МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Кумертауский филиал

федерального государственного

бюджетногообразовательного учреждения

высшего профессионального образования

«Оренбургский государственный университет»

(Кумертауский филиал ОГУ)

Транспортно-энергетический факультет

Кафедра электроснабжения промышленных предприятий

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к выполнению курсовой работы по дисциплине

«Теоретические основы электротехники»

*(заочная форма обучения)*

Кумертау

Оглавление

[**1 Задание к курсовой работе** 3](#_Toc375555418)

[**1.1 Задача 1. « Анализ трехфазной цепи при различных схемах соединения нагрузки»** 3](#_Toc375555419)

[**1.2 Задача 2 «Анализ линейной электрической цепи с несинусоидальным источником»** 7](#_Toc375555420)

[**1.3 Задача 3 «Переходные процессы в линейной электрической цепи с сосредоточенными параметрами»** 19](#_Toc375555421)

[**2 Краткие теоретические сведения и примеры решения** 26](#_Toc375555422)

[**2.1 Трехфазные цепи** 26](#_Toc375555423)

[2.1.1 Основные сведения о трехфазных цепях 26](#_Toc375555424)

[2.1.2 Основные формулы и алгоритмы для трехфазных цепей 30](#_Toc375555425)

[2.1.3 Пример решения задачи 1 32](#_Toc375555426)

[**2.2 Цепи несинусоидального тока** 34](#_Toc375555427)

[2.2.1 Гармонический анализ и разложение функций 34](#_Toc375555428)

[2.2.2 Действующее и среднее значения несинусоидальных величин 35](#_Toc375555429)

[2.2.3 Особенности расчета линейной электрической цепи с несинусоидальными источниками 37](#_Toc375555430)

[2.2.4 Мощность при несинусоидальных напряжениях и токах 38](#_Toc375555431)

[2.2.5 Пример решения задачи 2 39](#_Toc375555432)

[**2.3 Переходные процессы** 46](#_Toc375555433)

[2.3.1 Основные определения. Законы коммутации. 46](#_Toc375555434)

[2.3.2 Определение принужденных составляющих 47](#_Toc375555435)

[2.3.3 Начальные условия 49](#_Toc375555436)

[2.3.4 Операторный метод расчета переходных процессов 51](#_Toc375555437)

[2.3.4.1 Математические основы метода.  Алгоритм расчета переходного процесса операторным методом 51](#_Toc375555438)

[2.3.4.2 Операторная схема замещения 53](#_Toc375555439)

[2.3.4.3 Переход от изображения к оригиналу 55](#_Toc375555440)

# **1 Задание к курсовой работе**

## **1.1 Задача 1. « Анализ трехфазной цепи при различных схемах соединения нагрузки»**

Обмотки трехфазного генератора с симметричной системой фазных напряжений *Uфг* соединены звездой. Даны три схемы соединения нагрузки (рис.1.1): звезда с нулевым проводом; звезда; треугольник.

A

B

С



A

B

C



A

B

C



О



а) звезда с нулевым проводом б) звезда в) треугольник

Рисунок 1.1

Для каждой схемы:

1) рассчитать все токи;

2) проверить баланс комплексной мощности;

3) построить векторную диаграмму напряжений и токов.

Параметры схемы выбираются из таблицы 1.1 по номеру варианта, задаваемому преподавателем.

