1)} = \frac{u_{\text{кз}} \cdot U_{\text{ном}}^2}{100 \cdot S_{\text{ном}}}.$$

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

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

При соединении $Y / Y_{\text{н}} - Z_{\text{тр}}^{(1)} \neq 3 \cdot Z_{\text{тр}}$. Определенная экспериментальным путем величина $Z_{\text{тр}}^{(1)}$ приведена в таблице 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 $S_{\text{ном тр}} = 25...2500$ 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:

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

а активное и индуктивное – по соотношениям:

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

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 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:

$$R = r_0 \cdot L \text{ и } X = x_0 \cdot L,$$

где r_0 x_0 , – удельные активное и индуктивное сопротивления, Ом/м; L – протяженность линии, м.

В таблице 3 приведены сопротивления шинопроводов, в таблице 5 – сопротивления проводов и кабелей. Для неизолированных проводов удельное активное сопротивление дано в таблице 6, реактивное в таблице 11. При отсутствии данных x_0 принимается в соответствии с таблицей 7.

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

Сопротивления токопровода (шин) от трансформатора к автоматическому выключателю ориентировочно принимаются равными:

$$R_{ш} = 0,5 \text{ мОм} \text{ и } X_{ш} = 2,25 \text{ мОм}.$$

Значения переходного сопротивления контактов для различных ступеней электроснабжения даны в таблице 4, а неподвижных контактных соединений – в таблице 8.

Сопротивления первичных обмоток трансформаторов тока $R_{т.т}$ и $X_{т.т}$ приведены в таблице 9, а сопротивления токовых катушек расцепителей автоматических выключателей R_a и X_a и переходные сопротивления контактов R_k отключающих аппаратов – в таблице 10.

Таблица 2 – Сопротивления понижающих трансформаторов мощностью до 1600 кВА, 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 | 52,0 | 102,0 | 114,0 | 1237 |
| 100 | 10 | Y/Y _H | 1,97 | 4,5 | 31,5 | 64,7 | 72,0 | 779 |
| 160 | 10 | Y/Y _H | 2,65 | 4,5 | 16,6 | 41,7 | 45,0 | 487 |
| 250 | 10 | Y/Y _H | 3,70 | 4,5 | 9,4 | 27,2 | 28,7 | 312 |
| 400 | 10 | Y/Y _H | 5,50 | 4,5 | 5,5 | 17,1 | 18,0 | 195 |
| 630 | 10 | Y/Y _H | 7,60 | 5,5 | 3,1 | 13,6 | 14,0 | 129 |
| 1000 | 10 | Y/Y _H | 12,20 | 5,5 | 2,0 | 8,5 | 8,8 | 81 |
| 1600 | 10 | Y/Y _H | 18,00 | 5,5 | 1,0 | 5,4 | 5,4 | 54 |

Таблица 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 | 0,60 | 0,034 | 0,030 | 0,42 | 0,30 | 0,20 |
| $x_{0(\phi-0)}$, мОм/м | 0,053 | 0,60 | 0,075 | 0,044 | 0,42 | 0,24 | 0,26 |
| $z_{0(\phi-0)}$, мОм/м | 0,086 | 0,87 | 0,082 | 0,053 | 0,59 | 0,38 | 0,33 |

Таблица 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 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 | 12,500 | 7,400 | 0,358 | 0,1040 | 0,116 | — |
| 4 | 7,810 | 4,630 | 0,343 | 0,0950 | 0,107 | — |
| 6 | 5,210 | 3,090 | 0,330 | 0,0900 | 0,100 | — |
| 10 | 3,12 0 | 1,840 | 0,307 | 0,0730 | 0,099 | — |
| 16 | 1,95 0 | 1,160 | 0,293 | 0,0675 | 0,095 | 0,354 |
| 25 | 1,25 0 | 0,740 | 0,278 | 0,0662 | 0,091 | 0,339 |
| 35 | 0,894 | 0,530 | 0,268 | 0,0637 | 0,088 | 0,330 |
| 50 | 0,625 | 0,370 | 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 | 0,210 | 0,0596 | 0,079 | — |
| 185 | 0,169 | 0,100 | 0,210 | 0,0596 | 0,078 | — |
| 240 | 0,130 | 0,077 | 0,200 | 0,0587 | 0,077 | — |

Таблица 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 | — | 18,500 | — | — | — | — |
| 1,5 | — | 12,500 | — | — | — | — |
| 2,5 | 12,500 | 7,400 | — | — | — | — |
| 4 | 7,810 | 4,630 | — | — | — | — |
| 6 | 5,210 | 3,090 | — | — | — | — |
| 10 | 3,120 | 1,840 | — | — | — | 3,060 |
| 16 | 1,950 | 1,160 | 1,980 | 2,060 | — | 1,840 |
| 25 | 1,250 | 0,740 | 1,280 | 1,310 | — | 1,200 |
| 35 | 0,894 | 0,530 | 0,920 | 0,850 | — | 0,740 |
| 50 | 0,625 | 0,370 | 0,640 | 0,650 | — | 0,540 |
| 70 | 0,447 | 0,265 | 0,460 | 0,460 | — | 0,390 |
| 95 | 0,329 | 0,195 | 0,340 | 0,370 | — | 0,280 |
| 120 | 0,261 | 0,154 | 0,270 | 0,270 | 0,280 | 0,200 |
| 150 | 0,208 | 0,124 | 0,210 | 0,210 | 0,210 | 0,158 |
| 185 | 0,169 | 0,100 | 0,185 | 0,170 | 0,170 | 0,103 |
| 240 | 0,130 | 0,077 | — | 0,132 | 0,132 | 0,078 |
| 300 | — | — | — | 0,107 | 0,107 | — |
| 400 | — | — | — | 0,080 | 0,080 | — |

Таблица 7 – Среднее значения погонных реактивных сопротивлений линий сети

| Характеристики линий | | x_0 , мОм |
|---|-----------------------------------|-------------|
| Кабельные линии | до 1000 В | 0,06 |
| | 6-10 кВ | 0,08 |
| Изолированные провода внутренней проводки | | 0,11 |
| Шинопроводы | | 0,15 |
| Воздушные линии | до 1000 В | 0,31 |
| | 6-10 кВ | 0,38 |
| | 35-220 кВ | 0,40 |
| | 500 кВ (с тремя проводами в фазе) | 0,29 |

Таблица 8 – Активные переходные сопротивления неподвижных контактных соединений

| Кабель | | Комплектный привод | |
|-----------------------|-------------|--------------------|-------------|
| S , мм ² | R_K , мОм | $I_{НОМ}$, А | R_K , мОм |
| 16 | 0,085 | Распределительный | |
| 25 | 0,064 | 250 | 0,0090 |
| 35 | 0,056 | 400 | 0,0060 |
| 50 | 0,043 | 630 | 0,0037 |
| 70 | 0,029 | Магистральный | |
| 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 9 – Средние значения сопротивлений первичных обмоток трансформаторов тока

| Коэффициент трансформации | Сопротивления, мОм, трансформаторов точности | | | |
|---------------------------|--|----------|----------|----------|
| | 1 | | 3 | |
| | $X_{ТТ}$ | $R_{ТТ}$ | $X_{ТТ}$ | $R_{ТТ}$ |
| 20/5 | 67,00 | 42,00 | 17,00 | 19,00 |
| 30/5 | 30,00 | 20,00 | 8,00 | 8,20 |
| 40/5 | 17,00 | 11,00 | 4,20 | 4,80 |
| 50/5 | 11,00 | 7,00 | 2,80 | 3,00 |
| 75/5 | 4,80 | 3,00 | 1,20 | 1,30 |
| 100/5 | 1,70 | 2,70 | 0,70 | 0,75 |
| 150/5 | 1,20 | 0,75 | 0,30 | 0,33 |
| 200/5 | 0,67 | 0,42 | 0,17 | 0,19 |
| 300/5 | 0,30 | 0,20 | 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 10 – Средние значения сопротивлений отключающих аппаратов

| Номинальный ток, А | Сопротивления расцепителей автоматических выключателей при 65°C, мОм | | Переходные сопротивления контактов, R_k , мОм | | |
|--------------------|--|-------|---|-------------|----------------|
| | R_a | X_a | Автоматических выключателей | 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 11 – Реактивное сопротивление неизолированных алюминиевых и сталеалюминиевых 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 |

2. 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.

2.1. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

При расчете токов КЗ в сетях выше 1000 В обязателен учет индуктивных сопротивлений элементов сети: электродвигателей, трансформаторов, реакторов, воздушных и кабельных линий, токопроводов.




Активное сопротивление учитывается для воздушных ЛЭП с малым сечением проводов и со стальными проводами, а также для кабельных линий большой протяженности с малым сечением жил. Целесообразно учитывать активное сопротивление, если $r_{\Sigma} \geq x_{\Sigma}/3$, где r_{Σ} , x_{Σ} – суммарные активное и реактивное сопротивления сети от источника питания до места КЗ.

Активное сопротивление трансформаторов также необходимо учитывать в расчетах токов КЗ, если $r_{тр} \geq 0,3 \cdot x_{тр}$. Кроме этого, на сопротивление влияет изменение числа витков обмоток устройствами регулирования напряжения. Учесть действительное положение ответвлений каждого трансформатора в распределительных сетях практически невозможно, поскольку их положение изменяется в зависимости от значения нагрузки, схемы и режима работы сети. Поэтому при расчетах принимается, что все трансформаторы включены на основное ответвление, соответствующее их номинальному напряжению.


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 $S_б$.

Расчетные формулы для моделирования элементов системы электроснабжения приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Расчетные формулы для определения сопротивлений

| Элемент ЭУ, его схема и исходный параметр | Схема замещения | Расчетные формулы | |
|--|---|--|--|
| | | Именованные единицы, Ом | Относительные единицы, о.е. |
| Генератор $X_d, \%$ |  | $x = \frac{X_d \%}{100} \cdot \frac{U_{ном}^2}{S_{ном}}$ | $x = \frac{X_d \%}{100} \cdot \frac{S_б}{S_{ном}}$ |
| Энергосистема $I_{откл.ном}$ $S_{кз сист}$ $x_{сист}$ |  | $x = \frac{U_{ср.ном}}{\sqrt{3} \cdot I_{откл.ном}}$ или $x = \frac{U_{ном}^2}{S_{кз сист}}$ | $x = \frac{S_б}{\sqrt{3} \cdot I_{откл.ном} \cdot U_{ср.ном}}$ или $x = \frac{S_б}{S_{кз сист}}$ |
| Двухобмоточный трансформатор $u_{кз}, \%$ |  | $x = \frac{u_{кз} \%}{100} \cdot \frac{U_{ср.ном}^2}{S_{ном.тр}}$ | $x = \frac{u_{кз} \%}{100} \cdot \frac{S_б}{S_{ном.тр}}$ |

Продолжение таблицы 2.1

| Реактор x_p , Ом | | $x = x_p \cdot \frac{U_{\text{ном}}^2}{U_{\text{ср}}^2}$ | $x = x_p \cdot \frac{S_{\text{ном}}^2}{U_{\text{ср}}^2}$ |
|-----------------------|---|--|--|
| Линия |  | $x = x_0 \cdot l$ $r = r_0 \cdot l$ | $x = x_0 \cdot l \cdot \frac{S_6}{U_{\text{ср.ном}}^2}$ $r = r_0 \cdot l \cdot \frac{S_6}{U_{\text{ср.ном}}^2}$ |

$S_{\text{ном}}$ – номинальные мощности элементов, МВА;

S_6 – базовая мощность, МВА;

$S_{\text{кз сист}}$ – мощность КЗ энергосистемы, МВА;

$I_{\text{откл.ном}}$ – номинальный ток отключения выключателя, кА;

$u_{\text{кз}}$ – напряжение КЗ трансформатора, %;

x_p – сопротивление реактора, Ом;

r_0, x_0 – активное и индуктивное сопротивления линии на 1 км длины;

l – длина линии, км;

X_d – сверхпереходное индуктивное сопротивление генератора;

$U_{\text{ср}}$ – среднее напряжение в месте установки данного элемента, кВ.

2.2. ПРИМЕР РАСЧЕТА

Для схемы электроснабжения цеховой подстанции (рисунок 2.1) требуется составить схему замещения для расчета токов КЗ; 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».

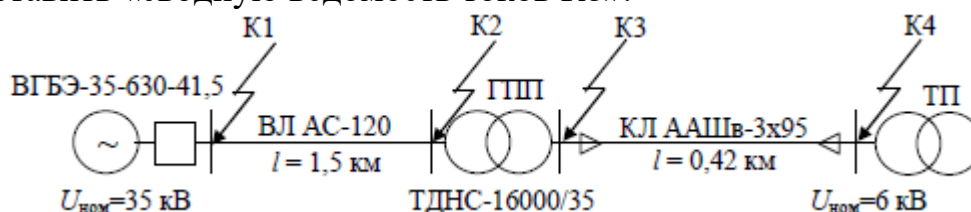


Рисунок 2.1 – Расчетная схема распределительной сети

Определение сопротивлений

На подстанции энергосистемы установлен выключатель высокого напряжения ВГБЭ-35-630-41,5 с номинальным током отключения КЗ $I_{\text{откл.ном}} = 41,5$ кА.

