



ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
УПРАВЛЕНИЕ ЦИФРОВЫХ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Кафедра «Интеллектуальные электрические сети»

## **Сборник задач** по дисциплине

# **«Электромагнитные переходные процессы»**



Авторы  
Цыгулев Н. И.,  
Шелест В. А.,  
Михайлов В. В.

Ростов-на-Дону, 2020

## Аннотация

Сборник задач предназначен для студентов очной, заочной форм обучения направлений 13.03.02/13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника»

## Авторы

д.т.н., профессор, зав. кафедрой  
«Интеллектуальные электрические сети»

Цыгулев Н.И.,

к.т.н., доцент кафедры «Интеллектуальные  
электрические сети»

Шелест В.А.,

доцент кафедры «Интеллектуальные  
электрические сети»

Михайлов В.В.



## Оглавление

<b>Проведение лабораторных работ .....</b>	<b>4</b>
<b>Лабораторная работа №1 «ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ» .....</b>	<b>5</b>
<b>Лабораторная работа № 2 «ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА ПРИ ТРЕХФАЗНОМ КОРОТКОМ ЗАМЫКАНИИ» .....</b>	<b>12</b>
<b>Лабораторная работа №3 «ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА ПРИ ТРЕХФАЗНОМ К.З. С УЧЕТОМ ПОДПИТКИ ОТ СИНХРОННОГО КОМПЕНСАТОРА» .....</b>	<b>16</b>
<b>Лабораторная работа №4 «ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА ПРИ НЕСИММЕТРИЧНОМ КОРОТКОМ ЗАМЫКАНИИ» .....</b>	<b>18</b>
<b>Лабораторная работа №5 «ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДА ОДНОФАЗНОГО КЗ В ДВУХФАЗНОЕ И ТРЕХФАЗНОЕ» .....</b>	<b>23</b>
<b>Лабораторная работа №6 «ИССЛЕДОВАНИЕ ВКЛЮЧЕНИЯ ОДНОФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА» .....</b>	<b>24</b>
<b>Лабораторная работа №7 «ИССЛЕДОВАНИЕ БРОСКА ТОКА НАМАГНИЧИВАНИЯ ТРЕХФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА» .....</b>	<b>29</b>
<b>Список литературы .....</b>	<b>30</b>

## ПРОВЕДЕНИЕ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

1. Выполнению лабораторной работы предшествует предварительная подготовка, включающая ознакомление с содержанием работы, изучение теоретического материала и составление дифференциальных уравнений.

2. Следующим этапом является получение допуска к выполнению лабораторной работы. Допускаются к работе студенты, представившие оформленный отчет по предыдущей работе, а также показавшие достаточную подготовку к следующей лабораторной работе.

3. Подгруппа делится на бригады. В выполнении лабораторного эксперимента должны принимать непосредственное участие все члены бригады.

Приступая к выполнению работ, необходимо ознакомиться с принципом имитационного моделирования на компьютере с помощью программы "МВТУ".

Необходимо знать и строго выполнять все правила техники безопасности.

По окончании каждого этапа работы следует сообщать преподавателю результаты эксперимента, чтобы при необходимости можно было повторить опыт. Все данные экспериментов заносятся в протокол лабораторной работы.

4. Для зачета лабораторной работы студент предъявляет преподавателю индивидуальный отчет, оформленный в соответствии с требованиями, и отвечает на вопросы типа: "что делал?", "как делал?", "какой получил результат?" и "какие сделал выводы".

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1 «ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ»

**Цель работы:** Знакомство с программой «МВТУ», имитирующей аналоговое моделирование, и ознакомление с основными приемами моделирования переходных процессов.

### 1. Введение

При учебных и научных исследованиях широко используются машинное моделирование, которое позволяет осмыслить связь между физической сущностью и математическим описанием изучаемого процесса. Существуют различные толкования машинного моделирования. Мы примем за основу то определение, согласно которому машинное моделирование – это имитирование математического моделирования с помощью технических средств.

Машинное моделирование применяют для исследования технических систем, в которых процессы описываются дифференциальными уравнениями. Поскольку в модели изучаемой системы представлена структура дифференциальных уравнений, расчлененных на элементарные операции, то можно утверждать, что такое моделирование является структурным. Дифференциальные уравнения отображают физическую структуру динамической системы и в процессе подготовки модели проявляются основные свойства исследуемого объекта.

В лабораторных работах используется программа «МВТУ», которая является аналоговым имитатором и предназначена для анализа сложных динамических систем. Программа «МВТУ» работает в среде WINDOWS XP, имеет развитый оконный интерфейс и широкий набор компонентов элементарных операций для набора структурных моделей на экране монитора. Результаты расчетов, полученные с помощью модели, представляются в табличной и графической формах на экране монитора.

### 2. Основные этапы моделирования переходных процессов.

Переходные процессы в системах электроснабжения описываются системой дифференциальных уравнений. Моделирование в программе «МВТУ» этих уравнений состоит из нескольких этапов.

Для успешного выполнения лабораторных работ студенту необходимо предварительно ознакомиться с основными этапами моделирования.

### 2.1. Составления задания на моделирование.

Для начала необходимо составить принципиальную электрическую схему, подлежащую исследованию, и определить ее электрические параметры. Затем необходимо уточнить цель моделирования этой схемы, т.е. выделить функции и переменные, которые необходимо определить, и составить задание на моделирование. В задание входит:

- а) система дифференциальных уравнений, количество которых должно быть равно количеству неизвестных;
- б) начальные условия;
- в) численные значения коэффициентов уравнений;
- г) перечень выходных переменных;
- д) диапазон времени моделирования переходного процесса;
- е) погрешность решения.

### 2.2. Преобразование уравнений к виду удобному для решения и составление структурной схемы.

Систему дифференциальных уравнений преобразуют так, чтобы в ней отсутствовали производные. Рассмотрим несколько примеров.