Таблица 1.1- Таблица параметров к задаче 1

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Номер варианта | Фазное напряжение генератора | Сопротивления фаз | | | | | | | | |
| Фаза А (ав) | | | Фаза В (вс) | | | Фаза С (са) | | |
| *Uфг* | *RA* | *xLA* | *xCA* | *RB* | *xLB* | *xCB* | *RC* | *xLC* | *xCC* |
| В | Ом | Ом | Ом | Ом | Ом | Ом | Ом | Ом | Ом |
| 1 | 127 | 25 | 10 | - | 30 | 20 | - | 10 | - | 5 |
| 2 | 220 | 30 | - | 20 | 45 | - | - |  | 10 | - |
| 3 | 380 | - | 30 | - | 50 | 50 | 10 | 25 | - | 5 |
| 4 | 660 | 55 | 40 | - | 60 | - | - | 25 | 5 | 20 |
| 5 | 127 | 40 | - | 50 | 55 | 60 | - | 20 | - | - |
| 6 | 220 | 30 | 40 | 20 | - | 30 | - | 20 | 10 | - |
| 7 | 380 | 25 | - | - | 30 | - | 40 | 10 | 15 | 30 |
| Продолжение таблицы 1.1 | | | | | | | | | | |
| Номер варианта | Фазное напряжение генератора | Сопротивления фаз | | | | | | | | |
| Фаза А (ав) | | | Фаза В (вс) | | | Фаза С (са) | | |
| *Uфг* | *RA* | *xLA* | *xCA* | *RB* | *xLB* | *xCB* | *RC* | *xLC* | *xCC* |
| В | Ом | Ом | Ом | Ом | Ом | Ом | Ом | Ом | Ом |
| 8 | 660 | - | - | 60 | 70 | 80 | - | 40 |  | 50 |
| 9 | 127 | 10 | 20 | - | 25 | 30 |  | 15 | 10 | - |
|  | 220 | 25 | 5 | 20 | 30 | - | 20 | - | - | 25 |
|  | 380 | 25 | 15 | - | 35 | - | - | 15 |  | 10 |
|  | 660 | 55 | 45 | - | 45 | 55 | 25 | 20 |  | 20 |
|  | 127 | 20 | - | 10 | 30 | 20 |  | 10 | 30 | 10 |
|  | 220 | 30 | - | - | 40 | 30 | - | 15 | - | 20 |
|  | 380 | 40 | 50 | 20 | 50 | - | 40 | - | 35 | - |
|  | 660 | 70 | - | 85 | 55 | 65 | - | 75 | - | - |
|  | 127 | 45 | - | - | 30 | 30 | - | 20 | - | 10 |
|  | 220 | 50 | 40 | 10 | 60 | - | 60 | 25 | - | - |
|  | 380 | 60 | - | - | - | 50 | - | 25 | 10 | - |
|  | 660 | 55 | 60 | - | 50 | - | 30 | 25 | 15 | - |
|  | 127 | - | 30 | - | 20 | 40 | - | 30 | - | - |
|  | 220 | 30 | 30 | - | 45 | - | - | 30 | - | 20 |
|  | 380 | 50 | - | 40 | 40 | 50 | 20 | - | 35 | - |
|  | 660 | 70 | 50 | - | 30 | - | 45 | 35 | - | - |
|  | 127 | - | - | 20 | 20 | 30 | - | 40 | - | 50 |
|  | 220 | 35 | - | - | 50 | - | 40 | 40 | 30 | 10 |
|  | 380 | 45 | 55 | 20 | 30 | - | 50 | 50 | 40 | - |
|  | 660 | 80 | 85 | 20 | 60 | - | - | - | 75 | - |
|  | 127 | 40 | 30 | - | 45 | - | 25 | - | - | 45 |
|  | 220 | 50 | - | 40 | 45 | 50 | - | 75 | - | - |
|  | 127 | 25 | 10 | - | 30 | 20 | - | 10 | - | 5 |
|  | 220 | 30 | - | 20 | 45 | - | - |  | 10 | - |
|  | 380 | - | 30 | - | 50 | 50 | 10 | 25 | - | 5 |
|  | 660 | 55 | 40 | - | 60 | - | - | 25 | 5 | 20 |
|  | 127 | 40 | - | 50 | 55 | 60 | - | 45 | - | - |
| Продолжение таблицы 1.1 | | | | | | | | | | |
| Номер варианта | Фазное напряжение генератора | Сопротивления фаз | | | | | | | | |
| Фаза А (ав) | | | Фаза В (вс) | | | Фаза С (са) | | |
| *Uфг* | *RA* | *xLA* | *xCA* | *RB* | *xLB* | *xCB* | *RC* | *xLC* | *xCC* |
| В | Ом | Ом | Ом | Ом | Ом | Ом | Ом | Ом | Ом |
|  | 220 | 30 | 40 | 20 | - | 30 | - | 45 | 10 | - |
|  | 380 | 25 | - | - | 30 | - | 40 | 30 | 15 | 20 |
|  | 660 | - | - | 60 | 70 | 80 | - | 45 |  | 20 |
|  | 127 | 10 | 20 | - | 25 | 30 |  | 50 | 10 | - |
|  | 220 | 25 | 5 | 50 | 30 | - | 20 | 60 | - | 40 |
|  | 380 | 25 | 15 | - | 35 | - | - | 55 |  | - |
|  | 660 | 55 | 45 | 60 | 45 | 55 | 25 | 20 |  | 20 |
|  | 127 | 20 | - | 30 | 30 | 20 |  | 10 | 30 | - |
|  | 220 | 30 | - | - | 40 | 30 | - | 15 | - | - |
|  | 380 | 40 | 50 | 80 | 50 | - | 40 | - | 35 | 50 |
|  | 220 | 25 | 25 | 20 | 30 | - | 20 | - | - | 25 |
|  | 380 | 25 | 25 | - | 35 | - | - | 15 |  | 10 |
|  | 660 | 55 | 30 | - | 45 | 55 | 25 | 20 |  | 20 |
|  | 127 | 30 | 30 | 10 | 30 | 20 | 10 | 10 | 30 | 10 |
|  | 220 | 35 | - | - | 40 | 30 | 20 | 15 | - | 20 |
|  | 380 | 45 | 35 | 20 | 50 | - | 10 | - | 35 | - |
|  | 660 | 30 | 40 | 85 | 55 | 65 | 20 | 75 | - | - |
|  | 127 | 40 | 40 | - | 30 | 30 | - | 20 | - | 10 |
|  | 220 | 50 | 25 | 10 | 60 | - | - | 25 | - | - |
|  | 380 | 55 | - | - | - | 50 | 10 | 25 | 10 | - |
|  | 660 | 60 | 50 | - | 35 | - | 30 | 25 | 15 | - |
|  | 127 | 30 | 20 | - | 40 | 40 | - | 30 | - | - |
|  | 220 | 30 | 45 | - | 40 | - | - | 30 | - | 40 |
|  | 380 | - | 40 | 40 | 50 | 50 | 20 | - | 35 | 40 |
|  | 660 | 50 | 30 | - | 35 | - | 45 | 35 | - | 50 |
|  | 127 | - | 20 | 20 | 40 | 30 | - | 40 | - | - |
|  | 220 | - | 50 | - | 50 | - | 40 | 40 | 30 | - |
| Продолжение таблицы 1.1 | | | | | | | | | | |
| Номер варианта | Фазное напряжение генератора | Сопротивления фаз | | | | | | | | |
| Фаза А (ав) | | | Фаза В (вс) | | | Фаза С (са) | | |
| *Uфг* | *RA* | *xLA* | *xCA* | *RB* | *xLB* | *xCB* | *RC* | *xLC* | *xCC* |
| В | Ом | Ом | Ом | Ом | Ом | Ом | Ом | Ом | Ом |
|  | 380 | 55 | 30 | 20 | 30 | - | 50 | 50 | 40 | 75 |
|  | 660 | 85 | 60 | 20 | 60 | - | - | - | 75 | 25 |
|  | 127 | 30 | 45 | - | 45 | - | 25 | - | - | 25 |
|  | 220 | - | - | 40 | 45 | 50 | - | 75 | - | - |
|  | 380 | - | 30 | 25 | - | 50 | - | 25 | 10 | - |
|  | 660 | 65 | 60 | - | 55 | - | 35 | 25 | 15 | - |
|  | 127 | - | 35 | - | 20 | 40 | - | 35 | - | - |
|  | 220 | 60 | 20 | 15 | 40 | 15 | 10 | 25 | - | - |
|  | 380 | 50 | - | 20 | 20 | 50 | 15 | 25 | 10 | 5 |
|  | 660 | 55 | - | 10 | 40 | - | 20 | 35 | 25 | - |
|  | 127 | 40 | 20 | - | 40 | 20 | 10 | 15 | 10 | 5 |
|  | 220 | 30 | 20 | 10 | 45 | - | 10 | 5 | 10 | - |
|  | 380 | - | 20 | 15 | 50 | 40 | 10 | 20 | 10 | 5 |
|  | 660 | 55 | 20 | 15 | 60 | 30 | - | 20 | 5 | 20 |
|  | 127 | 45 | - | - | 30 | 30 | - | 20 | - | 10 |
|  | 220 | 50 | 40 | 10 | 60 | - | 60 | 25 | - | - |
|  | 380 | 60 | - | - | - | 50 | - | 25 | 10 | - |
|  | 660 | 50 | - | 60 | 60 | 80 | 30 | 40 | 15 | 20 |

## **1.2 Задача 2 «Анализ линейной электрической цепи с несинусоидальным источником»**

В линейной электрической цепи, схема и параметры которой приведены ниже, действует источник несинусоидального напряжения. Форма ЭДС задана.

Требуется:

1. Представить ЭДС источника, заданную графически, рядом Фурье.
2. Для дальнейших расчетов ограничить число членов ряда постоянной составляющей и тремя – пятью гармониками.
3. Построить графики спектров амплитуд и начальных фаз ЭДС источника.
4. Определить погрешность в определении действующего значения ЭДС, возникающую за счет ограничения числа гармоник ряда.
5. На одном графике построить кривую исходной несинусоидальной ЭДС и кривую, полученную в результате сложения гармонических составляющих ограниченного ряда.
6. Для каждой гармоники, включая постоянную составляющую, рассчитать токи ветвей. При расчете каждой гармоники выполнить построение векторных диаграмм токов соответствующих гармоник и проверить правильность расчётов балансом мощности.
7. Записать мгновенные значения токов ветвей в виде ряда Фурье.
8. Определить действующие значения токов ветвей, активную, реактивную, полную мощности цепи, а также мощность искажения и коэффициент мощности.

График несинусоидальной ЭДС источника (таблица 1.2) и электрическая схема (таблица 1.3) выбираются по номеру в списке журнала группы. Параметры схемы выбираются из таблицы 1.4 по варианту, назначаемому преподавателем.