Принимаем $U_{\text{ср.ном}} = 37$ кВ.

Определяем мощность КЗ системы:

$$S = \sqrt{3} \cdot U_{\text{ср.ном}} \cdot I_{\text{откл.ном}} = \sqrt{3} \cdot 37 \cdot 41,5 = 2660 \text{ МВА.}$$

Расчет ведем в относительных единицах. Производим расчёт сопротивлений сети, принимая базисную мощность $S_6 = 100$ МВА.

1. Сопротивление энергосистемы:

$$x_{\text{сист}} = \frac{S_{\text{б}}}{S_{\text{кз сист}}} = \frac{100}{2660} = 0,038 \text{ о.е.}$$

2. Сопротивление воздушной линии 35 кВ:

$$r_{\text{вл}} = r_0 \cdot l \cdot \frac{S_{\text{б}}}{U_{\text{ср.ном}}^2} = 0,27 \cdot 1,5 \cdot \frac{100}{37^2} = 0,03 \text{ о.е.}$$

$$x_{\text{вл}} = x_0 \cdot l \cdot \frac{S_{\text{б}}}{U_{\text{ср.ном}}^2} = 0,309 \cdot 1,5 \cdot \frac{100}{37^2} = 0,034 \text{ о.е.,}$$

где $l = 1,5$ км – длина воздушной линии; $U_{\text{ср.ном}}$ – базисное напряжение данной ступени трансформации, кВ; $r_0 = 0,27$ Ом/км – активное сопротивление провода АС-120 (таблица 6); $x_0 = 0,309$ Ом/км – индуктивное сопротивление провода АС-120 (таблица 12).

3. Сопротивление трансформатора ТДНС-16000/35 кВА:

$$x_{\text{тр}} = \frac{u_{\text{кз}} \%}{100} \cdot \frac{S_{\text{б}}}{S_{\text{ном.тр}}} = \frac{10,5}{100} \cdot \frac{100}{16} = 0,656 \text{ о.е.,}$$

где $S_{\text{ном.тр}} = 16$ МВА – номинальная мощность трансформатора; $u_{\text{кз}} = 10,5\%$ – напряжение короткого замыкания трансформатора;

Активным сопротивлением пренебрегаем, так как трансформатор большой мощности.

4. Сопротивление кабельной линии:

$$r_{\text{кл}} = r_0 \cdot l \cdot \frac{S_{\text{б}}}{U_{\text{ср.ном}}^2} = 0,329 \cdot 0,42 \cdot \frac{100}{6,3^2} = 0,348 \text{ о.е.}$$

$$x_{\text{кл}} = x_0 \cdot l \cdot \frac{S_{\text{б}}}{U_{\text{ср.ном}}^2} = 0,0602 \cdot 0,42 \cdot \frac{100}{6,3^2} = 0,064 \text{ о.е.,}$$

где $l = 0,42$ км – длина кабельной линии; $U_{\text{ср.ном}} = 6,3$ кВ – базисное напряжение данной ступени трансформации; $r_0 = 0,329$ Ом/км – активное сопротивление кабеля ААШв-(3х95) (таблица 6); $x_0 = 0,0602$ Ом/км – индуктивное сопротивление кабеля ААШв-(3х95) (таблица 5).

Составляем схему замещения – рисунок 2.2.

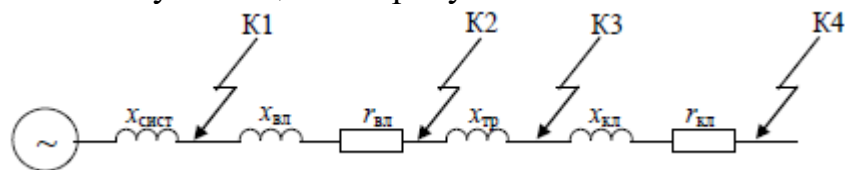


Рисунок 2.2 – Схема замещения участка распределительной сети

В сетях среднего напряжения (6-35 кВ) в России применяют изолированную нейтраль. Ток однофазного замыкания на землю в таких сетях невелик, его величина определяется емкостью линии (зависит от напряжения, длины и типа линии), и этот режим не является аварийным. Соответственно, рассчитывать токи однофазного КЗ в сетях среднего напряжения нет необходимости.

Ток двухфазного КЗ легко определяется по рассчитанному току трехфазного:

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

Ток трехфазного КЗ определяется по формуле:

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

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

При расчете в системе относительных единиц сначала находят базисный ток КЗ на рассматриваемой ступени трансформации:

$$I_6 = \frac{S_6}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ср.ном}}}, \text{ кА},$$

а затем определяют реальное значение периодической составляющей тока КЗ:

$$I_{\text{кз}}^{(3)} = \frac{I_6}{Z_{\text{рез}}}, \text{ кА}.$$

Будем определять токи трехфазного КЗ по намеченным точкам.

Точка К1:

$$I_6 = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 37} = 1,56 \text{ кА};$$

$$I_{\text{кз}}^{(3)} = \frac{1,56}{0,038} = 41,05 \text{ кА}.$$

$$Z_{\text{рез}} = x_{\text{сист}} = 0,038 \text{ о.е.}$$

$$i_{\text{уд}} = \sqrt{2} \cdot k_{\text{уд}} \cdot I_{\text{кз}}^{(3)} = \sqrt{2} \cdot 1,8 \cdot 41,05 = 104,50 \text{ кА},$$

где $k_{\text{уд}} = 1,8$ (по таблице 1).

Точка К2:

$$I_6 = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 37} = 1,56 \text{ кА};$$

$$I_{\text{кз}}^{(3)} = \frac{1,56}{0,078} = 20,00 \text{ кА}.$$

$$Z_{\text{рез}} = \sqrt{(x_{\text{сист}} + x_{\text{вл}})^2 + (r_{\text{вл}})^2} = \sqrt{(0,038 + 0,034)^2 + (0,030)^2} = 0,078 \text{ о.е.}$$

$$i_{\text{уд}} = \sqrt{2} \cdot k_{\text{уд}} \cdot I_{\text{кз}}^{(3)} = \sqrt{2} \cdot 1,25 \cdot 20,00 = 35,36 \text{ кА},$$

где $k_{\text{уд}} = 1,25$ при $X/R = 2,4$ (см. рисунок 1).

Точка К3:

$$I_6 = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 6,3} = 9,16 \text{ кА};$$

$$I_{\text{кз}}^{(3)} = \frac{1,56}{0,729} = 12,57 \text{ кА}.$$

$$Z_{рез} = \sqrt{(x_{сист} + x_{вл} + x_{тр})^2 + (r_{вл})^2} = \sqrt{(0,038 + 0,034 + 0,656)^2 + (0,030)^2} = 0,729 \text{ о.е.}$$

$$i_{уд} = \sqrt{2} \cdot k_{уд} \cdot I_{кз}^{(3)} = \sqrt{2} \cdot 1,9 \cdot 12,57 = 33,78 \text{ кА,}$$

где $k_{уд} = 1,9$ при $X/R = 24,3$ (см. рисунок 1).

Точка К4:

$$I_6 = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 6,3} = 9,16 \text{ кА;}$$

$$I_{кз}^{(3)} = \frac{1,56}{0,876} = 10,46 \text{ кА.}$$

$$Z_{рез} = \sqrt{(x_{сист} + x_{вл} + x_{тр} + x_{кл})^2 + (r_{вл} + r_{кл})^2} =$$

$$= \sqrt{(0,038 + 0,034 + 0,656 + 0,064)^2 + (0,030 + 0,348)^2} = 0,876 \text{ о.е.}$$

$$i_{уд} = \sqrt{2} \cdot k_{уд} \cdot I_{кз}^{(3)} = \sqrt{2} \cdot 1,22 \cdot 10,46 = 18,05 \text{ кА,}$$

где $k_{уд} = 1,22$ при $X/R = 2,1$ (см. рисунок 1).

Таблица 2.2 – Сводная ведомость токов КЗ

| Расчетные точки | | К1 | К2 | К3 | К4 |
|-----------------|----------------|--------|-------|-------|-------|
| ТКЗ, кА | $I_{кз}^{(3)}$ | 41,05 | 20,00 | 12,57 | 10,46 |
| | $i_{уд}$ | 104,50 | 35,36 | 33,78 | 18,05 |

2.3. ЗАДАНИЕ

Для схемы электрической сети выше 1000 В (рисунок 2.3) требуется составить схему замещения для расчета токов КЗ; 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». Кабельные линии к цеховой ТП и высоковольтному синхронному двигателю (СД) выполнены кабелями с бумажной поясной изоляцией. Среднее геометрическое расстояние между проводами воздушной линии электропередачи (ВЛ) принимаются любым, в соответствии с таблицей 11.

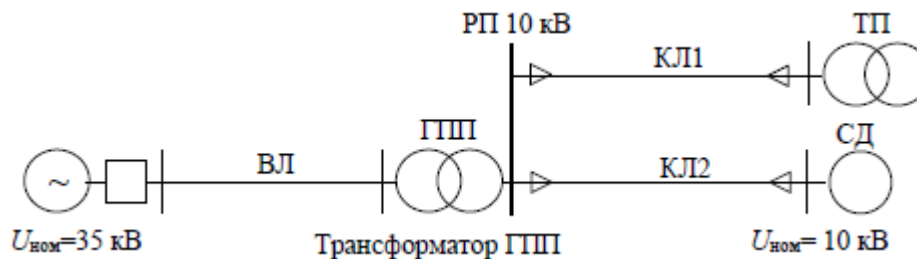


Рисунок 2.3 – Расчетная схема распределительной сети

Варианты заданий приведены в таблице 2.3. Вариант задания определяется преподавателем.

Таблица 2.3 – Варианты заданий

| № вар. | Система | ВЛ | | Трансформатор | | КЛ1 | | КЛ2 | |
|--------|----------------|-----------------------|----------|---------------|--------------|-----------------------|----------|-----------------------|----------|
| | $S_{кз}$, МВА | S , мм ² | l , км | S , МВА | $U_{кз}$, % | S , мм ² | l , км | S , мм ² | l , км |
| 1 | 5000 | АС-240 | 5,6 | 40 | 11,0 | 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 | 11,0 | 95 | 1,2 | 120 | 0,3 |
| 6 | 3000 | АС-120 | 4,1 | 32 | 11,0 | 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 | 11,0 | 120 | 2,2 | 95 | 1,1 |
| 10 | 3000 | АС-185 | 5,0 | 25 | 10,5 | 70 | 3,5 | 50 | 0,4 |

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.

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 аperiodической 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?

3. МОДЕЛИРОВАНИЕ СХЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ДЛЯ РАСЧЁТА ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ В СЕТИ ВЫШЕ 1000 В В СРЕДЕ ELECTRONICS WORKBENCH

Цель работы: овладение методикой математического моделирования и расчета токов КЗ в сетях выше 1000 В в системе схемотехнического моделирования *Electronics Workbench*.

3.1. 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 (рисунок 3.1). Для уменьшения погрешности измерений можно выставить величину внутреннего сопротивления амперметра в $1 \cdot 10^{-12}$ Ом (*Resistance* – 1 pΩ).

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:

$$L = \frac{x}{2\pi \cdot f},$$

где f – частота сети, Гц.

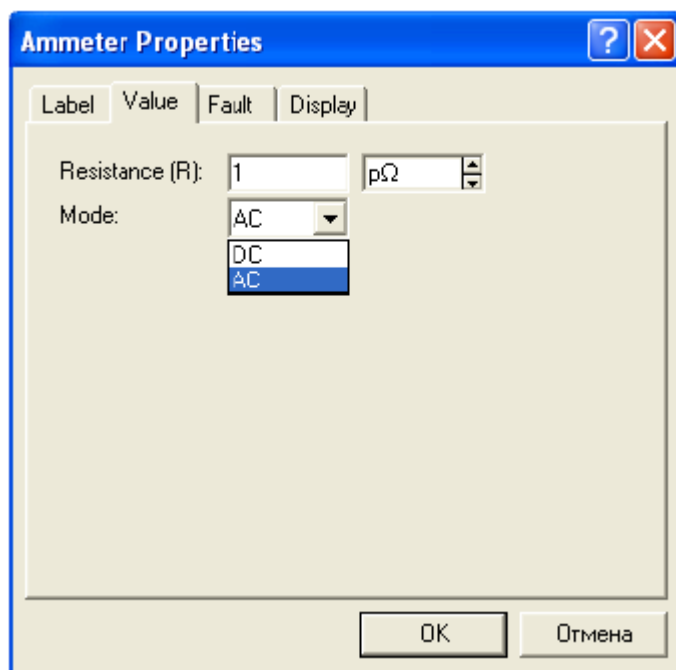


Рисунок 3.1 – Окно свойств амперметра в редакторе *Electronics Workbench*

3.2. ПРИМЕР РАСЧЕТА

Для схемы электроснабжения (лабораторная работа №2, рисунок 2.1) требуется составить схему замещения в редакторе *Electronics Workbench*; определить токи КЗ и составить «сводную ведомость токов КЗ».