*2.2.1. Дано неоднородное дифференциальное уравнение первого порядка.*

$$a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y = E_m \sin(\omega t + \varphi)$$

Требуется определить зависимость  $y=f(t)$ .

Решение.

Решаем уравнение относительно производной

$$\frac{dy}{dt} = \frac{E_m}{a_1} \sin(\omega t + \varphi) - \frac{a_0}{a_1} y$$

и интегрируем

$$y = \int_0^t \left[ \frac{E_m}{a_1} \sin(\omega t + \varphi) - \frac{a_0}{a_1} y \right] dt + y_{(0)}.$$

Для удобства представим это уравнение в следующем виде

$$y = \frac{1}{a_1} \int_0^t [E_m \sin(\omega t + \varphi) - a_0 y] dt + y_{(0)}.$$

Исходные данные для уравнения приведены в табл. 1.

$\omega$	$\varphi$	$E_m$	$a_0$	$a_1$	$1/a_1$	$y_{(0)}$
314	$\pi$	8158	0,1	0,006	157	2000

Структурная схема для данного уравнения изображена на рис. 1.1

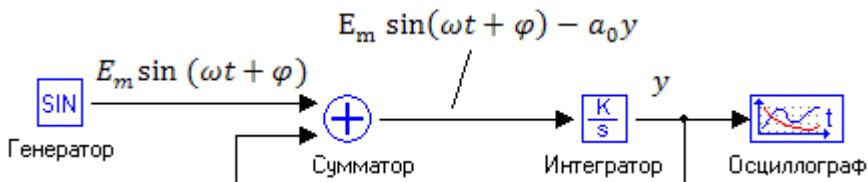


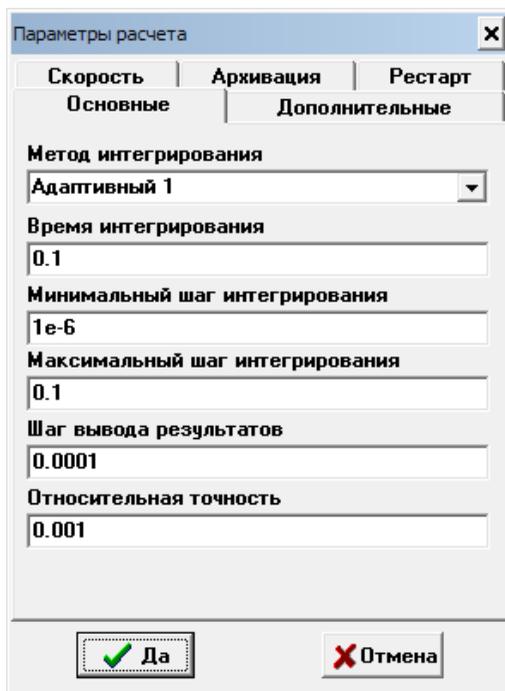
Рисунок 1.1 - Структурная схема модели первого примера

Порядок набора и настройки структурной схемы модели:

1. Нажимаем клавишу F3 для открытия окна модели с именем Noname.mtj.
2. С вкладки "Источники" переносим блок синусоидальных колебаний "SIN", щелкая один раз по этому блоку, а второй раз в поле окна модели.
3. Для настройки блока "SIN" щелкаем на нем правой кнопкой мыши и выбираем "Свойства". Открывается окно "Свойства объекта", в котором согласно таблице задаем амплитуду 8158, частоту 314 и фазу 3.14. Для выхода из этого окна нажимаем кнопки "Применить" и "Да".

## Электромагнитные переходные процессы

4. С вкладки "Операции" переносим блок "Сумматор" в поле окна модели. В свойствах этого блока согласно таблице заменяем -1 на -0.1.
5. С вкладки "Динамические" переносим блок "Интегратор" в поле окна модели. В свойствах этого блока согласно таблице заменяем коэффициент 1 на 157.
6. С вкладки "Данные" переносим блок "Временной график" в поле окна модели.
7. Блоки соединяем курсором мышки согласно рисунку, щелкая по очереди на выходе одного блока и на входе другого блока. Для создания точки ответвления необходимо нажать клавишу "Ctrl" и щелкнуть мышкой на линии.
8. Названия блоков можно задать в их свойствах на вкладке "Общие".
9. Нажимаем клавишу F10, открывается окно "Параметры счета" (рис.1.2), в котором необходимо задать параметры интегрирования.
10. Старт процесса моделирования задаем клавишей F9, а его продолжение клавишами Ctrl+F9.



Параметры расчета

Скорость	Архивация	Рестарт
Основные		Дополнительные
<b>Метод интегрирования</b>		
Адаптивный 1		
<b>Время интегрирования</b>		
0.1		
<b>Минимальный шаг интегрирования</b>		
1e-6		
<b>Максимальный шаг интегрирования</b>		
0.1		
<b>Шаг вывода результатов</b>		
0.0001		
<b>Относительная точность</b>		
0.001		
<input checked="" type="checkbox"/> Да		<input type="checkbox"/> Отмена

Рисунок 1.2 - Параметры интегрирования модели первого примера

11. Делая двойной щелчок по блоку "Осциллограф" и открывается окно с зависимостью  $y=f(t)$ . Щелкаем правой кнопкой в поле графика и выбираем "Автомасштаб". Полученное решение изображено на рис. 1.3.