Способ представления ЭДС источника рядом Фурье (с использованием готовых формул из таблицы 1.4 или разложение в ряд с помощью компьютерного пакета MathCad) задается преподавателем.

Таблица 1.2 – Варианты несинусоидальной ЭДС источника

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| График несинусоидальной ЭДС,  формула разложения функции в ряд Фурье | | График несинусоидальной ЭДС,  формула разложения функции в ряд Фурье | |
| **1** |  | **2** |  |
|  | |  | |
| **3** |  | **4** |  |
|  | |  | |
| **5** |  | **6** |  |
|  | |  | |
| Продолжение таблицы 1.3 | | | |
| **7** |  | **8** |  |
|  | |  | |
| **9** |  | **10** |  |
|  | |  | |
| **11** |  | **12** |  |
|  | |  | |
| Продолжение таблицы 1.3 | | | |
| **13** |  | **14** |  |
|  | |  | |
| **15** |  | **16** |  |
|  | |  | |
| **17** |  | **18** |  |
|  | |  | |
| Продолжение таблицы 1.3 | | | |
| **19** |  | **20** |  |
|  | |  | |
| **21** |  | **22** |  |
|  | |  | |
| **23** |  | **24** |  |
|  | |  | |
| Продолжение таблицы 1.3 | | | |
| **25** |  | **26** |  |
|  | |  | |
| **27** |  | **28** |  |
|  | |  | |

Таблица 1.3 – Схемы электрических цепей

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Вари-ант | Схема | Вари-ант | Схема |
| 1 |  | 7 |  |
| 2 |  | 8 |  |
| 3 |  | 9 |  |
| 4 |  | 10 |  |
| 5 |  | 11 |  |
| 6 |  | 12 |  |

Продолжение таблицы 1.3

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Вари-ант | Схема | Вари-ант | Схема |
| 13 |  | 19 |  |
| 14 |  | 20 |  |
| 15 |  | 21 |  |
| 16 |  | 22 |  |
| 17 |  | 23 |  |
| 18 |  | 24 |  |

Продолжение таблицы 1.3

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Вари-ант | Схема | Вари-ант | Схема |
| 25 |  | 27 |  |
| 26 |  | 28 |  |

Таблица 1.4 – Параметры схемы цепи

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Вариант** | , В | , с | , Ом | , Ом | , Ом | , мГн | , мкФ |
| **1** | 200 | 0,4 | 10 | 10 | 20 | 30 | 30 |
| **2** | 250 | 0,5 | 12 | 12 | 10 | 40 | 25 |
| **3** | 300 | 0,6 | 15 | 10 | 15 | 20 | 30 |
| **4** | 200 | 0,7 | 10 | 14 | 12 | 15 | 44 |
| **5** | 350 | 0,8 | 14 | 8 | 10 | 25 | 60 |
| **6** | 200 | 0,9 | 9 | 13 | 9 | 10 | 55 |
| **7** | 300 | 1,0 | 20 | 15 | 4 | 26 | 60 |
| **8** | 400 | 1,1 | 10 | 14 | 8 | 40 | 70 |
| **9** | 250 | 1,2 | 12 | 15 | 15 | 20 | 50 |
| **10** | 350 | 1,3 | 8 | 25 | 20 | 30 | 40 |
| **11** | 200 | 1,4 | 15 | 10 | 20 | 28 | 55 |
| **12** | 300 | 1,5 | 14 | 18 | 6 | 24 | 70 |

Продолжение таблицы 1.4

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Вариант** | , В | , с | , Ом | , Ом | , Ом | , мГн | , мкФ |
| **13** | 320 | 1,6 | 9 | 10 | 10 | 25 | 45 |
| **14** | 340 | 1,7 | 14 | 12 | 8 | 35 | 60 |
| **15** | 360 | 1,8 | 10 | 20 | 12 | 35 | 60 |
| **16** | 200 | 1,9 | 25 | 9 | 30 | 20 | 40 |
| **17** | 250 | 2,0 | 30 | 20 | 15 | 35 | 75 |
| **18** | 240 | 0,4 | 12 | 10 | 30 | 25 | 25 |
| **19** | 220 | 0,6 | 16 | 15 | 12 | 20 | 50 |
| **20** | 200 | 0,8 | 20 | 16 | 20 | 25 | 60 |
| **21** | 400 | 1,4 | 10 | 10 | 20 | 30 | 30 |
| **22** | 300 | 1,5 | 12 | 12 | 10 | 40 | 25 |
| **23** | 200 | 1,6 | 10 | 15 | 15 | 20 | 30 |
| **24** | 350 | 1,7 | 14 | 10 | 12 | 15 | 44 |
| **25** | 300 | 1,8 | 8 | 14 | 10 | 25 | 60 |
| **26** | 240 | 1,9 | 13 | 9 | 9 | 10 | 55 |
| **27** | 320 | 2,0 | 15 | 20 | 4 | 26 | 60 |
| **28** | 380 | 0,4 | 10 | 10 | 8 | 40 | 70 |
| **29** | 200 | 0,4 | 20 | 10 | 10 | 30 | 30 |
| **30** | 350 | 1,3 | 20 | 25 | 12 | 30 | 40 |
| **31** | 200 | 1,4 | 20 | 10 | 15 | 28 | 55 |
| **32** | 300 | 0,6 | 15 | 10 | 10 | 20 | 30 |
| **33** | 250 | 1,2 | 15 | 15 | 14 | 20 | 50 |
| **34** | 200 | 0,7 | 12 | 14 | 9 | 15 | 44 |
| **35** | 360 | 1,8 | 12 | 20 | 20 | 35 | 60 |

Продолжение таблицы 1.4

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Вариант** | , В | , с | , Ом | , Ом | , Ом | , мГн | , мкФ |
| **36** | 250 | 0,5 | 10 | 12 | 10 | 40 | 25 |
| **37** | 350 | 0,8 | 10 | 8 | 12 | 25 | 60 |
| **38** | 320 | 1,6 | 10 | 10 | 8 | 25 | 45 |
| **39** | 200 | 0,9 | 9 | 13 | 15 | 10 | 55 |
| **40** | 400 | 1,1 | 8 | 14 | 14 | 40 | 70 |
| **41** | 340 | 1,7 | 8 | 12 | 9 | 35 | 60 |
| **42** | 300 | 1,5 | 6 | 18 | 14 | 24 | 70 |
| **43** | 300 | 1,0 | 10 | 15 | 10 | 26 | 30 |
| **44** | 240 | 0,4 | 30 | 10 | 10 | 25 | 25 |
| **45** | 300 | 1,5 | 10 | 12 | 12 | 40 | 30 |
| **46** | 250 | 0,5 | 10 | 12 | 15 | 40 | 44 |
| **47** | 300 | 0,6 | 15 | 10 | 10 | 20 | 60 |
| **48** | 400 | 1,4 | 20 | 10 | 14 | 30 | 55 |
| **49** | 200 | 1,6 | 15 | 15 | 9 | 20 | 60 |
| **50** | 200 | 0,4 | 20 | 10 | 20 | 30 | 70 |
| **51** | 200 | 1,9 | 30 | 9 | 10 | 20 | 50 |
| **52** | 350 | 1,7 | 12 | 10 | 12 | 15 | 40 |
| **53** | 200 | 0,7 | 12 | 14 | 8 | 15 | 55 |
| **54** | 220 | 0,6 | 12 | 15 | 15 | 20 | 70 |
| **55** | 240 | 1,9 | 9 | 9 | 14 | 10 | 30 |
| **56** | 200 | 0,8 | 20 | 16 | 10 | 25 | 25 |
| **57** | 320 | 2,0 | 4 | 20 | 12 | 26 | 60 |
| **58** | 300 | 1,8 | 10 | 14 | 15 | 25 | 60 |
| **59** | 380 | 0,4 | 8 | 10 | 10 | 40 | 70 |
| **60** | 250 | 2,0 | 15 | 20 | 14 | 35 | 75 |