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:

$$L = \frac{x_{\text{сист}}}{2\pi \cdot f} = \frac{0,515}{2\pi \cdot 50} = 1,639 \text{ мГн.}$$

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 (таблица 6); $x_0 = 0,309$ Ом/км – индуктивное сопротивление провода АС-120 (таблица 12).

Переходим к индуктивности:

$$L = \frac{x_{вл}}{2\pi \cdot f} = \frac{0,4635}{2\pi \cdot 50} = 1,476 \text{ мГн.}$$

3. Сопротивление трансформатора ТДНС-16000/35 кВА:

$$x = \frac{u_{кз} \%}{100} \cdot \frac{U_{ср.ном}^2}{S_{ном.тр}} = \frac{10,5}{100} \cdot \frac{37^2}{16} = 8,984 \text{ Ом;}$$

$$L = \frac{x_{тр}}{2\pi \cdot f} = \frac{8,984}{2\pi \cdot 50} = 28,61 \text{ мГн.}$$

где $S_{ном.тр} = 16$ МВА – номинальная мощность трансформатора; $u_{кз} = 10,5\%$ – напряжение короткого замыкания трансформатора;

Сопротивления трансформатора приведены к обмотке высшего напряжения.

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.

Для моделирования силового трансформатора при расчете токов КЗ в среде *Electronics Workbench* удобно использовать его линейную модель, окно свойств которой представлено на рисунке 3.2.

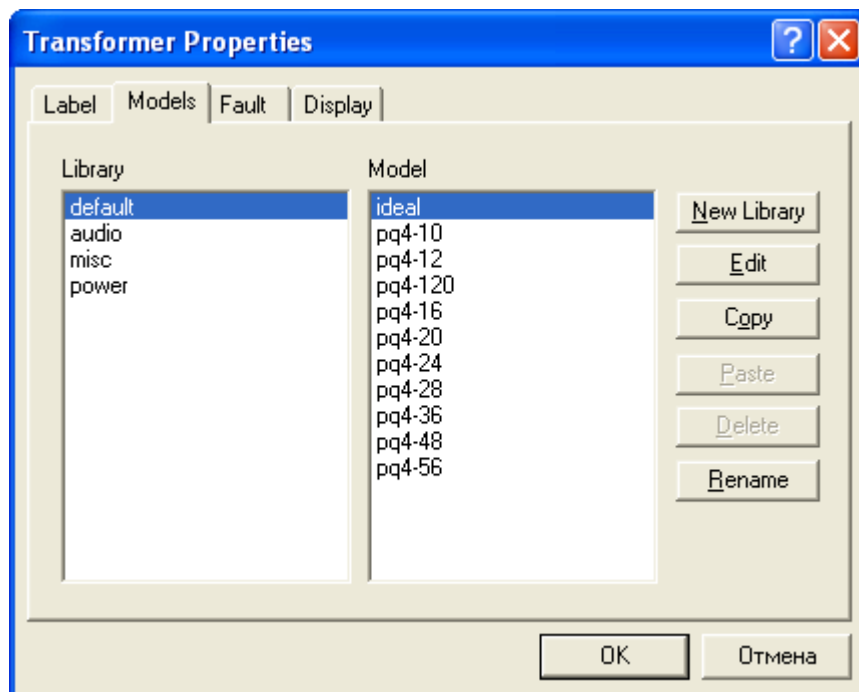


Рисунок 3.2 – Окно свойств линейного трансформатора в редакторе *Electronics Workbench*

Определим коэффициент трансформации трансформатора ГПП:

$$k = \frac{U_{\text{ср.ном.ВН}}}{U_{\text{ср.ном.НН}}} = \frac{37}{6,3} = 5,873.$$

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 (рисунок 3.3), в которое нужно ввести рассчитанный нами коэффициент трансформации (*primary-to-secondary turns ratio*) $k_{\text{тр}} = N = 5,873$. Остальные значения параметров трансформатора изменять нет необходимости.

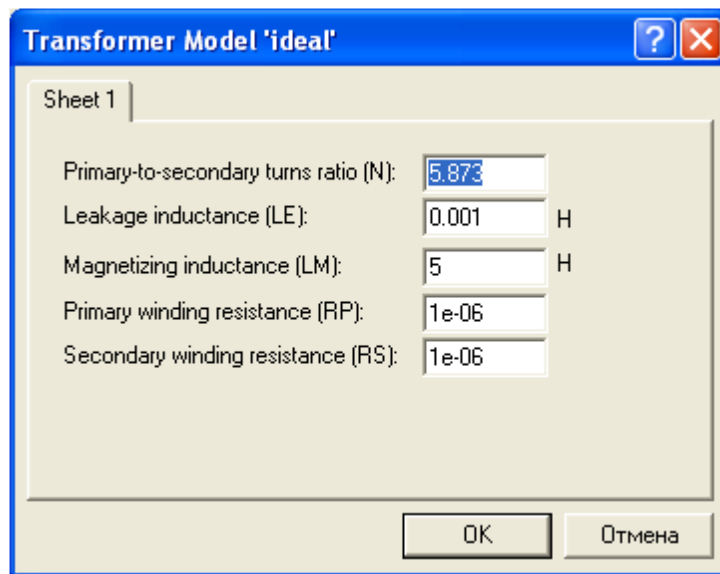


Рисунок 3.3 – Окно свойств идеального силового трансформатора в редакторе *Electronics Workbench*

4. Сопротивление кабельной линии 6,3 кВ:

$$r_{\text{кл}} = r_0 \cdot l = 0,329 \cdot 0,42 = 0,138 \text{ Ом};$$

$$x_{\text{вл}} = x_0 \cdot l = 0,0602 \cdot 0,42 = 0,0263 \text{ Ом},$$

где $l = 0,42$ км – длина кабельной линии; $r_0 = 0,329$ Ом/км – активное сопротивление кабеля ААШв–(3х95) (таблица 6); $x_0 = 0,0602$ Ом/км – индуктивное сопротивление кабеля ААШв–(3х95) (таблица 5).

Переходим к индуктивности:

$$L = \frac{x_{\text{вл}}}{2\pi \cdot f} = \frac{0,0263}{2\pi \cdot 50} = 0,081 \text{ мГн}.$$

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 – $K_3 = 0,7$.

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

откуда $R_{\text{H}} = 3,21 \text{ Ом}$.

Математическая модель схемы электроснабжения для расчета токов КЗ в среде *Electronics Workbench* представлена на рисунке 3.4.

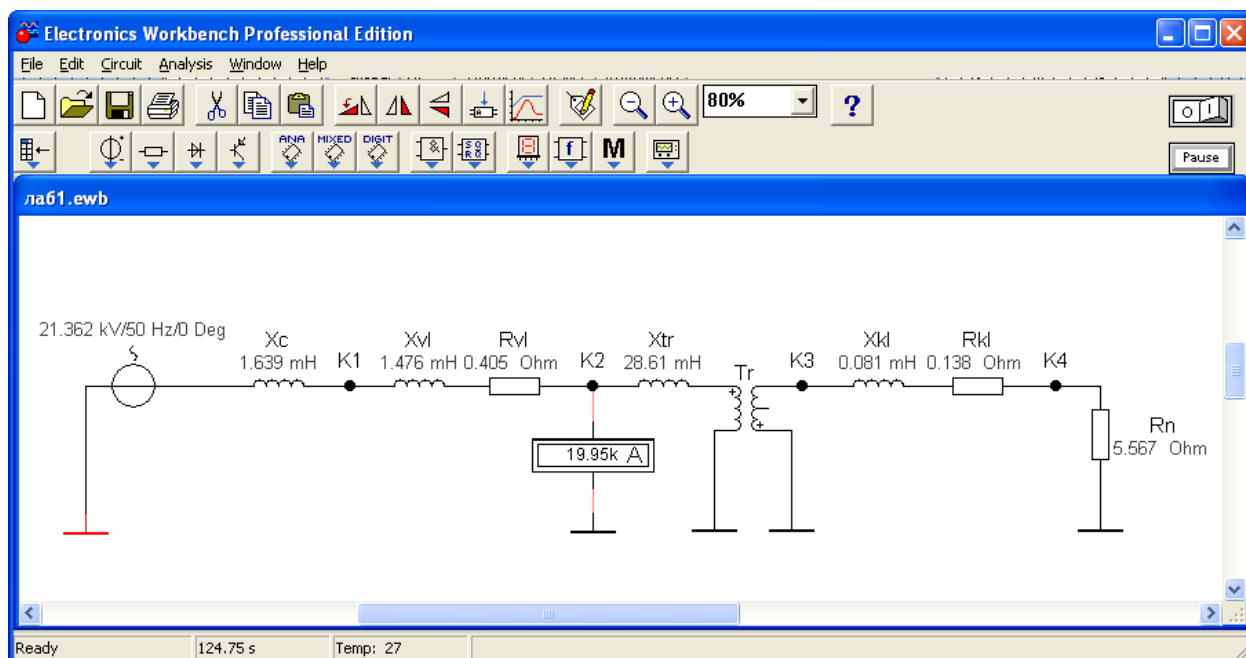


Рисунок 3.4 – Математическая модель схемы электроснабжения для расчета токов КЗ в среде *Electronics Workbench*

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, представленной в лабораторной работе №2, данная модель позволяет не только определить установившиеся значения токов КЗ в намеченных точках, но и 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 рисунке 3.5, экран осциллографа с кривой тока КЗ в расчетной точке К4 на рисунке 3.6.

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 рисунке 3.6 красная и синие линии), легко определить величину мгновенного значения напряжения на шунтирующем резисторе в произвольный момент времени, а затем определить и величину тока.

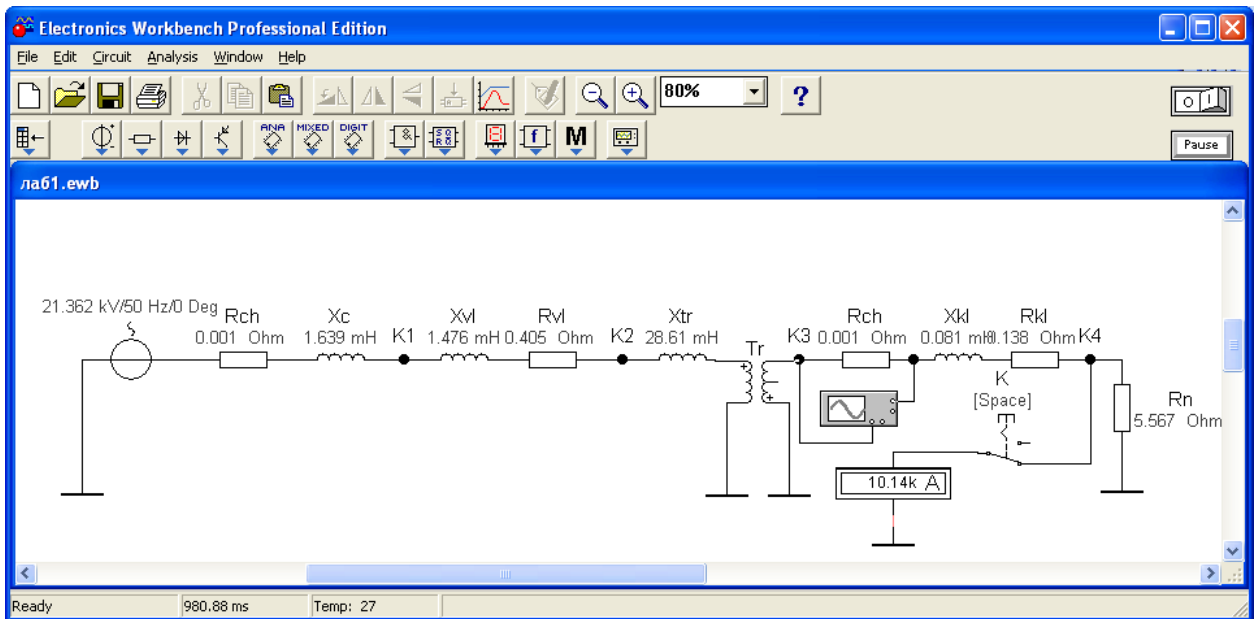


Рисунок 3.5 – Математическая модель схемы электроснабжения для исследования переходных процессов КЗ