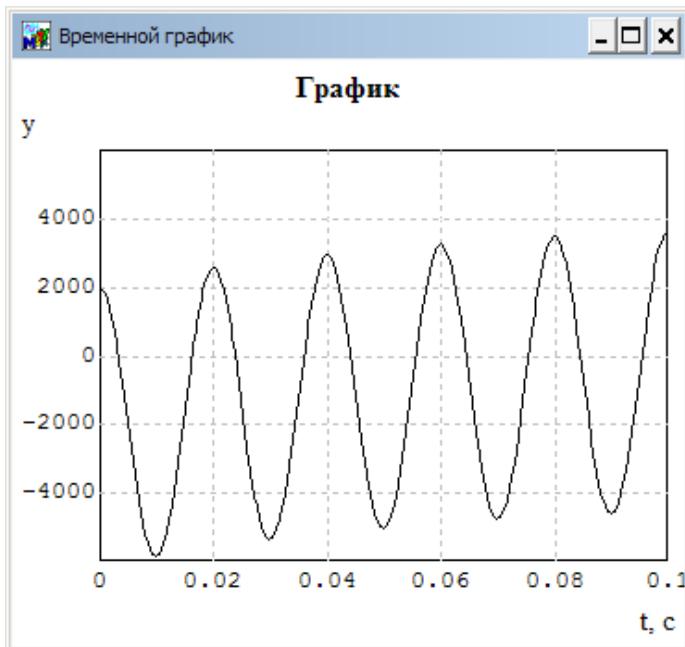


Рисунок 1.3 - Решение дифференциального уравнения первого примера

Для возврата в исходное состояние модели нажимаем клавиши Shift + F9.

*2.2.2. Дано дифференциальное уравнение второго порядка.*

$$a_2 \frac{d^2 y}{dt^2} + a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y = E_m \sin(\omega t + \varphi)$$

Требуется определить зависимость  $y=f(t)$ .

Решение.

Приводим уравнение к системе дифференциальных уравнений первого порядка

$$\begin{cases} \frac{dy}{dt} = y_1 \\ a_2 \frac{dy_1}{dt} + a_1 y_1 + a_0 y = E_m \sin(\omega t + \varphi) \end{cases}$$

и интегрируем каждое уравнение

$$\begin{cases} y = \int_0^t y_1 dt + y_{(0)} \\ y_1 = \frac{1}{a_2} \int_0^t [E_m \sin(\omega t + \varphi) - a_1 y_1 - a_0 y] dt + y_{1(0)} \end{cases}$$

Исходные данные для уравнений приведены в табл. 2

Таблица 1.2

$\omega$	$\varphi$	$E_m$	$a_0$	$a_1$	$1/a_2$	$y_{(0)}$	$y_{1(0)}$
314	2	8158	0,01	0,0005	200	20	10

Структурная схема модели изображена на рис. 1.4.

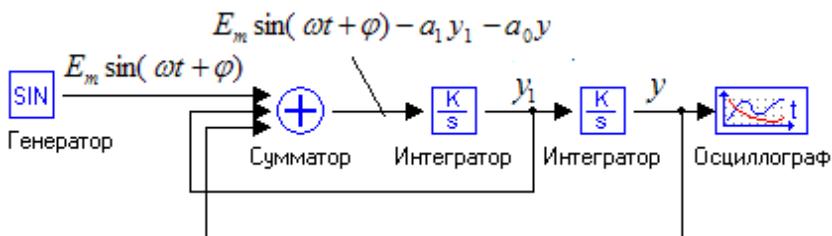


Рисунок 1.4 - Структурная схема модели второго примера

Порядок набора и настройки структурной схемы модели такой же, как и в предыдущем примере. В сумматоре третий вход добавляется автоматически при вводе в свойствах этого блока третьего коэффициента

$$a_0$$

В параметрах расчета (рис. 1.2) устанавливаем время интегрирования 0.05 сек.

После запуска процесса моделирования получаем на рис.5 решение дифференциального уравнения в виде функции  $y=f(t)$ .

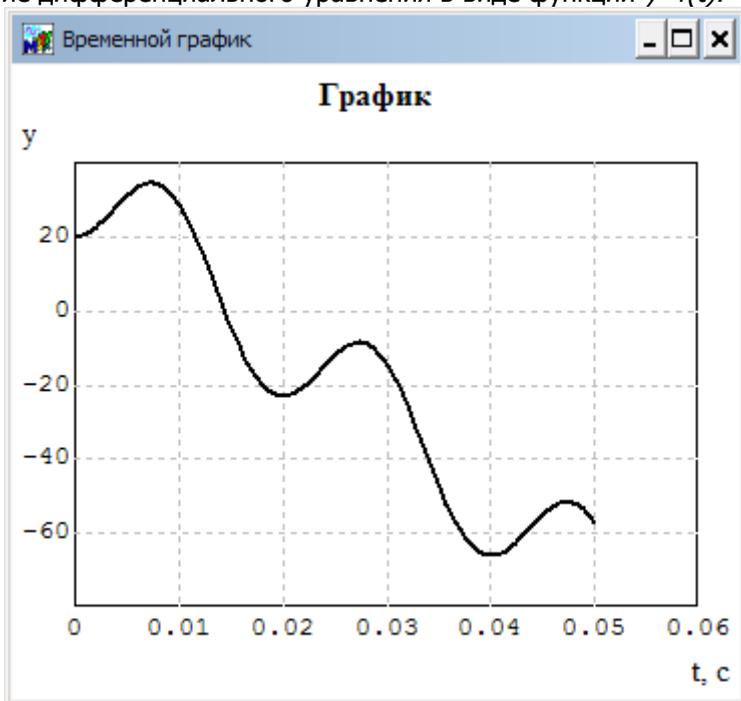


Рисунок 1.5 - Решение дифференциального уравнения второго примера

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2 «ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА ПРИ ТРЕХФАЗНОМ КОРОТКОМ ЗАМЫКАНИИ»

**Цель работы:** Ознакомиться с переходным процессом при трехфазном коротком замыкании и выполнить его исследование на ЭВМ.