Продолжение таблицы 1.4

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Вариант** | , В | , с | , Ом | , Ом | , Ом | , мГн | , мкФ |
| **61** | 200 | 0,6 | 25 | 15 | 20 | 20 | 50 |
| **62** | 400 | 1,2 | 15 | 10 | 25 | 30 | 40 |
| **63** | 300 | 1,5 | 10 | 12 | 15 | 45 | 25 |
| **64** | 200 | 1,4 | 14 | 10 | 20 | 20 | 35 |
| **65** | 350 | 1,6 | 12 | 14 | 12 | 15 | 40 |
| **66** | 300 | 1,7 | 10 | 12 | 14 | 20 | 50 |
| **67** | 240 | 1,8 | 15 | 10 | 9 | 20 | 45 |
| **68** | 320 | 1,9 | 15 | 24 | 6 | 30 | 60 |
| **69** | 380 | 0,6 | 20 | 14 | 8 | 35 | 65 |
| **70** | 200 | 0,8 | 26 | 12 | 20 | 30 | 70 |

## **1.3 Задача 3 «Переходные процессы в линейной электрической цепи с сосредоточенными параметрами»**

Для возникающего переходного процесса в электрической цепи требуется:

операторным методом рассчитать переходные токи во всех ветвях и переходное напряжение на реактивном элементе;

- построить графики тока и напряжения на реактивном элементе в функции времени t.

Схемы электрической цепи приведены в таблице 1.5, постоянное напряжение источника и параметры схемы заданы в таблице 1.6.

Номер схемы соответствует порядковому номеру, под которым фамилия студента записана в групповом журнале. Номер варианта параметров схемы из таблицы 1.6 назначается преподавателем.

Таблица 1.5

|  |  |
| --- | --- |
| Вариант, схема | Вариант, схема |
| E  E  **1** | **2** |
| E **3** | E **4** |
| Продолжение таблицы 1.5 |  |
| Вариант, схема | Вариант, схема |
| E  *L*  E **5** | **6** |
| E  **7** | E **8** |
| **E  E 9** | **10** |
| **E  E  3  *R* 11** | **12** |
| Продолжение таблицы 1.5 |  |
| Вариант, схема | Вариант, схема |
| **E  E 13** | **14** |
| **E  E 15** | **16** |
| E  E  3  *R* **17** | **18** |
| **2  *R*  E  E 19** | **20** |
| Продолжение таблицы 1.5 |  |
| Вариант, схема | Вариант, схема |
| E **21**  E  E | **22** |
| E  3  *R* **23** | **24** |
| E  E **25** | **26** |
| ***L*  E  E 27** | **28** |

Таблица 1.6 – Параметры схемы к задаче 3

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| № варианта | Е,  B | r1,  Ом | r2,  Ом | r3,  Ом | L, Гн  в схемах с L | C, мкФ  в схемах с С |
|  | 100 | 100 | 100 | 200 | 0.2 | 50 |
|  | 200 | 150 | 200 | 100 | 0.8 | 40 |
|  | 300 | 80 | 100 | 200 | 0.4 | 60 |
|  | 400 | 100 | 150 | 120 | 0.6 | 100 |
|  | 500 | 80 | 200 | 120 | 0.3 | 80 |
|  | 150 | 120 | 100 | 200 | 0.5 | 50 |
|  | 250 | 50 | 100 | 100 | 0.9 | 90 |
|  | 120 | 120 | 200 | 150 | 0.7 | 80 |
|  | 220 | 150 | 120 | 200 | 0.4 | 40 |
|  | 180 | 50 | 120 | 100 | 0.5 | 60 |
|  | 220 | 150 | 120 | 200 | 0.4 | 40 |
|  | 150 | 120 | 100 | 200 | 0.5 | 50 |
|  | 300 | 80 | 100 | 200 | 0.4 | 60 |
|  | 100 | 100 | 100 | 200 | 0.2 | 50 |
|  | 120 | 120 | 200 | 150 | 0.7 | 80 |
|  | 500 | 80 | 200 | 120 | 0.3 | 80 |
|  | 400 | 100 | 150 | 120 | 0.6 | 100 |
|  | 180 | 50 | 120 | 100 | 0.5 | 60 |
|  | 250 | 50 | 100 | 100 | 0.9 | 90 |
|  | 200 | 150 | 200 | 100 | 0.8 | 40 |
|  | 100 | 200 | 100 | 100 | 0.2 | 50 |
|  | 100 | 100 | 100 | 150 | 0.2 | 50 |
|  | 120 | 200 | 200 | 80 | 0.7 | 80 |
|  | 120 | 120 | 200 | 100 | 0.7 | 80 |
|  | 150 | 120 | 100 | 80 | 0.5 | 50 |
|  | 150 | 200 | 100 | 120 | 0.5 | 50 |
|  | 180 | 100 | 120 | 50 | 0.5 | 60 |
|  | 180 | 150 | 120 | 120 | 0.5 | 60 |
|  | 200 | 200 | 200 | 150 | 0.8 | 40 |
|  | 200 | 100 | 200 | 50 | 0.8 | 40 |
| Продолжение таблицы 1.6 | | | | | | |
| № варианта | Е,  B | r1,  Ом | r2,  Ом | r3,  Ом | L, Гн  в схемах с L | C, мкФ  в схемах с С |
|  | 220 | 200 | 120 | 150 | 0.4 | 40 |
|  | 220 | 200 | 120 | 120 | 0.4 | 40 |
|  | 250 | 200 | 100 | 80 | 0.9 | 90 |
|  | 250 | 200 | 100 | 100 | 0.9 | 90 |
|  | 300 | 150 | 100 | 120 | 0.4 | 60 |
|  | 300 | 120 | 100 | 80 | 0.4 | 60 |
|  | 400 | 120 | 150 | 100 | 0.6 | 100 |
|  | 400 | 100 | 150 | 50 | 0.6 | 100 |
|  | 500 | 100 | 200 | 50 | 0.3 | 80 |
|  | 500 | 100 | 200 | 150 | 0.3 | 80 |
|  | 250 | 50 | 100 | 100 | 0.9 | 90 |
|  | 250 | 50 | 100 | 200 | 0.9 | 90 |
|  | 200 | 150 | 200 | 100 | 0.8 | 40 |
|  | 200 | 150 | 200 | 150 | 0.8 | 40 |
|  | 120 | 120 | 200 | 200 | 0.7 | 80 |
|  | 120 | 120 | 200 | 100 | 0.7 | 80 |
|  | 400 | 100 | 150 | 100 | 0.6 | 100 |
|  | 400 | 100 | 150 | 200 | 0.6 | 100 |
|  | 180 | 50 | 120 | 120 | 0.5 | 60 |
|  | 180 | 50 | 120 | 120 | 0.5 | 60 |
|  | 150 | 120 | 100 | 120 | 0.5 | 50 |
|  | 150 | 120 | 100 | 100 | 0.5 | 50 |
|  | 220 | 150 | 120 | 100 | 0.4 | 40 |
|  | 220 | 150 | 120 | 100 | 0.4 | 40 |
|  | 300 | 80 | 100 | 200 | 0.4 | 60 |
|  | 300 | 80 | 100 | 200 | 0.4 | 60 |
|  | 500 | 80 | 200 | 150 | 0.3 | 80 |
|  | 500 | 80 | 200 | 120 | 0.3 | 80 |
|  | 100 | 100 | 100 | 100 | 0.2 | 50 |
|  | 100 | 100 | 100 | 200 | 0.2 | 50 |