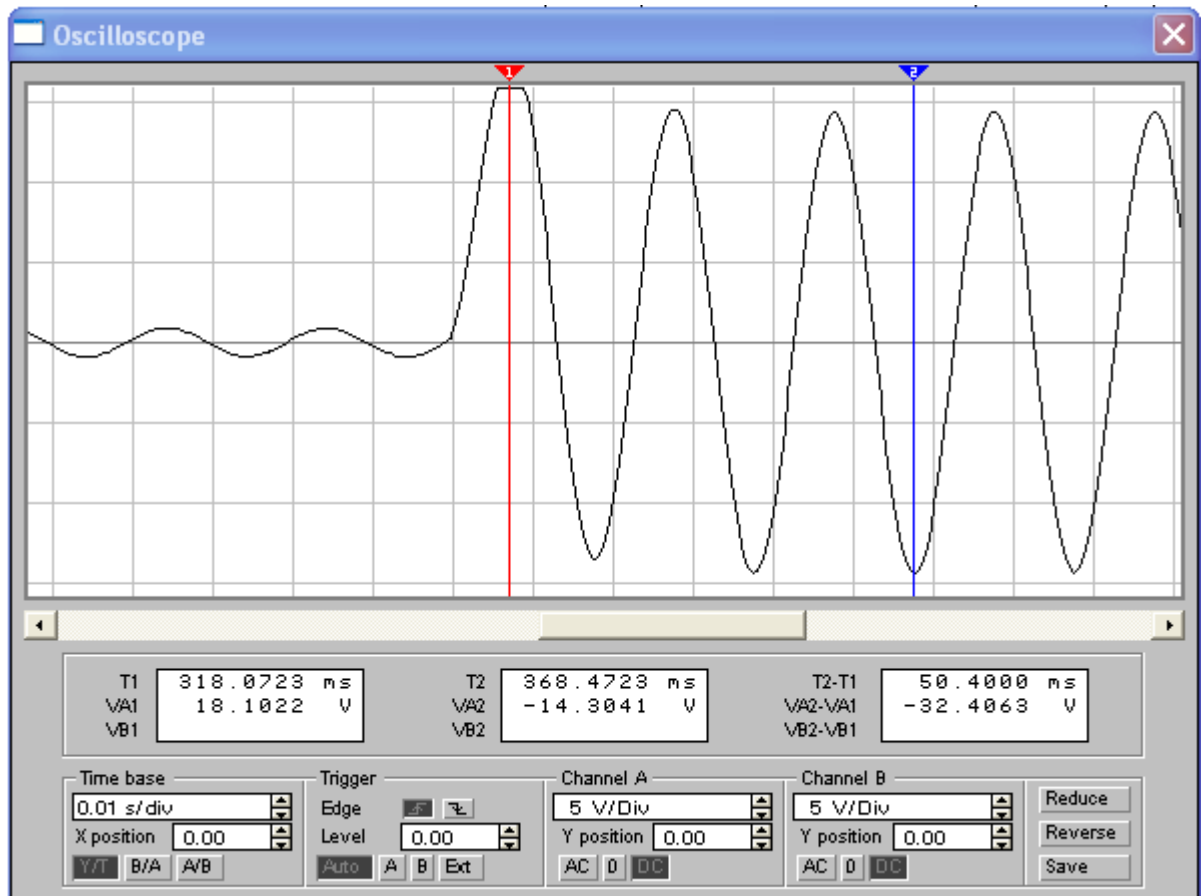


Рисунок 3.6 – Кривая изменения тока в точке К4 во время переходного процесса КЗ

3.3. ЗАДАНИЕ

Для схемы электрической сети выше 1000 В (рисунок 2.3) 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 в лабораторной работе №2.

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 схемы замещения.
4. Результаты расчетов токов КЗ.
5. Сводную ведомость расчета токов КЗ.
6. Выводы.

3.5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

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

4. 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.

4.1. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

В большинстве практических случаев 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:

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 «Теоретических сведениях» настоящего практикума).

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

$$r_d = \frac{1000 \cdot l_d}{I_d},$$

где I_d – ток, проходящий через дугу (принимается ток, определенный без учета сопротивления дуги при КЗ в том же месте); l_d – 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. $U_{\text{ср. ном}}$).

4.2. ПРИМЕР РАСЧЕТА

Для схемы электроснабжения цеховой сети (рисунок 4.1) 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.

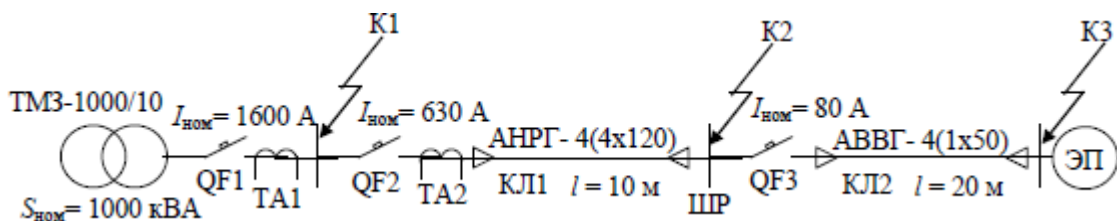


Рисунок 4.1 – Расчетная схема распределительной сети

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 (таблица 2):

$$R_{тр} = 2,0 \text{ мОм}; \quad X_{тр} = 8,5 \text{ мОм}.$$

2. Сопротивления автоматического выключателя QF1 (таблица 10):

$$R_{QF1} = 0,08 \text{ мОм}; \quad X_{QF1} = 0,08 \text{ мОм}; \quad R_{кQF1} = 0,1 \text{ мОм}.$$

3. Сопротивления автоматического выключателя QF2 (таблица 10):

$$R_{QF2} = 0,12 \text{ мОм}; \quad X_{QF2} = 0,13 \text{ мОм}; \quad R_{кQF2} = 0,25 \text{ мОм}.$$

4. Сопротивления первичной обмотки трансформатора тока ТА2 (таблица 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 с учетом 4 параллельно проложенных кабелей (удельные сопротивления из таблицы 5):

$$R_{КЛ1} = \frac{r_0 \cdot l}{n} = \frac{0,261 \cdot 10}{4} = 0,653 \text{ мОм};$$

$$X_{КЛ1} = \frac{x_0 \cdot l}{n} = \frac{0,080 \cdot 10}{4} = 0,200 \text{ мОм},$$

6. Сопротивления автоматического выключателя QF3 (таблица 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 таблицы 5):

$$R_{КЛ2} = r_0 \cdot l = 0,625 \cdot 20 = 12,5 \text{ мОм};$$

$$X_{КЛ2} = x_0 \cdot l = 0,085 \cdot 20 = 1,7 \text{ мОм},$$

8. Переходные сопротивления ступеней распределения (таблица 4):

$$R_{рунн} = 15 \text{ мОм}; \quad R_{шп} = 25 \text{ мОм}.$$

9. Активные переходные сопротивления неподвижных контактных соединений (таблица 8):

$$R_{кКЛ2} = 0,024 \text{ мОм}; \quad R_{кКЛ1} = 0,043 \text{ мОм}.$$

Схема замещения цеховой сети для расчета токов трехфазного и двухфазного КЗ представлена на рисунке 4.2.

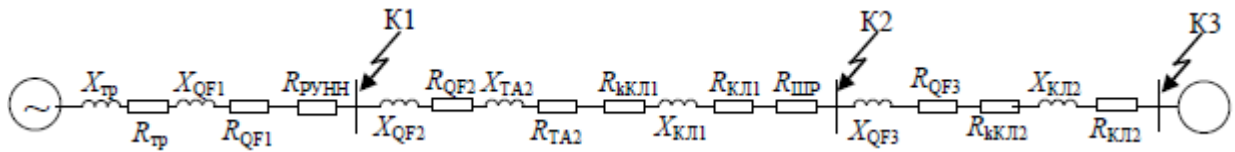


Рисунок 4.2 – Схема замещения цеховой сети

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

$$R_1 = R_{тр} + R_{QF1} + R_{РУНН} = 2 + 0,08 + 15 = 17,08 \text{ мОм};$$

$$X_1 = X_{тр} + X_{QF1} = 8,5 + 0,08 = 8,58 \text{ мОм};$$

$$R_2 = R_{QF2} + R_{ТА2} + R_{КЛ1} + R_{КЛ1} + R_{ШП} = 0,12 + 0,07 + 0,024 + 0,653 + 25 = 25,877 \text{ мОм};$$

$$X_2 = X_{QF2} + X_{ТА2} + X_{КЛ1} = 0,13 + 0,05 + 0,2 = 0,38 \text{ мОм};$$

$$R_3 = R_{QF3} + R_{КЛ2} + R_{КЛ2} = 2,4 + 0,043 + 12,5 = 14,943 \text{ мОм};$$

$$X_3 = X_{QF3} + X_{КЛ2} = 2,0 + 1,7 = 3,7 \text{ мОм}.$$

Упрощенная схема замещения представлена на рисунке 4.3.

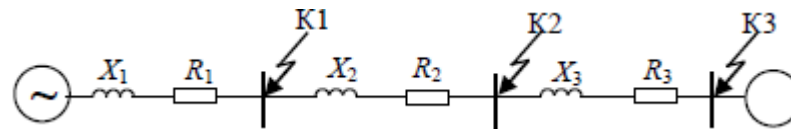


Рисунок 4.3 – Упрощенная схема замещения цеховой сети

Расчет трехфазных и двухфазных токов КЗ

Ток трехфазного КЗ определяется по формуле:

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

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

Точка К1:

$$Z_{рез} = \sqrt{R_1^2 + X_1^2} = \sqrt{17,08^2 + 8,58^2} = 19,11 \text{ мОм}.$$

Периодическая составляющая тока трехфазного КЗ:

$$I_{кз}^{(3)} = \frac{400}{\sqrt{3} \cdot 19,11} = 12,08 \text{ кА}.$$

Ударный ток КЗ:

$$i_{уд} = \sqrt{2} \cdot k_{уд} \cdot I_{кз}^{(3)} = \sqrt{2} \cdot 1,0 \cdot 12,08 = 17,08 \text{ кА},$$

где $k_{уд} = 1,0$ при $X_1/R_1 = 0,5$ (см. рисунок 1).

Ток двухфазного КЗ:

$$I_{кз}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{кз}^{(3)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 12,08 = 10,46 \text{ кА}.$$

Точка К2:

$$Z_{\text{рез}} = \sqrt{(R_1 + R_2)^2 + (X_1 + X_2)^2} = \sqrt{(17,08 + 25,877)^2 + (8,58 + 0,38)^2} = 43,88 \text{ мОм.}$$

Периодическая составляющая тока трехфазного КЗ:

$$I_{\text{кз}}^{(3)} = \frac{400}{\sqrt{3} \cdot 43,88} = 5,26 \text{ кА.}$$

Ударный ток КЗ:

$$i_{\text{уд}} = \sqrt{2} \cdot k_{\text{уд}} \cdot I_{\text{кз}}^{(3)} = \sqrt{2} \cdot 1,0 \cdot 5,26 = 7,44 \text{ кА,}$$

где $k_{\text{уд}} = 1,0$ при $X_1/R_1 = 0,2$ (см. рисунок 1).

Ток двухфазного КЗ:

$$I_{\text{кз}}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{\text{кз}}^{(3)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 5,26 = 4,56 \text{ кА.}$$

Точка К3:

$$\begin{aligned} Z_{\text{рез}} &= \sqrt{(R_1 + R_2 + R_3)^2 + (X_1 + X_2 + X_3)^2} = \\ &= \sqrt{(17,08 + 25,877 + 14,943)^2 + (8,58 + 0,38 + 3,7)^2} = 59,27 \text{ мОм.} \end{aligned}$$

Периодическая составляющая тока трехфазного КЗ:

$$I_{\text{кз}}^{(3)} = \frac{400}{\sqrt{3} \cdot 59,27} = 3,90 \text{ кА.}$$

Ударный ток КЗ:

$$i_{\text{уд}} = \sqrt{2} \cdot k_{\text{уд}} \cdot I_{\text{кз}}^{(3)} = \sqrt{2} \cdot 1,0 \cdot 3,90 = 5,52 \text{ кА,}$$

где $k_{\text{уд}} = 1,0$ при $X_1/R_1 = 0,2$ (см. рисунок 1).

Ток двухфазного КЗ:

$$I_{\text{кз}}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{\text{кз}}^{(3)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 3,90 = 3,38 \text{ кА.}$$

Расчет однофазных КЗ

Определим сопротивления и составим схему замещения для расчета токов однофазного КЗ

Сопротивления трансформатора по таблице 2:

$$Z_{\text{тр}} = 81 \text{ мОм.}$$

К схеме замещения, изображенной на рисунке 4.2, нужно добавить сопротивления нулевых проводников.

Сопротивления нулевой жилы кабельных линий КЛ1 и КЛ2 (удельные сопротивления из таблицы 5):

$$R_{0\text{-КЛ1}} = \frac{r_0 \cdot l}{n} = \frac{0,261 \cdot 10}{4} = 0,653 \text{ мОм;}$$

$$R_{0\text{-КЛ2}} = r_0 \cdot l = 0,625 \cdot 20 = 12,5 \text{ мОм;}$$

Кроме этого изменятся индуктивные сопротивления кабельных линий:

$$X_{0-КЛ1} = \frac{x_0 \cdot l}{n} = \frac{0,4 \cdot 10}{4} = 1 \text{ Ом};$$

$$X_{0-КЛ2} = x_0 \cdot l = 0,15 \cdot 20 = 3 \text{ Ом};$$

Значения удельных индуктивных сопротивлений определены по рекомендациям, приведенным в п. 4.1.

Схема замещения цеховой сети для расчета токов однофазного КЗ представлена на рисунке 4.4.