### 1. Теоретические сведения.

Допустим в электрической сети с нагрузкой произошло трехфазное короткое замыкание (К.З.) в точке К (рис.2.1). Примем, что Э.Д.С. генератора в процессе К.З. не меняется или что питание осуществляется от источника бесконечной мощности.

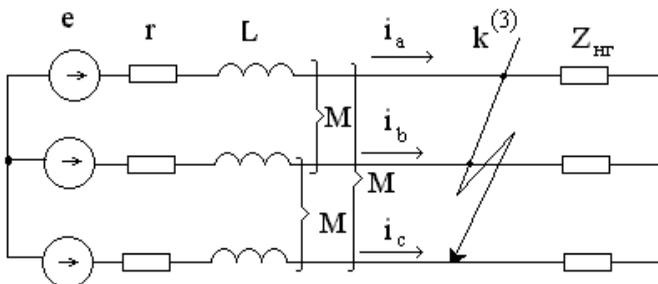


Рисунок 2.1 - Трехфазное короткое замыкание.

При симметричном трехфазном К.З. дифференциальные уравнения, описывающие переходные процессы в фазах имеют одинаковый вид. Например, для фазы А:

## Электромагнитные переходные процессы

$$e_A = i_A \cdot r + L \frac{di_A}{dt} + M \frac{di_B}{dt} + M \frac{di_C}{dt}, \quad (1)$$

где:  $r$  – активное сопротивление фазы;  
 $L$  – индуктивность одной фазы;  
 $M$  – взаимная индукция между фазами.

Имея ввиду, что  $(i_B - i_C) = -i_A$ , и опуская индекс А, получаем

$$e = i \cdot r + L_1 \frac{di}{dt}, \quad \text{где} \quad (2)$$

$L_1 = L - M$  – результирующая индуктивность фазы с учетом влияния других фаз.

При несимметричных К.З. эта индуктивность называется индуктивностью прямой последовательности.

Пусть Э.Д.С. изменяется по закону

$$e = E_m \sin(\omega t + \alpha), \quad (3)$$

тогда частное решение неоднородного уравнения

$$i_n \cdot r + L_1 \frac{di_n}{dt} = E_m \sin(\omega t + \alpha)$$

соответствует вынужденному режиму, задаваемому источником, и дает периодическую слагающую тока  $i_n$ , отстающую на угол  $\varphi$  от Э.Д.С.

Решение однородного уравнения

$$i_a \cdot r + L_1 \frac{di_a}{dt} = 0$$

дает свободный аperiodический ток  $i_a$ , затухающий по экспоненте.

Общее решение уравнения имеет вид

$$i = i_n + i_a = I_{nm} \sin(\omega t + \alpha - \varphi) + i_{a(0)} e^{-\frac{t}{T_a}}, \quad \text{где} \quad (4)$$

$$I_{nm} = \frac{E_m}{Z} \text{ - амплитуда периодической слагающей тока}$$

К.З.;

$$T_a = \frac{L_1}{r} \text{ - постоянная времени электрической цепи;}$$

$i_{a(0)}$  – начальное значение аperiodической слагающей тока.

Результирующий ток К.З. в первый момент времени  $i_{(0)}$  равен предшествующему току нагрузки  $i_{nr(0)}$ . Начальное значение периодической слагающей тока К.З. определяется из выражения (4), тогда аperiodическая слагающая тока К.З. в первый момент времени

$$i_{a(0)} = i_{(0)} - i_{n(0)} = i_{nz(0)} - i_{n(0)} \quad (5)$$

Величина аperiodической слагающей в данной фазе зависит от начальной фазы замыкания  $\alpha$  и от предшествующей нагрузки. Она равна нулю, если К.З. происходит в момент, когда вынужденный периодический ток  $i_{\lambda(0)} = i_{nr(0)}$ . Обычно наибольшее значение аperiodической слагающей будет при отсутствии тока нагрузки, т.е. при  $i_{(0)} = 0$ . При этом из (4) и (5)

$$i_{a(0)} = -i_{n(0)} = -I_{nm} \sin(\alpha - \varphi). \quad (6)$$

Результирующий ток

$$i = I_{nm} [\sin(\omega t + \alpha - \varphi) - \sin(\alpha - \varphi) e^{-\frac{t}{T_a}}]$$

Если в момент замыкания вынужденная периодическая слагающая максимальна, что соответствует  $\alpha - \varphi = \pm 90^\circ$ , то начальное значение аperiodической слагающей равно амплитуде периодической слагающей – также максимально. Этот простой случай является расчетным и имеет следующее выражение:

$$i = I_{nm} (\cos \omega t + e^{-\frac{t}{T_a}}) \quad (7)$$

## 2. Моделирование переходного процесса при коротком замыкании.

Преобразуем дифференциальное уравнение (2) к виду удобному для моделирования на ЭВМ. Для этого решаем его относительно производной

$$\frac{di}{dt} = \frac{1}{L_1} e - \frac{r}{L_1} i. \quad (8)$$

Интегрируем уравнение (8) и получаем:

$$i = \frac{1}{L_1} \int_0^t e dt - \frac{r}{L_1} \int_0^t i dt + i_{(0)}. \quad (9)$$

Преобразуем уравнение (9) к виду, удобному для реализации модели на ЭВМ

$$i = \frac{1}{L_1} \int_0^t (e - r \cdot i) dt + i_{(0)} \quad (10)$$

Составляем структурную схему для набора модели (рис. 2.2).

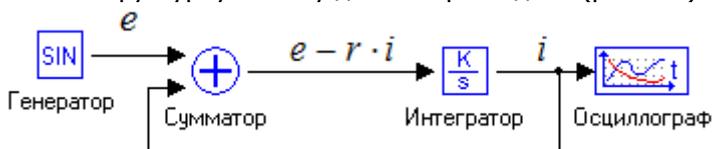


Рисунок 2.2 - Структурная схема для получения переходного тока К.З.