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Продолжение таблицы 1.6 | | | | | | |
| № варианта | Е,  B | r1,  Ом | r2,  Ом | r3,  Ом | L, Гн  в схемах с L | C, мкФ  в схемах с С |
|  | 100 | 120 | 100 | 250 | 0.3 | 50 |
|  | 200 | 170 | 200 | 120 | 0.7 | 45 |
|  | 300 | 90 | 120 | 170 | 0.6 | 60 |
|  | 400 | 150 | 150 | 100 | 0.5 | 120 |
|  | 500 | 100 | 200 | 150 | 0.4 | 70 |
|  | 150 | 120 | 110 | 180 | 0.6 | 60 |
|  | 250 | 80 | 120 | 100 | 0.8 | 80 |
|  | 120 | 110 | 180 | 130 | 0.7 | 90 |
|  | 220 | 140 | 120 | 200 | 0.6 | 60 |
|  | 180 | 60 | 100 | 130 | 0.6 | 50 |

# **2 Краткие теоретические сведения и примеры решения**

## **2.1 Трехфазные цепи**

### 2.1.1 Основные сведения о трехфазных цепях

**Трехфазная цепь** является частным случаем многофазных электрических систем, представляющих собой совокупность электрических цепей, в которых действуют ЭДС одинаковой частоты, сдвинутые по фазе относительно друг друга на определенный угол.

Каждую из частей многофазной системы, характеризующуюся одинаковым током, называют **фазой,** т.е. фаза – это участок цепи, относящийся к соответствующей обмотке генератора или трансформатора, линии и нагрузке.

Совокупности ЭДС (напряжений, токов) в трехфазных цепях называют **трёхфазной системой ЭДС** (напряжений, токов).

Под **трёхфазной симметричной системой ЭДС** (напряжений, токов) понимают совокупность трёх синусоидальных ЭДС (напряжений, токов) одинаковой частоты и амплитуды, сдвинутых по фазе на 120°.

Мгновенные значения симметричной системы трёхфазных ЭДС можно записать в следующем виде

 (2.1)



*t*









e, B

e

e

e

A

B

C

График мгновенных

значений **e**А, **e**В, **e**С представлен

на рисунке 2.1.

Рисунок 2.1

Комплексные действующие значения симметричной системы трёхфазных ЭДС

,  , . (2.2)

Векторная диаграмма ЭДС представлена на рисунке 2.2.

*A*

*B*

*C*

*E*

*.*

*.*

*.*

120

120

120

+1

+

*j*

*E*

*E*

Рисунок 2.2

Для симметричной системы ЭДС (напряжений, токов) справедливо соотношение

. (2.3)

Основные схемы соединения обмоток генераторов, обмоток трансформаторов, нагрузки в трехфазных цепях – **звезда и треугольник**.

Каждую обмотку генератора называют **фазой генератора**, напряжения на них – **фазными напряжениями генератора,** токи в них – **фазными токами генератора**.

Каждую нагрузку называют **фазой нагрузки**, напряжения на них – **фазными напряжениями нагрузки,** токи в них – **фазными токами нагрузки**.

Провода, соединяющие генератор и нагрузку называются **линейными проводами.** Токи, текущие по линейным проводам называются **линейными**. **Линейное напряжение** – это напряжение между линейными проводами.

При соединении звездой точку, в которой объединены три обмотки генератора, называют **нулевой точкой генератора**, точку в которой объединены три конца трёхфазной нагрузки - **нулевой точкой нагрузки**. Провод, соединяющий нулевые точки генератора и нагрузки называется **нулевым или нейтральным проводом**, ток в нем – **током нулевого провода**. Напряжениемежду нулевыми точкаминазывается **смещением нейтрали**.

**Активная мощность** трёхфазной цепи равна сумме активных мощностей фаз и активной мощности в сопротивлении, включенном в нулевой провод

 . (2.4)

**Реактивная мощность** трёхфазной цепи представляет собой сумму реактивных мощностей фаз и реактивной мощности в сопротивлении, включенном в нулевой провод

 . (2.5)

**Полная мощность**  (2.6)

Активная и реактивная мощности любой из фаз (например, фазы *А*)определяются как

 . (2.7)

 (2.8)

Для симметричного режима работы

 (2.9)

Следовательно

. (2.10)

Аналогично выражается и реактивная мощность

 . (2.11)

Полная мощность при симметричном режиме работы

. (2.12)

При проверке правильности расчета токов целесообразно составлять баланс комплексных мощностей источника и потребителя.

Для симметричного режима работы полная комплексная мощность источника будет рассчитываться как

, (2.13)

где - сопряженный комплекс фазного тока.

Полная комплексная мощность потребителя

 . (2.14)

Для несимметричного режима работы:

- полная комплексная мощность источника

 (2.15)

- в четырехпроводной сети полная комплексная мощность потребителя

 ; (2.16)

- в трехпроводной сети полная комплексная мощность потребителя

 . (2.17)

### 2.1.2 Основные формулы и алгоритмы для трехфазных цепей

Таблица 2.1 - Расчетные соотношения для трехфазной цепи при соединении нагрузки звездой и звездой с нулевым проводом

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Схема  соединения  нагрузки | Характерис-тика  схемы | Режим работы  схемы | Смещение нейтрали | Фазный и линейный токи | Ток нулевого провода |
| Звезда | - | симметричный |  | , | - |
| - | несимметричный |  |  | - |
| Звезда  с нулевым проводом |  | симметричный |  |  |  |
| несимметричный |  |
|  | симметричный |  |  |  |
| несимметричный |  |  |  |

Таблица 2.2 - Расчетные соотношения для трехфазной цепи при соединении нагрузки треугольником

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Схема  соединения  нагрузки | Характеристика  схемы | Фазный ток | Линейные токи |
| Треуголь-ник |  |  | ; ; .  При симметричном режиме работы |
|  | При наличии сопротивления линии традиционно применяют следующий алгоритм расчёта:   1. Преобразуют треугольник сопротивлений нагрузки в эквивалентную звезду     Для симметричной нагрузки .   1. В преобразованной схеме с нагрузкой, соединённой звездой, рассчитывают фазные (линейные) токи , ,  (см. расчётные формулы в таблице 2.1); 2. Определяют комплексные потенциалы  точек *а, b, с*, к которым присоединен треугольник сопротивлений нагрузки , **,** . 3. Рассчитывают фазные токи в нагрузке   ; ; .  Для симметричной нагрузки | |

### 2.1.3 Пример решения задачи 1

Исходные данные: *Uфг* = 1000 В;

*RA =* 100Ом; *xLA =* 100Ом;

*RB =* 100Ом; *xLB =* 100Ом; *xCB* = 50 Ом;

*RC =* 100Ом; *xLC =* 100Ом; *xCC* = 50 Ом.