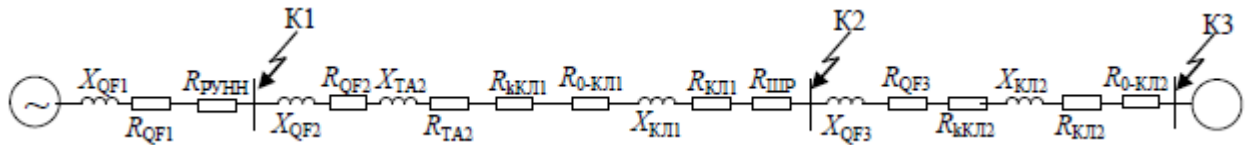


Рисунок 4.4 – Схема замещения цеховой сети для расчета однофазных КЗ

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

$$R_1 = R_{QF1} + R_{РУНН} = 0,08 + 15 = 15,08 \text{ мОм};$$

$$X_1 = X_{QF1} = 0,08 \text{ мОм};$$

$$R_2 = R_{QF2} + R_{TA2} + R_{ККЛ1} + R_{КЛ1} + R_{ШП} + R_{0-КЛ1} =$$

$$= 0,12 + 0,07 + 0,024 + 0,653 + 25 + 0,653 = 26,53 \text{ мОм};$$

$$X_2 = X_{QF2} + X_{TA2} + X_{КЛ1} = 0,13 + 0,05 + 0,2 = 0,38 \text{ мОм};$$

$$R_3 = R_{QF3} + R_{ККЛ2} + R_{КЛ2} + R_{0-КЛ2} = 2,4 + 0,043 + 12,5 + 12,5 = 27,443 \text{ мОм};$$

$$X_3 = X_{QF3} + X_{КЛ2} = 2,0 + 1,7 = 3,7 \text{ мОм}.$$

Упрощенная схема замещения цеховой сети для расчета токов однофазных КЗ не изменится (рисунок 4.3), однако значения сопротивлений будут другими.

Ток однофазного КЗ определяется по формуле:

$$I_{КЗ}^{(1)} = \frac{U_{\phi}}{\frac{Z_{тр}^{(1)}}{3} + Z_{\phi-0}},$$

где U_{ϕ} – фазное напряжение в точке КЗ, кВ; $Z_{\phi-0}$ – полное сопротивление петли «фаза нуль» до точки КЗ, Ом; $Z_{тр}^{(1)}$ – полное сопротивление трансформатора при однофазном КЗ, Ом.

Точка К1:

$$Z_{\phi-0} = \sqrt{R_1^2 + X_1^2} = \sqrt{15,08^2 + 0,08^2} = 15,08 \text{ мОм}.$$

$$I_{КЗ}^{(1)} = \frac{230}{\frac{81}{3} + 15,08} = 5,47 \text{ кА}.$$

Точка К2:

$$Z_{\phi-0} = \sqrt{(R_1 + R_2)^2 + (X_1 + X_2)^2} = \sqrt{(15,08 + 26,53)^2 + (0,08 + 0,38)^2} = 41,61 \text{ мОм}.$$

$$I_{\text{кз}}^{(1)} = \frac{230}{\frac{81}{3} + 41,61} = 3,35 \text{ кА.}$$

Точка К3:

$$Z_{\text{рез}} = \sqrt{(R_1 + R_2 + R_3)^2 + (X_1 + X_2 + X_3)^2} = \\ = \sqrt{(15,08 + 26,53 + 27,443)^2 + (0,08 + 0,38 + 3,7)^2} = 69,18 \text{ мОм.}$$

$$I_{\text{кз}}^{(1)} = \frac{230}{\frac{81}{3} + 42,56} = 2,39 \text{ кА.}$$

Таблица 4.1 – Сводная ведомость токов КЗ

| Расчетные точки | | К1 | К2 | К3 |
|-----------------|-----------------------|-------|------|------|
| ТКЗ, кА | $I_{\text{кз}}^{(1)}$ | 5,47 | 3,35 | 2,39 |
| | $I_{\text{кз}}^{(2)}$ | 10,46 | 4,56 | 3,38 |
| | $I_{\text{кз}}^{(3)}$ | 12,08 | 5,26 | 3,90 |
| | $i_{\text{уд}}$ | 17,08 | 7,44 | 5,52 |

4.3. ЗАДАНИЕ

Для схемы цеховой сети до 1000 В (рис. 1.15) 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.

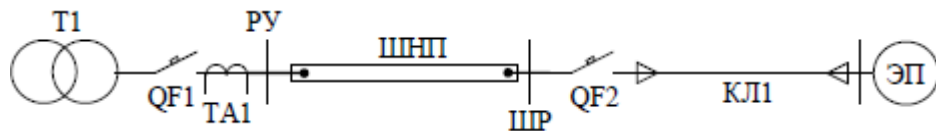


Рисунок 4.5 – Схема электроснабжения цеховой сети

Варианты заданий приведены в таблице 4.2. Вариант задания определяется преподавателем.

Таблица 4.2 – Варианты заданий

| № вар. | Т1 | 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 |
| 1 | 1600 | 2500 | 2500 | 30 | 250 | 120 | 10 |
| 2 | 1000 | 1600 | 1600 | 25 | 200 | 95 | 15 |
| 3 | 630 | 1000 | 1250 | 20 | 160 | 70 | 5 |
| 4 | 400 | 630 | 630 | 15 | 125 | 50 | 10 |
| 5 | 250 | 400 | 400 | 10 | 100 | 35 | 15 |
| 6 | 1600 | 2500 | 3200 | 10 | 80 | 25 | 20 |

Продолжение таблицы 4.2

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

4.4. 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

4.5. 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?

5. 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*.

5.1. ПРИМЕР МОДЕЛИРОВАНИЯ

Для схемы электроснабжения (лабораторная работа №4, рисунок 4.1) 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 (рисунок 4.3). 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 – $K_3 = 0,7$.

$$P_{\text{ф.тр}} = K_3 \cdot S_{\text{тр.ф.ном}} = \frac{U_{\text{ф.ном}}^2}{R_{\text{н}}},$$

откуда $R_{\text{н}} = 0,21 \text{ Ом}$.

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 (рисунок 5.1).

Математическая модель схемы электроснабжения для расчета токов трехфазных и двухфазных КЗ в среде *Electronics Workbench* представлена на рисунке 5.2.

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 (рисунок 5.3).

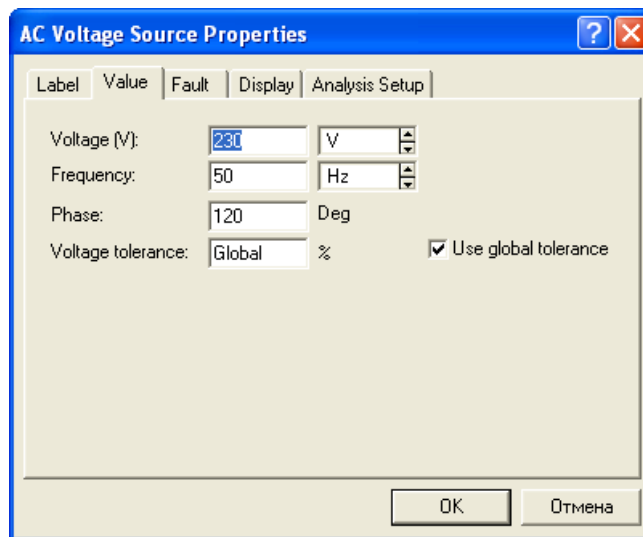


Рисунок 5.1 – Окно свойств источника переменного напряжения

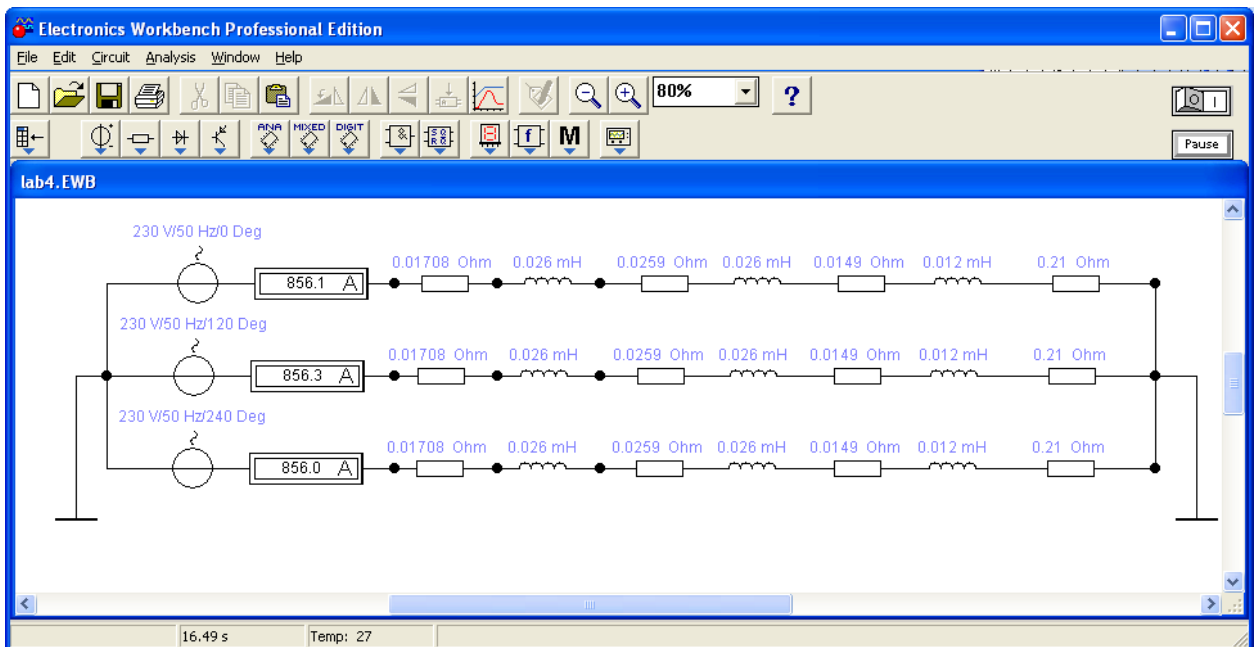


Рисунок 5.2 – Схема цеховой сети в режиме номинальной нагрузки

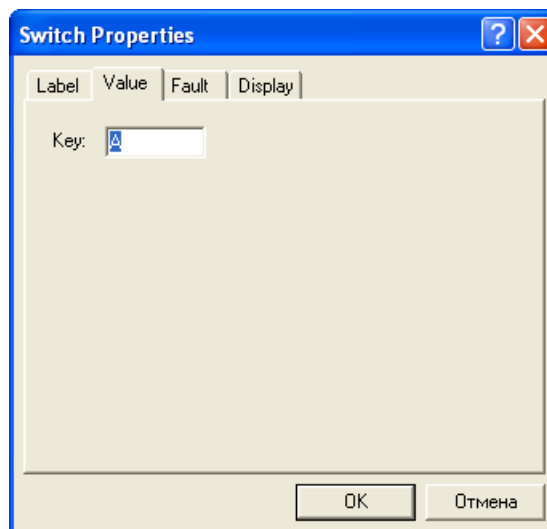


Рисунок 5.3 – Окно свойств ключа

На рисунке 5.4 представлена математическая модель системы электроснабжения для исследования режимов трех-, двухфазных КЗ. На рисунке показана схема в режиме трехфазного КЗ в точке К1.

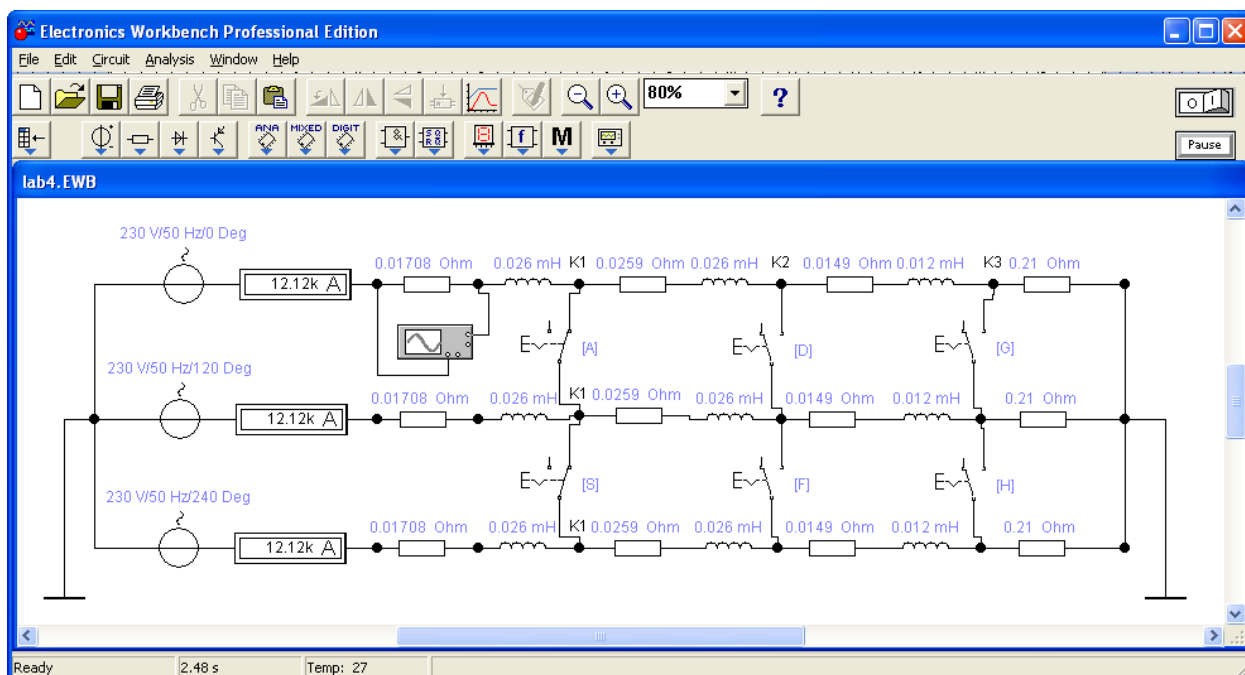


Рисунок 5.4 – Схема цеховой сети в режиме трехфазного КЗ в точке К1

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 сопротивление нулевых проводников и учесть изменение сопротивления трансформатора.