### 3. Задание.

- Изучить теоретическое описание переходного процесса.
- Ознакомиться с моделированием переходного процесса на ЭВМ.
- Для электрической сети (рис. 1) определить параметры структурной схемы и набрать ее на ЭВМ. Данные для расчета  $E_m$ ,  $r$  и  $x$  выдаются преподавателем в зависимости от варианта.
- Зарисовать с экрана ток К.З. при  $\alpha=0$  и  $\alpha=45^\circ$ .
- Определить с помощью ЭВМ и построить зависимость ударного тока К.З. от отношения  $x/r$  при  $Z=5.025$  Ом. Отношения  $x/r$  принять равным  $k=2$ ; 10; 40. Сопротивления  $r$  и  $x$  следует вычислять по формулам:

$$r = \frac{Z}{\sqrt{1+k^2}} \quad u \quad x = k \cdot r.$$

### 4. Содержание и оформление отчета.

- Описание работы (цель, задание, структурная схема).
- Расчет параметров структурной схемы.
- Осциллограммы токов.
- Зависимость ударного тока К.З. от отношения  $x/r$ .

- Выводы.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3 «ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА ПРИ ТРЕХФАЗНОМ К.З. С УЧЕТОМ ПОДПИТКИ ОТ СИНХРОННОГО КОМПЕНСАТОРА»

**Цель работы.** Самостоятельно выполнить постановку эксперимента по исследованию переходного процесса с учетом подпитки от синхронного компенсатора.

### 1. Исходные данные

Исходная схема системы электроснабжения приведена на рис.3.1. Параметры схемы выдаются преподавателем в зависимости от варианта.

Система: сопротивление  $x_c$ , отношение  $x_d/r_d$ ;

ЛЭП: длина  $l$ , соотношение  $x_l/r_l$ , удельное сопротивление

$x_{уд}$ ;

Понижающий трансформатор: мощность  $S_{тр}$ , Напряжение  $U_{ВН} / U_{НН}$ , напряжение К.З.  $U_k$ , отношение  $x_{тр}/r_{тр}$ ;

СК: мощность  $S_{ск}$ , напряжение  $U_{н,ск}$ , сверхпереходное сопротивление  $x_d''$ , постоянная времени  $T_d'$ ;

Нагрузка: мощность  $P_{нг}$ , коэффициент мощности  $\cos\phi$ , напряжение  $U_{нг}$ .

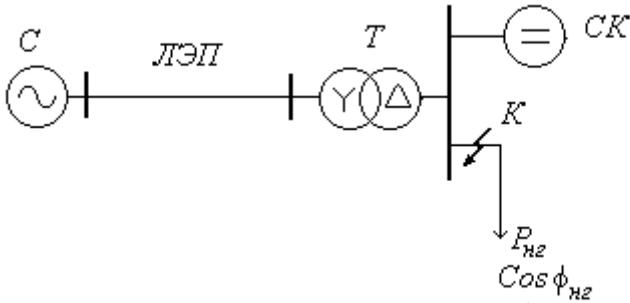


Рисунок 3.1 - Схема электроснабжения потребителя с компенсацией реактивной мощности.

## 2. Методические указания

Сверхпереходные ЭДС системы и СК определить по формуле:

$$E'' = U_H + I \cdot x_d''$$

Считать, что СК поддерживает на шинах напряжение  $U_{н,ск}$ , при этом его ток составляет 80% от номинального.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №4 «ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА ПРИ НЕСИММЕТРИЧНОМ КРОТКОМ ЗАМЫКАНИИ»

***Цель работы:*** Ознакомиться с переходным процессом при несимметричном коротком замыкании и выполнить его исследование на ЭВМ.

### 1. Теоретические сведения

В трехфазных системах с заземленной нейтралью различают три вида несимметричных КЗ в одной точке: двухфазное, однофазное и двухфазное на землю. В системах с изолированной нейтралью из перечисленных несимметричных КЗ возможно только двухфазное.

На рис.4.1 приведена схема замещения для моделирования различных видов несимметричных КЗ, где  $L$  – индуктивность одной фазы,  $M$  – взаимная индуктивность между фазами и  $r$  – активное сопротивление фазы .

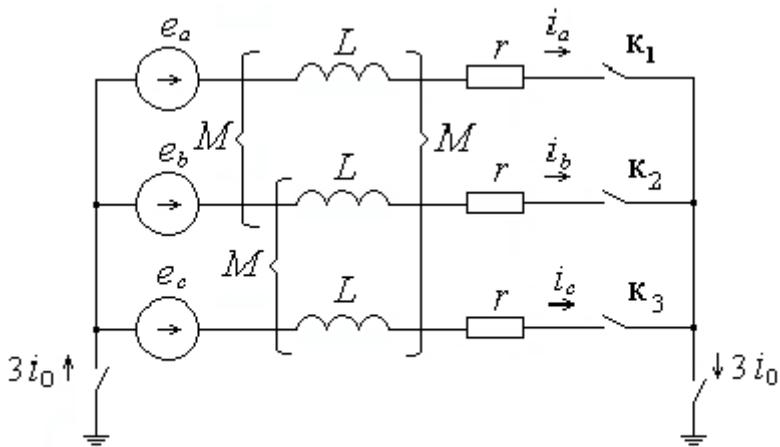


Рисунок 4.1 – Схема замещения при различных видах КЗ

Система дифференциальных уравнений, описываемая возможные КЗ в одной точке имеет вид:

$$\begin{cases} e_a = r i_a + L \frac{d i_a}{d t} + M \frac{d i_b}{d t} + M \frac{d i_c}{d t} \\ e_b = r i_b + L \frac{d i_b}{d t} + M \frac{d i_a}{d t} + M \frac{d i_c}{d t} \\ e_c = r i_c + L \frac{d i_c}{d t} + M \frac{d i_a}{d t} + M \frac{d i_b}{d t} \\ i_0 = \frac{1}{3} (i_a + i_b + i_c) \end{cases} \quad (1)$$