Сопротивления фаз

*zА =* *RA + j xLA =*100 + 100jОм;

*zB =* *RB + j xLB - j xCB =*100 + 100j – 50j = 100 + 50jОм;

*zC =* *RC + j xLC - j xCC =*100 + 100j – 50j = 100 + 50jОм

**2.1.3.1 Схема нагрузки – звезда с нулевым проводом (рисунок 2.3)**

A

B

C



О



Так как сопротивление нулевого провода равно нулю, в любом режиме работы цепи (симметричном или несимметричном) фазные токи равны линейным токам и определяются как

 Рисунок 2.3 .

 ;

;

 .

Ток нулевого провода равен сумме токов всех фаз

 .

Баланс мощности:

- мощность источника



- мощность потребителей



 .

Порядок построения векторной диаграммы (рисунок 2.4):

- фазные напряжения генератора ;

- фазные токи , , ;

- ток нулевого провода (строится как сумма фазных токов) .

+11

+j















Рисунок 2.4

## **2.2 Цепи несинусоидального тока**

### 2.2.1 Гармонический анализ и разложение функций

На практике часто встречаются несинусоидальные периодические ЭДС и токи, которые изменяются во времени по не гармоническому закону, но значения которых регулярно повторяются через равные промежутки времени, называемые периодом - Т, как это показано на рисунке 2.5.



Рисунок 2.5

Несинусоидальные ЭДС и токи возникают в следующих случаях:

а) при включении в цепь переменного тока элемента с насыщенным стальным (ферромагнитным) сердечником;

б) при наличии нелинейных сопротивлений в цепи;

в) если источник ЭДС или источник тока выдаёт несинусоидальное напряжение или ток.

Далее рассмотрим анализ линейных электрических цепей, на входе которых действуют периодические несинусоидальные ЭДС и токи.

Из курса высшей математики известно, что любая периодическая функция  с периодом , удовлетворяющая условиям Дирихле (то есть имеющая на конечном интервале  конечное число максимумов, минимумов и разрывов первого рода), может быть разложена в ряд Фурье. Практически все периодические функции, используемые в электротехнике, условиям Дирихле удовлетворяют.

Периодическая несинусоидальная ЭДС в общем случае может быть представлена тригонометрическим рядом Фурье:

 (2.18)

где  - постоянная составляющая;

 - первая (основная) гармоническая составляющая, имеющая частоту ;

- при высшие гармонические составляющие (гармоники);

 - амплитуда k-й гармоники;

 - начальная фаза k-й гармоники.

 - номер гармоники.

Совокупность постоянной составляющей, основной гармоники и высших гармонических составляющих называется **спектром несинусоидальной величины.**

### 2.2.2 Действующее и среднее значения несинусоидальных величин

Периодическую несинусоидальную величину (например, ток) обычно характеризуют следующими значениями: максимальным , действующим , средним по модулю  и постоянной составляющей . **Действующее значение** несинусоидального тока определяется его среднеквадратическим (эффективным) значением за период:

. (2.19)

Если ряд Фурье для тока ограничить конечным числом членов , то выражение (2.34) после интегрирования принимает вид:

. (2.20)

Так как действующее значение гармонической составляющей , то:

, (2.21)

где  - постоянная составляющая,

, ,  - действующие значения гармоник тока.

Аналогичное выражение имеет действующее значение напряжения:

. (2.22)

Таким образом, действующее значение несинусоидальной электрической величины равно корню квадратному из суммы квадратов постоянной составляющей и действующих значений всех гармоник. Оно не зависит от начальных фаз гармоник.

Наряду с действующим значением в электротехнике используют понятие **среднего по модулю значения** функции. Оно, например, для тока, выражается интегралом вида: .

**Постоянная составляющая** представляет собой среднее значение функции за период:

 .

### 2.2.3 Особенности расчета линейной электрической цепи с несинусоидальными источниками

Расчет цепей, в которых действует один или несколько несинусоидальных источников периодических ЭДС и токов, раскладывается на три этапа;

1. Разложение ЭДС и токов источников на постоянную и синусоидальные составляющие (при этом ограничиваемся *некоторым числом гармоник)*;
2. Применение принципа наложения и расчет токов и напряжений в цепи для каждой из составляющих в отдельности при этом, учитываем что структура цепи сохраняется, а *сопротивления и проводимости реактивных элементов изменяются* с изменением частоты гармоники;
3. Совместное рассмотрение решений, полученных для каждой из составляющих.

Рассмотрим каждый из этих этапов подробнее.

1) Если ЭДС изменяется по закону

, (2.23)

то действие источника такой ЭДС аналогично действию трёх последовательно соединённых источников ЭДС:

. (2.24)

Если задача поставлена иначе: заданы не ЭДС, а токи несинусоидальных источников тока, то принцип решения задачи остаётся тем же. Источник несинусоидального тока всегда можно представить в виде параллельного соединения ряда источников тока. Если к узлам ветви или выходам двухполюсника подводится несинусоидальный ток

, (2.25)

то источник такого тока действует подобно параллельному соединению трёх источников:

 (2.26)

2) Применив принцип наложения, и, рассмотрев действие каждой составляющей ЭДС в отдельности, можно найти составляющие токов на всех участках цепи.

При рассмотрении каждой составляющей спектра необходимо учитывать, что для различных частот индуктивные и ёмкостные сопротивления неодинаковы:

; (2.27)

. (2.28)

3)  Мгновенные значения тока в любой ветви электрической цепи можем определить на основании принципа наложения:

. (2.29)

Зная мгновенное значение тока, можем определить действующее:

. (2.30)

### 2.2.4 Мощность при несинусоидальных напряжениях и токах

Под **активной мощностью** (Р, Вт) несинусоидального тока понимают среднее значение мгновенной мощности за период первой гармоники:

. (2.31)

, (2.32)

где  - угол между  и .

Таким образом, активная мощность несинусоидального тока равна сумме активных мощностей отдельных гармоник.

Аналогично выводится понятие **реактивной мощности**(Q, ВАр):

. (2.33)

**Полная мощность (**S, ВА) равна произведению действующего значения несинусоидального напряжения на действующее значение несинусоидального тока:

, (2.34)

где ; .