Сопротивление силового трансформатора при загрузке одной фазы (однофазное КЗ) по таблице 2:

$$Z_{\text{тр}}^{(1)} = 81 \text{ мОм.}$$

Приведем к одной фазе:

$$Z_{\text{тр.ф}}^{(1)} = \frac{Z_{\text{тр}}^{(1)}}{3} = \frac{81}{3} = 27 \text{ мОм.}$$

Будем считать сопротивление силового трансформатора чисто индуктивным.

Сопротивления нулевых жил кабельных линий КЛ1 и КЛ2 определены в лабораторной работе № 4:

$$R_{0-КЛ1} = \frac{r_0 \cdot l}{n} = \frac{0,261 \cdot 10}{4} = 0,653 \text{ мОм};$$

$$R_{0-КЛ2} = r_0 \cdot l = 0,625 \cdot 20 = 12,5 \text{ мОм};$$

Дополним математическую модель двумя сопротивлениями: активным:

$$R = R_{0-КЛ1} + R_{0-КЛ2} = 0,653 + 12,5 = 13,153 \text{ мОм};$$

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 рисунке 5.5 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.

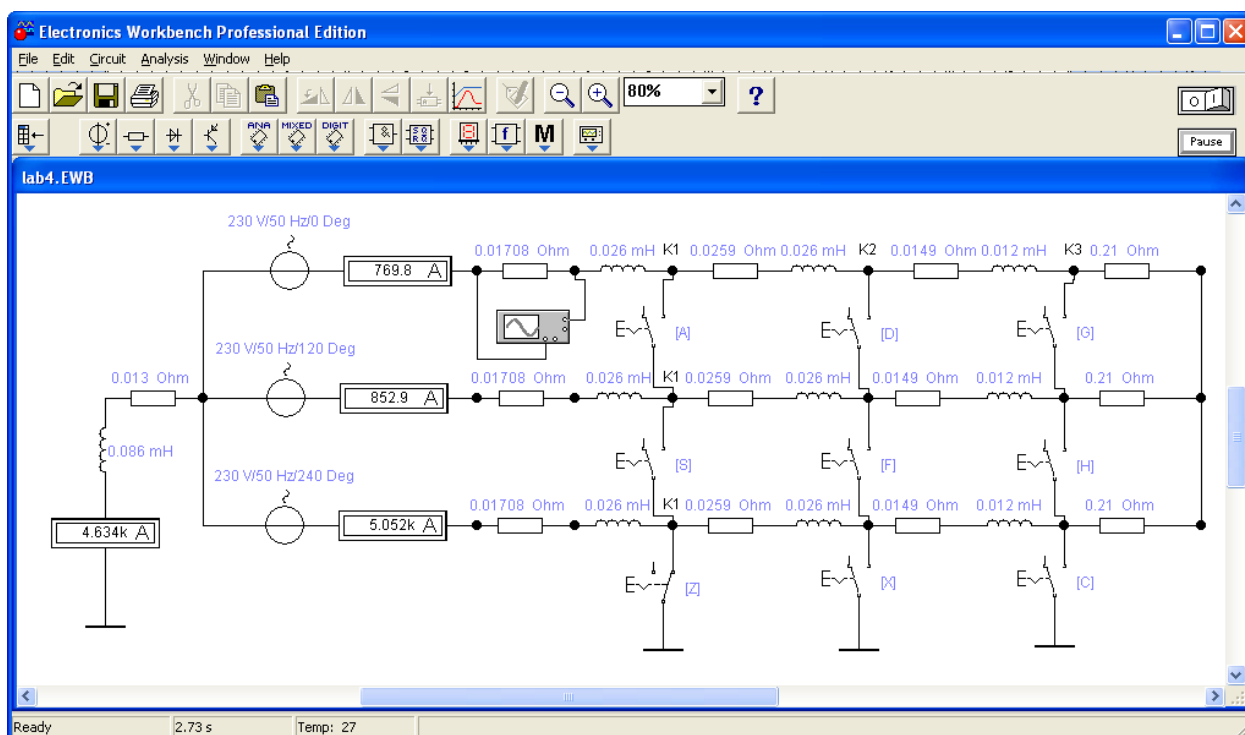


Рисунок 5.5 – Схема цеховой сети в режиме однофазного КЗ фазы С в точке К1

5.2. ЗАДАНИЕ

Для схемы электрической сети до 1000 В (рисунок 4.5) 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 №4.

5.3. 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.

5.4. 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.

II. ОПТИМИЗАЦИОННЫЕ ЗАДАЧИ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

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.д.

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:

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

где d_i , D_i – нижняя и верхняя границы 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.

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 программирования и навыки практической работы с пакетом *MS Office*.

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ ЛИНЕЙНОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ

Общая задача линейного программирования состоит в минимизации (максимизации) линейной функции:

$$Z = c_1x_1 + c_2x_2 + \dots + c_nx_n$$

от n переменных x_1, x_2, \dots, x_n , удовлетворяющих условиям неотрицательности:

$$x_1 \geq 0, x_2 \geq 0, \dots, x_n \geq 0$$

и m линейным ограничениям:

$$a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n \leq (=, \geq) b_1,$$

$$a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n \leq (=, \geq) b_2,$$

.....

$$a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \dots + a_{mn}x_n \leq (=, \geq) b_m.$$

Для того чтобы решить задачу линейного программирования в табличном редакторе *Microsoft Excel*, необходимо придерживаться следующего плана действий.

1. Ввести условие задачи:

а) создать экранную форму для ввода условия задачи:

- переменных,
- целевой функции,
- ограничений,
- граничных условий;

б) ввести исходные данные в экранную форму:

- коэффициенты целевой функции,
- коэффициенты при переменных в ограничениях,
- правые части ограничений;

в) ввести зависимости из математической модели в экранную форму:

- формулу для расчета целевой функции,
- формулы для расчета значений левых частей ограничений;

г) задать целевую функцию (в окне "Поиск решения"):

- целевую ячейку,
- направление оптимизации ЦФ;

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:

- установить параметры решения задачи (в окне "Поиск решения"),
- запустить задачу на решение (в окне "Поиск решения");
- 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 таблице 12. 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 12 – 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:

Целевая функция

$$Z = 25 \cdot x_1 + 70 \cdot x_2 + 120 \cdot x_3 \rightarrow \max \quad (1)$$

Система ограничений

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

Граничные условия

$$x_1 \geq 0, x_2 \geq 0, x_3 \geq 0 \quad (3)$$

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, рисунок 2.

| | А | В | С | Д | Е | Ф | Г |
|----|---------------|--------------------|------|------|----------------------------|------|-----------|
| 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:Д3;В6:Д6) | Тип | max |
| 7 | | | | | | | |
| 8 | | Ограничения | | | | | |
| 9 | Вид | | | | Левая часть | Знак | Пр. часть |
| 10 | Ткань | 1 | 3 | 2 | =СУММПРОИЗВ(В3:Д3;В10:Д10) | <= | 80 |
| 11 | Доски | 2 | 4 | 8 | =СУММПРОИЗВ(В3:Д3;В11:Д11) | <= | 120 |
| 12 | Фурнитура | 1 | 2 | 4 | =СУММПРОИЗВ(В3:Д3;В12:Д12) | <= | 60 |
| 13 | | | | | | | |
| 14 | | | | | | | |

Рисунок 2 – Экранная форма задачи 1

В экранной форме на рисунке 2 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:Д3, коэффициентам целевой функции (ЦФ) соответствуют ячейки В6:Д6, правым частям ограничений соответствуют ячейки Г10:Г12.

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:

$$E6 = \text{СУММПРОИЗВ}(B3:D3;B6:D6) \quad (4)$$

Формулы для расчета левых частей системы ограничений (2) разместим в ячейках Е10:Е12. Для экранной формы, представленной на рисунке 12, они могут быть рассчитаны по следующим формулам:

$$\left. \begin{aligned} E10 &= \text{СУММПРОИЗВ}(B3:D3;B10:D10) \\ E11 &= \text{СУММПРОИЗВ}(B3:D3;B11:D11) \\ E12 &= \text{СУММПРОИЗВ}(B3:D3;B12:D12) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Экранная форма готова для решения задачи линейного программирования.

В качестве начального приближения значений искомых переменных примем нулевые значения, для чего введем в ячейки В3:Д3 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, рисунок 3.

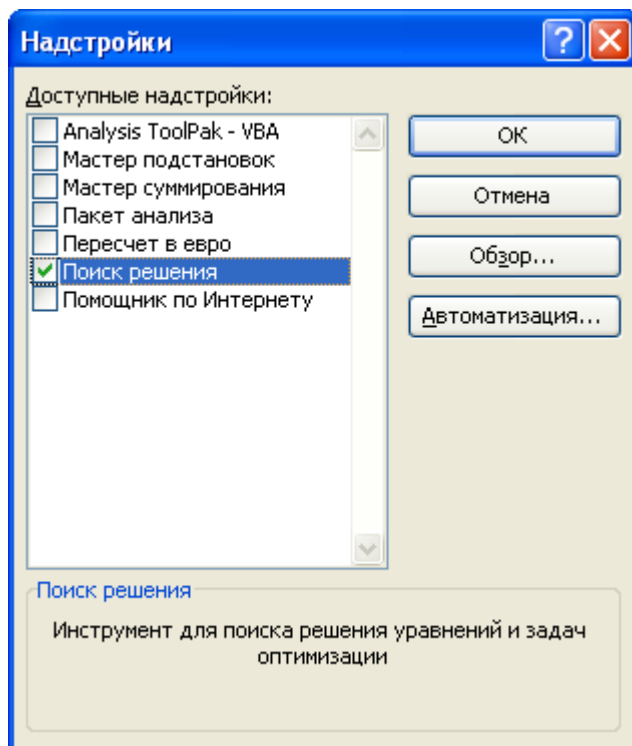


Рисунок 3 – Диалоговое окно установки дополнительных компонент *MS Excel*

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 рисунке 4.

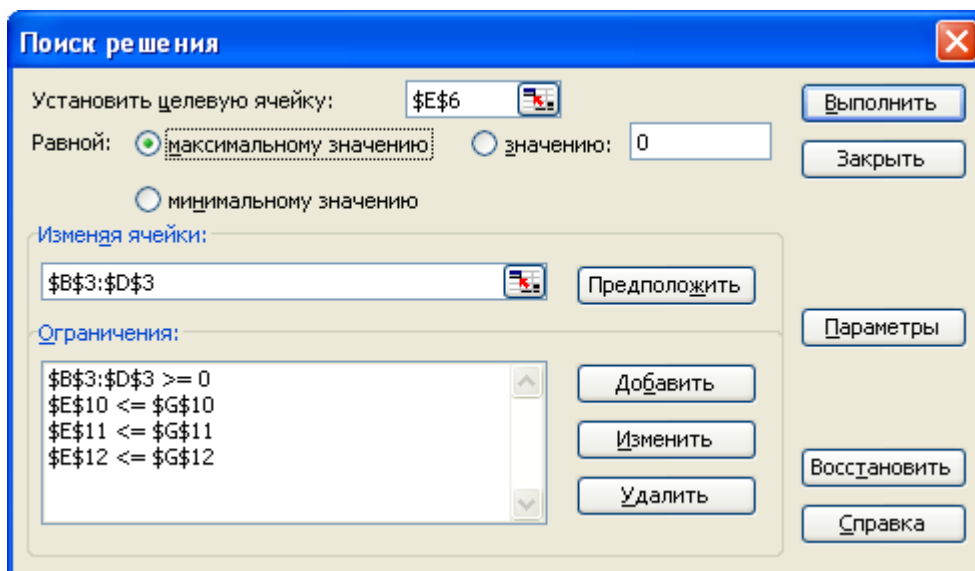


Рисунок 4 – Диалоговое окно «Поиск решения» задачи 1

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 В3: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 отрывшемся диалоговом окне «Добавление ограничения» установить ссылку на требуемую ячейку, вид и значение ограничения (рисунок 5).