В справочной литературе для элементов электрической сети даются сопротивления прямой и нулевой последовательности  $x_1$  и  $x_0$ . по этим сопротивлениям легко определяются индуктивность прямой последовательности

$$L_1 = \frac{x_1}{\omega}$$

и индуктивность нулевой последовательности

$$L_0 = \frac{x_0}{\omega}$$

Очевидно, что систему (1) необходимо преобразовать так, чтобы в ней вместо  $L$  и  $M$  использовались  $L_1$  и  $L_0$ . Из метода симметричных составляющих для трехфазных цепей известно, что индуктивность прямой и нулевой последовательностей для одной фазы определяется:

$$L_1 = L - M \quad \text{и} \quad L_0 = L_1 + 3M \quad (2)$$

С учетом (2) система уравнений (1) после преобразований принимает вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} e_a = r i_a + L_1 \frac{d i_a}{d t} + (L_0 - L_1) \frac{d i_0}{d t} \\ e_b = r i_b + L_1 \frac{d i_b}{d t} + (L_0 - L_1) \frac{d i_0}{d t} \\ e_c = r i_c + L_1 \frac{d i_c}{d t} + (L_0 - L_1) \frac{d i_0}{d t} \\ i_0 = \frac{1}{3} (i_a + i_b + i_c) \end{array} \right. \quad (3)$$

## 2. Моделирование двухфазного КЗ на землю.

При конкретном несимметричном КЗ система уравнений (3) упрощается. Например, при двухфазном КЗ фаз В и С на землю ток  $i_A = 0$  и система уравнений имеет вид:

## Электромагнитные переходные процессы

$$\begin{cases} e_b = r i_b + L_1 \frac{d i_b}{d t} + (L_0 - L_1) \frac{d i_0}{d t} \\ e_c = r i_c + L_1 \frac{d i_c}{d t} + (L_0 - L_1) \frac{d i_0}{d t} \\ i_0 = \frac{1}{3} (i_b + i_c) \end{cases} \quad (4)$$

Однако, если эту систему уравнений преобразовать к интегральному виду и составить структурную схему модели, то последняя будет содержать замкнутые контуры без инерционных элементов, что приведет к неустойчивости решения задачи. Для исключения этого решаем систему уравнений (4) относительно производных токов в фазах. Для этого подставим выражение для тока нулевой последовательности  $i_0$  в первые два уравнения системы:

$$\begin{cases} e_b = r i_b + L_1 \frac{d i_b}{d t} + \frac{(L_0 - L_1)}{3} \frac{d i_b}{d t} + \frac{(L_0 - L_1)}{3} \frac{d i_c}{d t} \\ e_c = r i_c + L_1 \frac{d i_c}{d t} + \frac{(L_0 - L_1)}{3} \frac{d i_b}{d t} + \frac{(L_0 - L_1)}{3} \frac{d i_c}{d t} \end{cases}$$

Получили систему из двух уравнений с двумя неизвестными:

$$\frac{d i_b}{d t} \text{ и } \frac{d i_c}{d t},$$

Решаем ее относительно производных как алгебраическую систему уравнений и получаем:

$$\begin{cases} \frac{d i_b}{d t} = c_1 (e_b - r i_b) + c_2 (e_c - r i_c) \\ \frac{d i_c}{d t} = c_2 (e_b - r i_b) + c_1 (e_c - r i_c) \end{cases} \quad (5)$$

где  $c_1 = \frac{2L_1 + L_0}{L_1(L_1 + 2L_0)}$ ,  $c_2 = \frac{L_1 - L_0}{L_1(L_1 + 2L_0)}$ .

Преобразуем систему уравнений (5) к интегральному виду:

$$\begin{cases} i_b = \int_0^t [c_1(e_b - ri_b) + c_2(e_c - ri_c)] dt + i_{b0} \\ i_c = \int_0^t [(e_b - ri_b)c_2 + (e_c - ri_c)c_1] dt + i_{c0} \end{cases} \quad (6)$$

$$i_0 = \frac{1}{3}(i_b + i_c)$$

Структурная схема для решения системы (6) показана на рис.

4.2.

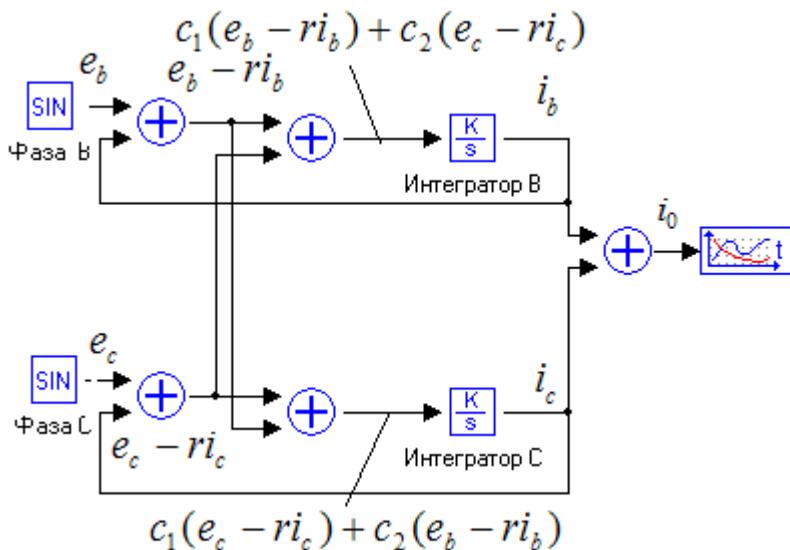


Рис.4.2. Структурная схема модели двухфазного кз на землю.