В цепях c несинусоидальными токами в отличие от синусоидальных цепей

;  , (2.35)

так как в них действует **мощность искажения** (Т, ВАр), обусловленная наличием высших гармоник:

. (2.36)

Отношение активной мощности к полной называется **коэффициентом мощности.**

. (2.37)

Для синусоидальных цепей , но в несинусоидальных цепях появляется **коэффициент искажения** 

### 2.2.5 Пример решения задачи 2

Проведем расчет линейной электрической цепи. Схема и кривая несинусоидальной ЭДС приложенной к цепи показаны на рисунке 2.6.

 

Рисунок 2.6

Значения параметров:

 Ом;  Ом;  Ом;  с;

мГн;  мГн;  мкФ;  В;

Представим ЭДС источника, заданную графически, рядом Фурье, ограничив число членов ряда постоянной составляющей и тремя первыми значимыми гармоническими составляющими:

, В.

Приближенное действующее значение ЭДС:

 В.





 

Расчёт токов в ветвях проводим для каждой составляющей спектра по отдельности:

а) постоянная составляющая (учтём, что для постоянного тока идеальный индуктивный элемент – это короткозамкнутая перемычка, а идеальный емкостной элемент – разрыв цепи):

 В,

 А,

,

 Вт,

 Вт.

б) первая (основная) гармоническая составляющая:

, В,

перейдем к комплексному амплитудному значению ЭДС:

, В.

Комплексные сопротивления ветвей:

 Ом,

 Ом,

 Ом,

 Ом.

Комплексные амплитуды токов ветвей на первой гармонике:

А,

 В,

 А,

 А.

Мгновенные значения токов в ветвях на первой гармонике:

 А,

 А,

 А.

Баланс мощностей:

 ВА,

 Вт,

ВАр.

в) вторая гармоническая составляющая:

, В,

перейдем к комплексному амплитудному значению ЭДС:

, В.

Комплексные сопротивления ветвей:

 Ом,

 Ом,

 Ом,

 Ом.

Комплексные амплитуды токов ветвей на второй гармонике:

А,

 В,

 А,

 А.

Мгновенные значения токов в ветвях на второй гармонике:

 А,

 А,

 А.

Баланс мощностей

 ВА,

 Вт,

ВАр.

г) третья гармоническая составляющая:

, В,

перейдем к комплексному амплитудному значению ЭДС:

, В.

Комплексные сопротивления ветвей:

 Ом,  Ом,

 Ом,  Ом.

Комплексные амплитуды токов ветвей на третьей гармонике:

А,

 В,

 А,

 А.

Мгновенные значения токов в ветвях на третьей гармонике:

 А,  А,

 А.

Баланс мощностей

 ВА,

 Вт,

ВАр.

Используя метод наложения, запишем мгновенные токи ветвей:







Действующие значения токов ветвей:

,

,

.

Для определения мощности искажения определим полную мощность, активную и реактивную мощности всей цепи.

Полная мощность

 ВА;

Активная мощность

 Вт;

Реактивная мощность

 ВАр;

Мощность искажения

 ВАр;

Коэффициент мощности



## **2.3 Переходные процессы**

### 2.3.1 Основные определения. Законы коммутации.

Переходный процесс - процесс перехода цепи от одного установившегося режима работы к другому, возникающий при включении, отключении, переключении цепи или ее элементов, а также при аварийных изменениях ее параметров. Все указанные изменения называют коммутацией.

*Переходные процессы возникают в цепях, содержащих накопители энергии: индуктивные катушки и конденсаторы. Эти элементы обладают способностью накапливать и отдавать энергию соответственно магнитного и электрического полей.* Каждому установившемуся режиму соответствует определённый запас магнитной и электрической энергии. При переходе к новому установившемуся режиму энергетическое состояние должно измениться. Так как индуктивные катушки и конденсаторы являются инерционными элементами, изменение энергии электрического или магнитного поля в них не может произойти мгновенно. Поэтому возникает переходной процесс, длительность которого определяется конфигурацией и параметрами электрической цепи (рисунок 2.7).



Рисунок 2.7

Момент коммутации определяет начало переходного процесса, при этом различают время непосредственно перед коммутацией *t*(*0−*) и сразу после коммутации *t*(*0+*),  - длительность коммутации. На рисунке 2.7 , в действительности , т.е коммутация в расчетном отношении считается мгновенной.

В цепях без накопителей энергии переходный процесс отсутствует: после срабатывания коммутатора (*t* = *0+*) в цепи сразу же возникает установившийся (принужденный) режим.

Для упрощения записи в формулах момент времени сразу после коммутации будем обозначать просто *t* = *0.*

Переходные процессы подчиняются **двум законам коммутации.**

**Первый закон коммутации:** ток через индуктивность до коммутации равен току через ту же индуктивность после коммутации

. (2.38)

**Второй закон коммутации:** напряжение на емкости до коммутации равно напряжению на емкости после коммутации

. (2.39)

Таким образом, токи в индуктивностях и напряжения на емкостях в начальный момент *t* = 0+ после коммутации имеют те же значения, что и непосредственно перед коммутацией при *t* = 0- и затем плавно изменяются. Заметим, что токи и напряжения на резисторах, а также токи через емкости и напряжения на индуктивностях могут изменяться скачкообразно, так как с ними непосредственно не связана запасаемая в цепи энергия.

### 2.3.2 Определение принужденных составляющих

Принужденные составляющие (т.е. токи и напряжения после окончания переходного процесса) определяются видом источника. В случае постоянного источника цепь после окончания переходного процесса (в принужденном режиме) рассчитывается как цепь постоянного тока, при этом учитывается, что при постоянном токе **.

Если источник синусоидальный то сначала находятся комплексные значения искомых токов и напряжений **,

которые потом записывают в мгновенной форме **

**Пример 1** (рисунок 2.8).

Е = 180 В, R1 = 10 Ом, R2 = 40 Ом, R3 = 10 Ом , L = 0,1 Гн

Найти 



E



E

а) исходная схема б) схема после окончания

переходного процесса

( принужденный режим)

Рисунок 2.8

Так как источник ЭДС постоянный, то после окончания переходного процесса цепь рассчитывается как цепь постоянного тока, при этом . Расчет принужденных токов выполним с помощью эквивалентных преобразований цепи

 ;  ;

 . .

### 2.3.3 Начальные условия

Начальными условиями называются значения токов, напряжений и их производных в начальный момент переходного процесса, при .

Начальные условия делятся на независимые и зависимые.

Независимые начальные условия – это значения токов индуктивных элементов **и напряжений емкостных элементов ** для времени 

Независимые начальные условия определяются из законов коммутации.   *; .*

Они могут быть нулевыми и ненулевыми.

Зависимые начальные условия – это значения всех остальных токов, напряжений и производных по времени токов и напряжений для времени . Зависимые начальные условия определяются:

- после того, как рассчитаны независимые начальные условия;

- из уравнений по законам Кирхгофа для послекоммутационной схемы, записанных для времени .