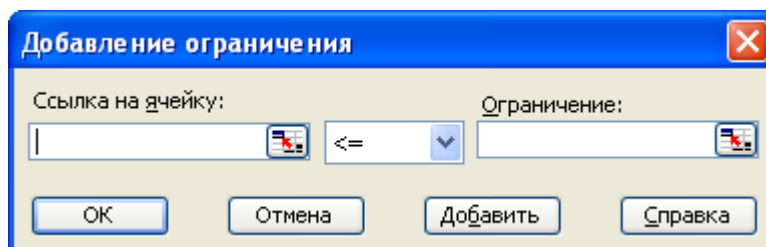


Рисунок 5 – Диалоговое окно «Добавление ограничения»

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);
- значения ячеек В3:D3 должны быть больше или равны нулю (граничные условия 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» (рисунок 6).

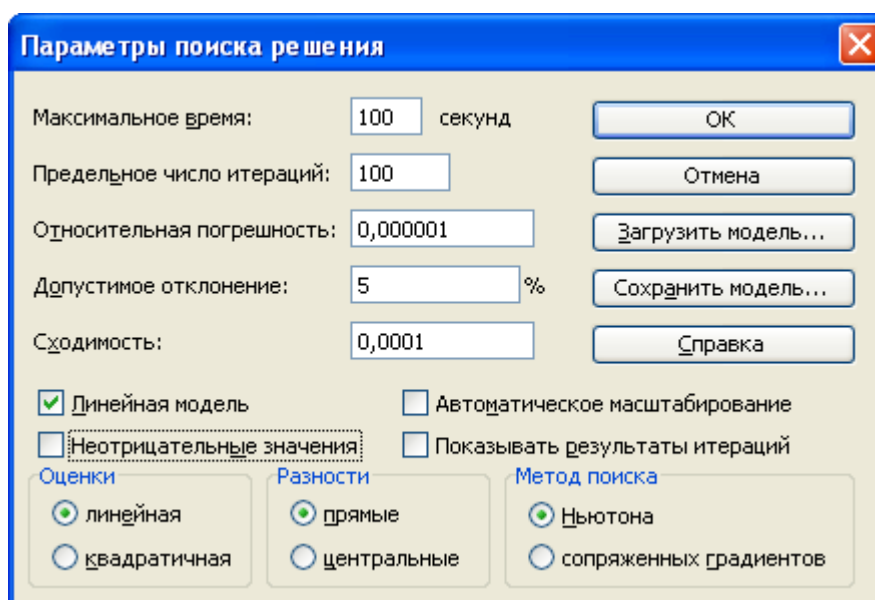


Рисунок 6 – Диалоговое окно «Параметры поиска решения»

Параметр «Максимальное время» служит для назначения времени (в секундах), выделяемого на решение задачи. В поле можно ввести время, не превышающее 32767 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 32767.

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 рисунке 7.

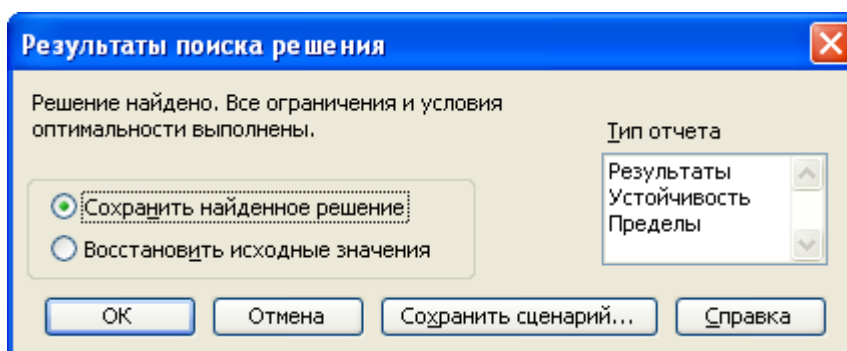


Рисунок 7 – Диалоговое окно «Результаты поиска решения»

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 рисунке 8.

| | А | В | С | Д | Е | Ф | Г | Н |
|----|---------------|--------------------|------|------|------------------------|------|-----------|---|
| 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 | | | | | | | | |

Рисунок 8 – Экранная форма задачи 1 с результатом решения

Из результатов решения задачи, представленных на рисунке 8, следует, что для получения максимальной прибыли в планируемом производственном периоде в 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 (рисунок 9).

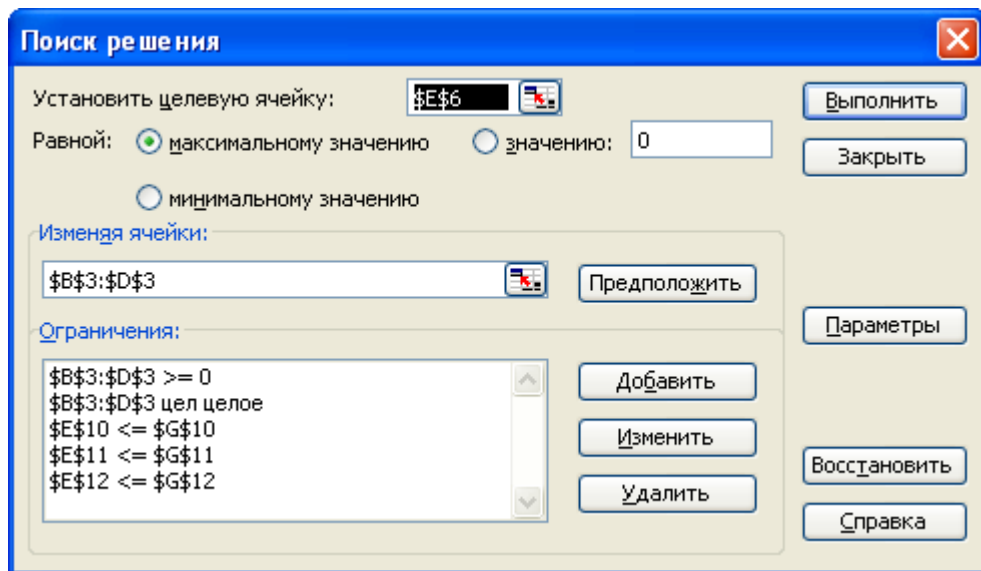


Рисунок 9 – Диалоговое окно «Поиск решения» целочисленной задачи 1

Экранная форма с результатами решения задачи линейного целочисленного программирования представлена на рисунке 10.

| | 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 | 2040 | Тип | | |
| 7 | | | | | | max | | |
| 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 | | | | | | | | |

Рисунок 10 – Экранная форма задачи 1 с результатом решения

Выберем в диалоговом окне «Результаты поиска решения» (рисунок 7) тип отчета «Результаты» и нажмем кнопку ОК. *MS Excel* автоматически создаст в рабочей книге новый лист «Отчет по результатам 1», представленный на рисунок 11.

| 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 |

Рисунок 11 – 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.

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» (рисунок б), 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:

$$\Delta f_k = \left| \frac{f(x^{k-1}) - f(x^k)}{f(x^k)} \right| \leq \varepsilon. \quad (6)$$

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

В соответствии с выражением (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 (6) возможно деление на ноль.

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 которые 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:

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n C_{ij} \cdot x_{ij} \rightarrow \min. \quad (7)$$

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:

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = a_i, \text{ где } i = 1 \dots m. \quad (8)$$

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

$$\sum_{i=1}^m x_{ij} = b_j, \text{ где } j = 1 \dots n. \quad (9)$$

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

$$x_{ij} \geq 0, i = 1 \dots m; j = 1 \dots n. \quad (10)$$

Из (8), (9) следует, что сумма запасов продукции во всех пунктах отправления должна равняться суммарной потребности во всех пунктах потребления, то есть:

$$\sum_{i=1}^m a_i = \sum_{j=1}^n b_j. \quad (11)$$

Если условие (11) выполняется, то ТЗ называется сбалансированной (замкнутая модель), в противном случае – несбалансированной (открытая модель). Поскольку ограничения модели ТЗ (8), (9) могут быть выполнены только при сбалансированной ТЗ, то при построении транспортной модели необходимо проверять условие баланса (11). В случае, когда суммарные запасы превышают суммарные потребности, необходим дополнительный фиктивный пункт потребления, который будет формально потреблять существующий излишек запасов, то есть:

$$b_{\phi} = \sum_{i=1}^m a_i - \sum_{j=1}^n b_j. \quad (12)$$

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

$$a_{\phi} = \sum_{j=1}^n b_j - \sum_{i=1}^m a_i. \quad (13)$$

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 значения 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 таблицу 13. Необходимо определить оптимальные по транспортным расходам способы доставки товара со складов в магазины.

Таблица 13 – Транспортные расходы по доставке товара, руб/шт.

| Склады \ Магазины | 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, рисунок 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 | Потребность в товаре, шт. | 2100 | 1600 | 1000 | |

Рисунок 12 – 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

$$a_{\phi} = \sum_{j=1}^n b_j - \sum_{i=1}^m a_i = 4700 - 4400 = 300 \text{ шт.}$$

и внесем изменения в лист книги *MS Excel*.

Excel.

| | 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 | |

Рисунок 13 – 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, рисунок 14.

| | 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 | | | | |

Рисунок 14 – 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(), рисунок 15.

| | А | В | С | Д | Е |
|----|---------------------------|-------------------------------------|----------------------------|----------------------------|-------------------|
| 1 | | | Магазины | | |
| 2 | Склады | Магазин 1 | Магазин 2 | Магазин 3 | Запасы товара, шт |
| 3 | | Стоимость перевозки товара, руб/шт. | | | |
| 4 | | Склад 1 | 80 | 200 | |
| 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 | |
| 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 | | | | | |

Рисунок 15 – 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, рисунок 16.

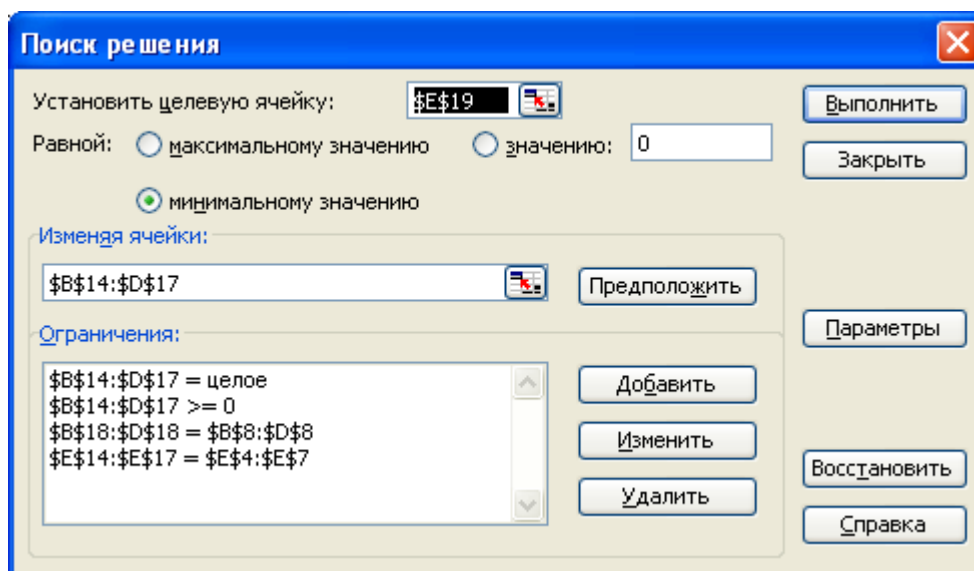


Рисунок 16 – Окно форма «Поиск решения» ТЗ

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, рисунок 17.

| | 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 |

Рисунок 17 – Результат решения ТЗ на листе книги *MS Excel*

6. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО КОЛИЧЕСТВА ТРАНСФОРМАТОРОВ ЦЕХОВЫХ ПОДСТАНЦИЙ

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

6.1. ЗАДАНИЕ

От шин 10 кВ главной понизительной подстанции (ГПП) предприятия осуществляется электроснабжение цехов с суммарными расчетными нагрузками P_p и Q_p . (рисунок 6.1). 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 таблице 6.1. 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*.