### 3. Задание.

- Изучить теоретическое описание переходного процесса.
- Ознакомиться с моделированием переходного процесса на ЭВМ.
- Для электрической сети в л.р.№2 ( $x_0/x_1=35$ ) определить параметры структурной схемы и набрать ее на ЭВМ.
- Зарисовать токи  $i_b$ ,  $i_c$  и  $i_0$ , и определить ударный ток КЗ в земле и амплитуду тока в земле в установившемся режиме.
- Выполнить контрольный расчет амплитуды установившегося тока КЗ в земле по формуле:

$$I_{0m} = \frac{3E}{x_1 + 2x_0}$$

и сравнить с полученным на ЭВМ.

### 4. Содержание и оформление отчета.

- Описание работы (цель, задание, структурная схема).
- Расчет параметров структурной схемы.
- Графики токов  $i_b$ ,  $i_c$  и  $i_0$ .
- Контрольный расчет тока  $I_{0m}$ .
- Выводы.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №5 «ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДА ОДНОФАЗНОГО КЗ В ДВУХФАЗНОЕ И ТРЕХФАЗНОЕ»

**Цель работы:** Самостоятельно поставить эксперимент по исследованию переходных процессов при изменении вида повреждения.

### 1. Исходные данные

Моделирование осуществить для схемы, исследованной в л. р. № 2 и л. р. № 4.

### 2. Методические указания

Для построения модели необходимо привести систему (3) из лабораторной работы 4 к виду аналогичному системе (6) этой же работы, но уже для всех трех фаз.

В фазы В и С модели необходимо включить реле, которые, через заданное время последовательно подключат интеграторы этих фаз.

Особое внимание необходимо уделить исследованию тока КЗ в земле, задаваясь различными временами перехода одного вида КЗ в другой.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №6 «ИССЛЕДОВАНИЕ ВКЛЮЧЕНИЯ ОДНОФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА»

**Цель работы:** Ознакомиться с переходным процессом включения однофазного трансформатора под напряжение и исследовать этот процесс на ЭВМ.

### 1. Общие сведения

При включении под напряжение силовых трансформаторов и автотрансформаторов или при восстановлении напряжения после отключения внешнего короткого замыкания в обмотке, присоединенной к питающей сети, при определенных условиях происходит резкое увеличение тока. В данной лабораторной работе исследуется ток включения однофазного силового трансформатора.

Бросок тока намагничивания (тока включения) возникает тогда, когда мгновенное значение вынужденного магнитного потока в сердечнике, определяемое напряжением сети в момент включения, не равно остаточному потоку. Ток включения тем больше, чем больше разница между этими потоками.

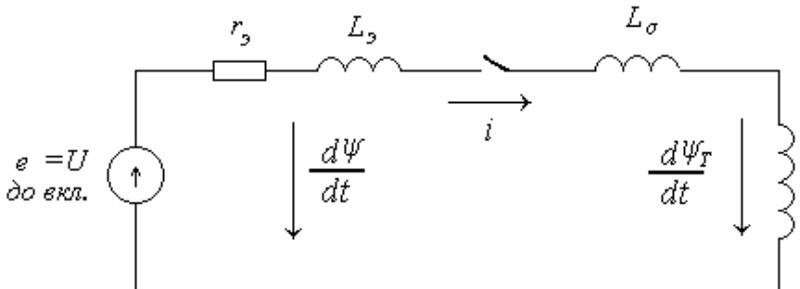
На рис.6.1 приведена схема замещения при включении однофазного трансформатора.

Здесь  $r_3$  и  $L_3$  - эквивалентные активное сопротивление и индуктивность системы;  $e = E_m \sin(\omega t + \alpha)$  - э.д.с. системы с амплитудой  $E_m$ , частотой  $\omega$  и фазой  $\alpha$  в момент включения трансформатора;  $L_\sigma$  - индуктивность рассеяния первичной обмотки трансформатора.

Суммарное потокоцепление в контуре будет определяться выражением:

$$\psi(i) = (L_3 + L_\sigma) \cdot i + \psi_m(i) \quad (1)$$

где  $\psi_m(i)$  - потокоцепление первичной обмотки трансформатора,



обусловленное магнитным потоком замыкающимся по сердечнику. Рисунок 6.1 - Схема замещения включения однофазного силового трансформатора под напряжение.

Зависимость  $\psi_m(i)$  - нелинейная и может быть аппроксимирована ломаной линией с вертикальным участком до потокоцепления насыщения  $\psi_s$ , тогда при насыщении магнитопровода трансформатора выражение (1) можно переписать следующим образом:

$$\psi(i) = (L_3 + L_6) i + \psi_s \quad (2)$$

где  $L_6$  - индуктивность первичной обмотки в воздухе;  $\psi_s$  - потокоцепление насыщения трансформатора.

## 2. Моделирование переходного процесса

Процессы в трансформаторе описываются дифференциальным уравнением:

$$r_{\Sigma} i + \frac{d\psi}{dt} = e, \quad (3)$$

где  $i=f(\psi)$  – нелинейная функция.

Решаем это уравнение относительно производной

$$\begin{cases} \frac{d\psi}{dt} = e - r_{\Sigma} i \\ i = f(\psi) \end{cases} \quad (4)$$

и интегрируем

$$\begin{cases} \psi = \int_0^t (e - r_{\Sigma} i) dt + \psi_{(0)} \\ i = f(\psi) \end{cases} \quad (5)$$

Для моделирования нелинейной функции  $i = f(\psi)$  используем блок "Линейное с зоной нечувствительности" на вкладке "Нелинейные", характеристика которого приведена на рис. 6.2.