Количество начальных условий, которые нужно рассчитать равно количеству постоянных интегрирования в выражении переходной величины. Если характеристическое уравнение имеет один корень и в выражение свободного тока или напряжения входит одна неизвестная постоянная интегрирования, для ее определения необходимо предварительно рассчитать только одно начальное условие: значение самой функции . Если неизвестных постоянных интегрирования – две, то для их определения предварительно рассчитывают два начальных условия: значение самой функции  и ее первой производной  для момента времени *t* = 0+ . Примеры расчета начальных условий приведены ниже.

**Пример 1** (рисунок 2.9).



E



Е = 100 В, R1 = 10 Ом, R2 = 10 Ом,

R3 = 10 Ом , L = 0,1 Гн

Найти 

Рисунок 2.9

Сначала найдем независимое начальное условие: для данной схемы – это

ток , так как это ток через индуктивность. По первому закону коммутации он будет равен току через эту же индуктивность в последний момент перед коммутацией.



E

До коммутации в цепи (рисунок 2.10) протекал один постоянный ток



Этот ток постоянный и от времени

не зависит, поэтому для времени 

Рисунок 2.10 

По первому закону коммутации 

Остальные искомые начальные значения токов токи и напряжения на индуктивности являются зависимыми начальными условиями.

Для их определения систему уравнений по законам Кирхгофа для схемы после коммутации запишем для момента времени .



Неизвестными в этих уравнениях являются . Их можно найти, решив составленную систему уравнений любым методом в Mathcad или вручную, например, с помощью подстановки.

Из первого уравнения выразим  и подставим его во второе уравнение, получим .

Отсюда ;

С учетом этого ; 

### 2.3.4 Операторный метод расчета переходных процессов

### 2.3.4.1 Математические основы метода.  Алгоритм расчета переходного процесса операторным методом

Сущность операторного метода анализа переходных процессов заключается в том, что при расчётах действительные функции времени *f*(*t*), описывающие процессы в электрических цепях и называемые оригиналами, заменяют их операторными изображениями *F*(*p*)с помощью преобразования (интеграла) Лапласа

, (2.40)

где *p = δ + jω* - комплексное число.

Взаимное соответствие между оригиналом и операторным изображением сокращенно записывается с помощью знака 000 . То есть выражение *f*(*t*)  *F*(*p*) означает, что оригиналу *f*(*t*) соответствует операторное изображение *F*(*p*).

Для тока напряжения и ЭДС будем иметь:

- оригиналу  соответствует изображение ;

- оригиналу  соответствует изображение .

- оригиналу  соответствует изображение .

Использование преобразования Лапласа приводит к замене операций дифференцирования и интегрирования оригиналов в дифференциальных уравнениях на алгебраические операции умножения и деления изображений. В результате такой замены дифференциальные уравнения, составленные для электрической схемы по любому известному методу, превращаются в алгебраические. Это сильно упрощает расчет, так как вместо дифференциальных уравнений для временных функций, решаются алгебраические уравнения для изображений.

Найденные из решения алгебраическихуравнений изображения искомых величин затем любым способом преобразуются в оригиналы (функции времени). Переход от изображений к оригиналам можно осуществить

по формуле обратного преобразования Лапласа, по справочным таблицам, по теореме разложения, а также, используя функции обратного преобразования в различных математических пакетах, например, в Mathcad.

Алгоритм расчета переходного процесса операторным методом следующий:

1) Из расчета установившегося режима цепи до коммутации определяют независимые начальные условия .

2) Составляют операторную схему замещения цепи, учитывая найденные в п. 1 начальные условия.

3) Из расчета операторной схемы любым методом находят изображения искомых токов и напряжений .

4)  Любым способом переходят от изображений искомых токов и напряжений к их оригиналам .

Рассмотрим отдельные пункты алгоритма подробнее.

### 2.3.4.2 Операторная схема замещения

Операторная схема замещения строится для цепи после коммутации, все токи, напряжения и ЭДС в ней заменяются их операторными изображениями, она учитывает независимые начальные условия – токи через катушки индуктивности и напряжения на емкостях в момент коммутации.

При составлении операторной схемы замещения следует руководствоваться следующими соответствиями между оригиналами и изображениями (таблица 2.4).

Таблица 2.4 – Операторные схемы замещения элементов цепи

|  |  |
| --- | --- |
| Элемент | Операторное изображение элемента |
|  |  |
| Источник постоянного напряжения |  |
| Источник постоянного тока |  |
| Источник синусоидального  напряжения |  |
|  |  |
|  |  |
|  | *- дополнительная ЭДС*  *- ток через индуктивность до коммутации* |
|  |  |
|  | *- дополнительная ЭДС*  *- напряжение на емкости до коммутации* |
|  |  |

Пример: составить операторную схему замещения участка цепи (рисунок 2.11). Записать операторное сопротивление и напряжение на участке цепи в операторной форме записи



Рисунок 2.11

В соответствии с таблицей 2.4 операторная схема замещения будет иметь вид:



Рисунок 2.12

Операторное сопротивление рассматриваемого участка цепи:

.

Приложенное напряжение складывается из суммы напряжений на каждом элементе схемы . Для операторной схемы замещения

.

Где  и  - начальные условия. Если, начальные условия равны нулю, то:  – **закон Ома** в операторной форме записи.

**Законы Кирхгофа в операторной форме записи:**

 – первый закон Кирхгофа.

 - второй закон Кирхгофа.

### 2.3.4.3 Переход от изображения к оригиналу

Для перехода от изображения к оригиналу можно воспользоваться формулой обратного преобразования Лапласа , таблицами соответствия, приведенными в справочниках по высшей математике. Однако наиболее используемым способом является переход от изображений к оригиналам по формулам теоремы разложения.

Как правило, решение для изображения тока или напряжения имеет вид правильной рациональной дроби:

, (2.41)

где *m < n*, причем дробь -  несократимая, а коэффициенты  - действительные числа.

Алгоритм перехода от изображению к оригиналу по формулам теоремы разложения следующий.

1) Знаменатель дроби (2.41) приравнивают к нулю и находят корни  уравнения .

3) В общем виде находят производную знаменателя 

4) В зависимости от характера корней записывают решение для оригинала (таблица 2.8).

В зависимости от вида корней оригинал может быть определён и по другим выражениям теоремы разложения.

**Пример 1.** Найти закон изменения тока во времени по его операторному изображению  .

1) Приравняем к нулю знаменатель и найдем корни .



2) Запишем производную знаменателя 

3) Так как корни получились вещественные разные решение для оригинала запишется в виде .

После подстановки численных значений получим оригинал тока

 А .

Таблица 2.8 - Характеристическое уравнение второй степени

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| № | Вид корней | Наименование режима | Выражение для свободных составляющих | Производная для свободных составляющих | Система для определения постоянного интегрирования |
| **1** | **2** | **3** | **4** | **5** | **6** |
| 1 | Корни вещественные разные | Апериодический |  |  |  |
| 2 | Корни вещественные равные | Критический режим |  |  |  |
| 3 | Корни комплексно сопряженные | Затухающий колебательный режим |  |  |  |