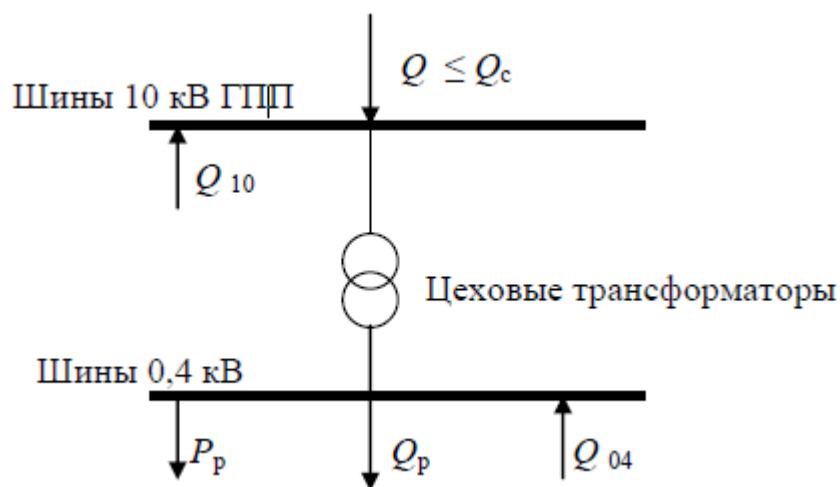


Рисунок 6.1 – Расчетная схема электроснабжения предприятия

Таблица 6.1 – Исходные данные

| № вар. | P_p , МВА | Q_p , МВар | k_3 | $S_{тр}$, кВА | $Z_{тр}$, у.е./кВА | Z_{04} , у.е./кВА | Z_{10} , у.е./кВА |
|--------|----------------|-----------------|-------|-------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| 1 | 20 | 18 | 0,70 | 1000 | 9 | 10,0 | 4,0 |
| 2 | 25 | 20 | 0,75 | 1600 | 10 | 9,0 | 4,5 |
| 3 | 30 | 25 | 0,80 | 2500 | 9 | 8,0 | 4,0 |
| 4 | 33 | 29 | 0,85 | 1000 | 10 | 8,5 | 5,0 |
| 5 | 35 | 30 | 0,90 | 1600 | 9 | 10 | 5,0 |
| 6 | 28 | 24 | 0,75 | 2500 | 11 | 9,0 | 4,5 |
| 7 | 33 | 25 | 0,80 | 1000 | 10 | 8,0 | 3,8 |

Продолжение таблицы 6.1

| № вар. | P_p , МВА | Q_p , МВар | k_3 | $S_{тр}$, кВА | $Z_{тр}$, у.е./кВА | Z_{04} , у.е./кВА | Z_{10} , у.е./кВА |
|--------|----------------|-----------------|-------|-------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| 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 |

6.2. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

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

$$S_p = \sqrt{P_p + Q_p}. \quad (6.1)$$

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

$$N_{\max} = \frac{S_p}{S_{тр} \cdot k_3}. \quad (6.2)$$

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

$$N_{\min} = \frac{P_p}{S_{тр} \cdot k_3}. \quad (6.3)$$

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:

$$Q_{04}^1 = \frac{Q_p}{N_{\max} - N_{\min}}. \quad (6.4)$$

Для определения оптимального количества трансформаторов необходимо найти минимум целевой функции:

$$Z = Z_{тр} \cdot S_{тр} \cdot N + Z_{04} \cdot Q_{04} + Z_{10} \cdot Q_{10}, \quad (6.5)$$

представляющей собой суммарные затраты на цеховые трансформаторы и компенсирующие устройства на 0,4 и 10 кВ.

Минимум целевой функции (6.5) 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):

$$Q_{04} + Q_{10} = Q_p. \quad (6.6)$$

2. Искомое количество трансформаторов, уменьшаемое за счет установки компенсирующих устройств на шинах 0,4 кВ, определится условием:

$$N \geq N_{\max} - \frac{Q_{04}}{Q_{04}^1}. \quad (6.7)$$

Решение задачи должно выполняться при граничных условиях:

$$N \geq 0, Q_{04} \geq 0, Q_{10} \geq 0. \quad (6.8)$$

Задача приведена к формализованному виду для решения в *MS Excel*.

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.

6.4. 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.

7. ОПТИМАЛЬНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ КОМПЕНСИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ В РАДИАЛЬНОЙ СХЕМЕ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

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

7.1. ЗАДАНИЕ

Питание цеховых трансформаторных подстанций промышленного предприятия осуществляется от шин $U = 10$ кВ главной понизительной подстанции (ГПП) кабельными линиями по радиальной схеме (рисунок 7.1).

Значения активных сопротивлений кабельных линий R_i , реактивные нагрузки цехов Q_i и суммарная мощность компенсирующих устройств Q_k приведены в таблице 7.1.

Технические данные нерегулируемых конденсаторных установок, используемых на предприятии, приведены в таблице 7.2.

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.

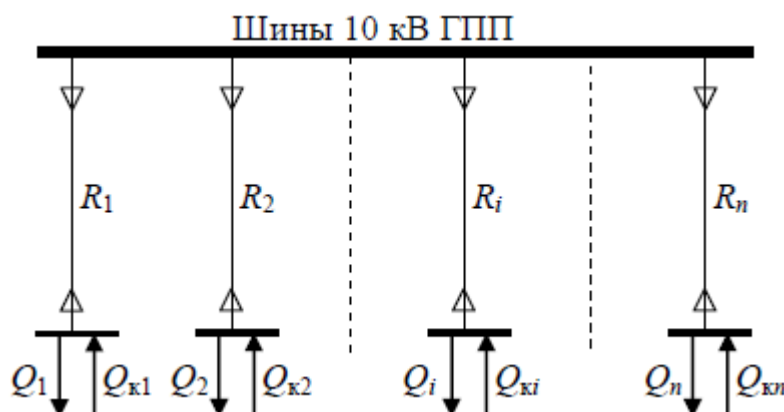


Рисунок 7.1 – Расчетная схема электроснабжения предприятия

Таблица 7.1 – 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 | 0,10 | 0,20 | 0,30 | 0,40 | 4000 | 3000 | 1000 | 2000 | 7500 |
| 2 | 0,15 | 0,10 | 0,30 | 0,25 | 1000 | 2000 | 3000 | 4000 | 7500 |
| 3 | 0,35 | 0,25 | 0,20 | 0,10 | 2500 | 3500 | 1000 | 2000 | 6000 |
| 4 | 0,40 | 0,30 | 0,25 | 0,20 | 1000 | 2000 | 2500 | 3500 | 6000 |
| 5 | 0,25 | 0,25 | 0,10 | 0,10 | 1500 | 3500 | 3500 | 1500 | 7500 |
| 6 | 0,10 | 0,10 | 0,25 | 0,25 | 2500 | 2000 | 2000 | 2500 | 6600 |
| 7 | 0,25 | 0,10 | 0,25 | 0,10 | 3000 | 1500 | 1500 | 3000 | 6600 |
| 8 | 0,15 | 0,25 | 0,15 | 0,25 | 1500 | 2500 | 2500 | 2500 | 6000 |
| 9 | 0,20 | 0,40 | 0,30 | 0,10 | 2500 | 2500 | 2500 | 2500 | 7500 |
| 10 | 0,40 | 0,30 | 0,20 | 0,10 | 1500 | 1500 | 3000 | 3000 | 6600 |

Продолжение таблицы 7.1

| № 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 |
|--------|------------|------------|------------|------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| 11 | 0,40 | 0,40 | 0,20 | 0,15 | 1000 | 2000 | 3000 | 4000 | 7500 |
| 12 | 0,25 | 0,15 | 0,10 | 0,40 | 2000 | 3000 | 2500 | 2500 | 7500 |
| 13 | 0,25 | 0,25 | 0,40 | 0,10 | 1500 | 3000 | 3000 | 1500 | 6600 |
| 14 | 0,20 | 0,30 | 0,35 | 0,25 | 2000 | 2500 | 2000 | 2500 | 6600 |
| 15 | 0,35 | 0,45 | 0,20 | 0,25 | 1000 | 4000 | 1500 | 2500 | 6000 |

Таблица 7.2 – Технические данные нерегулируемых конденсаторных установок

| Тип | $U_{ном}$, кВ | Шкала номинальных мощностей, кВар |
|-----------|----------------|-----------------------------------|
| УК-10Q УЗ | 10,5 | 300, 600, 900, 1200, 1500, 1800 |

7.2. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

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

$$\Delta P = \frac{Q^2 \cdot R}{U^2}, \text{ Вт}, \quad (7.1)$$

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:

$$\Delta P = \sum_{i=1}^n \frac{(Q_i - Q_{ki})^2 \cdot R_i}{U^2}, \quad (7.2)$$

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

Выражение (7.2) является целевой функцией решаемой задачи. Требуется найти минимум целевой функции при следующих ограничениях

1. Мощность устанавливаемых компенсирующих устройств должна быть положительной:

$$Q_{ki} \geq 0, i = 1, 2 \dots n. \quad (7.3)$$

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

$$\sum_{i=1}^n Q_{ki} = Q_k. \quad (7.4)$$

Выражения (7.2)-(7.4) 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 таблице 7.2, шаг дискретизации составляет 300 кВар.

Для нахождения практического минимума потерь активной мощности в системе электроснабжения требуется формализовать математическую модель, описываемую выражениями (7.2)-(7.4), к математической модели с дискретными переменными. В общем случае, способы формализации математических уравнений могут быть различными, выбор же конкретного варианта определяется исследователем самостоятельно.

7.3. 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.

7.4. 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.

8. ОПТИМАЛЬНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ КОМПЕНСИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ В МАГИСТРАЛЬНОЙ СХЕМЕ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

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

8.1. ЗАДАНИЕ

Питание группы потребителей промышленного предприятия осуществляется от шин $U = 10$ кВ главной понизительной подстанции (ГПП) кабельными линиями по магистральной схеме (рисунок 8.1).

Значения активных сопротивлений кабельных линий R_i , реактивные нагрузки потребителей Q_i и суммарную мощность компенсирующих устройств Q_k возьмем из условий предыдущей задачи (таблица 7.1).

Технические данные нерегулируемых конденсаторных установок, используемых на предприятии, приведены в таблице 7.2.

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.

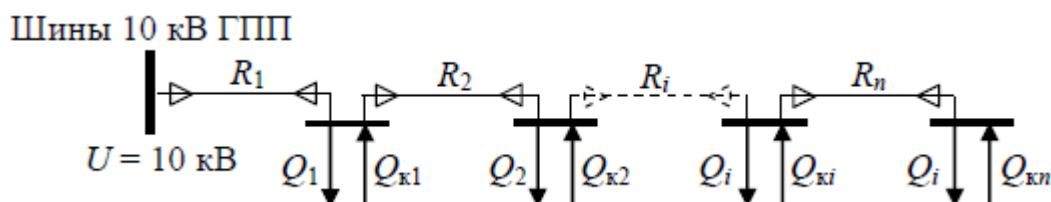


Рисунок 8.1 – Расчетная схема электроснабжения группы потребителей предприятия

8.2. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

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

$$\Delta P = \frac{1}{U^2} \cdot \left[R_1 \cdot \left(\sum_1^n Q_i - \sum_1^n Q_{ki} \right)^2 + R_1 \cdot \left(\sum_1^n Q_i - \sum_1^n Q_{ki} \right)^2 + \dots + \right. \\ \left. + R_i \cdot \left(\sum_i^n Q_i - \sum_i^n Q_{ki} \right)^2 + R_n \cdot (Q_n - Q_{kn})^2 \right], \text{ Вт}, \quad (8.1)$$

где Q_i , Q_{ki} – 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 (8.1) представляет собой целевую функцию решаемой задачи. Требуется найти минимум целевой функции при следующих ограничениях

1. Мощность устанавливаемых компенсирующих устройств должна быть положительной:

$$Q_{ki} \geq 0, i = 1, 2 \dots n. \quad (8.2)$$

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

$$\sum_{i=1}^n Q_{ki} = Q_k. \quad (8.3)$$

Выражения (8.1-8.3) 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.

8.3. 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.

8.4. 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?

9. ОПТИМАЛЬНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ СХЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

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

9.1. 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 (таблица 9.1).

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

Таблица 9.1 – 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 |

9.2. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

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

$$Z_{\text{пр}} = p_n \cdot K + C_3, \text{ руб.} \quad (9.1)$$

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:

$$K = (a + b \cdot S) \cdot l, \quad (9.2)$$

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

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

$$C_{\text{э}} = 3 \cdot I^2 \cdot R \cdot \text{Ц} \cdot t, \quad (9.3)$$

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:

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S}, \quad (9.4)$$

где ρ – удельное сопротивление материала провода.

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

$$S = \frac{I}{J_{\text{эк}}}. \quad (9.5)$$

Преобразуя выражение (9.1) с учетом (9.2)-(9.5), получим:

$$Z_{\text{пр}} = a \cdot l + \left(\frac{b}{J_{\text{эк}}} + 3 \cdot J_{\text{эк}} \cdot \rho \cdot \text{Ц} \cdot t \right) \cdot I \cdot l. \quad (9.6)$$

Для n участков электрической сети суммарные приведенные затраты определяются выражением:

$$Z_{\text{пр}} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n k_1 \cdot l_{ij} + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n k_2 \cdot l_{ij} \cdot I_{ij}, \quad (9.7)$$

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 (9.7), 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:

$$Z = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n l_{ij} \cdot P_{ij} \rightarrow \min. \quad (9.8)$$

Требуется найти минимум целевой функции при следующих ограничениях:

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

$$\sum_{i=1}^m P_{ij} = P_i, \quad j = 1, 2 \dots m. \quad (9.9)$$

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

$$\sum_{j=1}^n P_{ij} = P_j, \quad i = 1, 2 \dots n. \quad (9.10)$$

3. Величина мощности, передаваемой по линии должна быть положительной.

$$P_{ij} \geq 0. \quad (9.11)$$

Выражения (9.8)-(9.11) 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*.

9.3. 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.

9.4. 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.