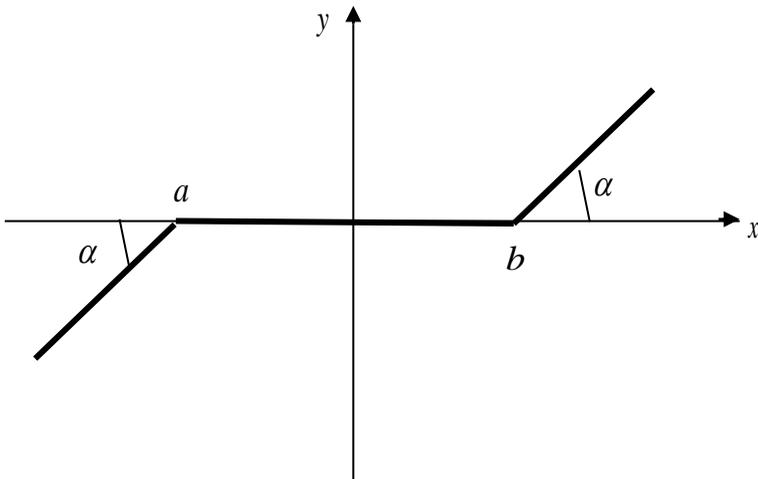


Рисунок 6.1 - Характеристика нелинейного блока.

Зона нечувствительности ограничена точками  $a$  и  $b$ . Наклон левого и правого участков  $K=tg\alpha$ . Уравнения этих трех участков следующие.

$$y(t)=K*[x(t)-a], \text{ если } x(t) < a.$$

$$y(t)=0, \text{ если } a \leq x(t) \leq b.$$

$$y(t)=K*[x(t)-b], \text{ если } x(t) > a.$$

Связь между нелинейной функцией исследуемого процесса  $i=f(\psi)$  и нелинейным блоком построим используя формулу (2) :

$$i = \frac{1}{L_s + L_g} f_M(\psi), \quad (6)$$

где  $f_M(\psi) = \psi(i) - \psi_s$ .

Параметры блока будут следующие:

$$x_1 = \psi(i), \quad a = \psi_s \text{ и } b = -\psi_s, \quad K = 1/(L_s + L_g)$$

Отсюда, система уравнений (5) с учетом (6) будет иметь вид:

$$\begin{cases} \psi = \int_0^t (e - r_s i) dt + \psi_r \\ i = K \cdot f_M(\psi) \end{cases} \quad (7)$$

где  $\psi_r$  – остаточное потокоцепление трансформатора.

По системе уравнений (7) составляем структурную модель для исследования тока включения трансформатора:

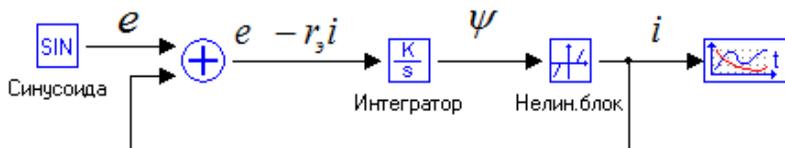


Рисунок 6.2 - Структурная схема модели включения однофазного силового трансформатора

### 3. Задание

- Изучить теоретическое описание переходного процесса при включении однофазного силового трансформатора.

## Электромагнитные переходные процессы

- Ознакомится с моделированием тока включения на ЭВМ.
- Для электрической сети с параметрами  $E_m$ ,  $I_{\Sigma}$ ,  $X_{\Sigma}$  и силового трансформатора с  $x_{tr}$  определить параметры структурной схемы и набрать ее на ЭВМ (параметры дается преподавателем в зависимости от варианта).
- С помощью ЭВМ получить и зарисовать ток включения при начальной фазе ЭДС  $\sigma=0^\circ$  и  $\sigma=45^\circ$ .
- Построить зависимость максимального тока от времени при  $\sigma=0^\circ$ . Выполнить контрольный расчет максимального тока включения  $i_{\max}$  по формуле:

$$i_{\max} = \frac{E_m}{x_{\Sigma} + x_g} (1 + A),$$

$$\text{где } A = 1 - \frac{\psi_s - \psi_r}{\psi_m}$$

#### 4. Методические указания

Остаточный поток и поток насыщения принять равными:

$$\psi_r = 0,8\psi_m \quad \text{и} \quad \psi_s = 1,2\psi_m,$$

где амплитуда потокосцепления определяется по формуле:

$$\psi_m = \frac{E_m}{\omega}$$

Сопротивление катушки трансформатора в воздухе принять равным

$$x_g = 0,75x_{mp}$$

#### 5. Содержание и оформление отчета

- Описание работы (цель, задание, схемы).
- Расчет параметров структурной схемы.
- Графики токов включения.
- Зависимость максимального тока включения от времени.
- Контрольный расчет первого максимального тока включения. Выводы.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №7 «ИССЛЕДОВАНИЕ БРОСКА ТОКА НАМАГНИЧИВАНИЯ ТРЕХФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА»

**Цель работы:** Самостоятельно выполнить постановку эксперимента по исследованию переходных процессов при включении трехфазного силового трансформатора.

### 1. Исходные данные

Параметры сети взять из л.р. №6, а параметры трансформатора – из л.р. №3.

### 2. Методические указания

Исследование переходного процесса необходимо проводить во всех трех фазах. Для этого следует разработать модель включения трехфазного силового трансформатора. Выявить влияние угла  $\alpha$  на характер переходного процесса. Обратить внимание на изменение периодической слагающей тока включения.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ульянов С. А. Электромагнитные переходные процессы. М.: Энергия, 1970, с. 519.
2. Дроздов А. Д. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах. Новочеркасск: НПИ. 1976, с. 79.
3. Дроздов А. Д. Несимметричные переходные режимы в электрических системах и цепях релейной защиты. Новочеркасск: НПИ, 1977, с. 75.