МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ДЕПАРТАМЕНТ, НАУЧНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОЛИТИКИ И ОБРАЗОВАНИЯ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
(ФГБОУ ВО Донской ГАУ)

АЗОВО-ЧЕРНОМОРСКИЙ ИНЖЕНЕРНЫЙ ИНСТИТУТ – ФИЛИАЛ
ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО
УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ» В Г. ЗЕРНОГРАДЕ
(Азово-Черноморский инженерный институт ФГБОУ ВО Донской ГАУ)

Теоретические основы электротехники

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ

**по выполнению курсовой работы
для студентов, обучающихся заочно по направлению подготовки
13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»**

**Зерноград
2024**

Об издании – *1*
Содержание

УДК 621.3

Теоретические основы электротехники [Электронный ресурс]: учебно-методическое пособие по выполнению курсовой работы по дисциплине для студентов, обучающихся заочно по направлению подготовки 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника» / . Сост. О.Б. Забродина, А.М. Исупова, О.В. Кобзистый. – Электрон. дан. – Зерноград: Азово-Черноморский инженерный институт ФГБОУ ВО Донской ГАУ, 2024. – 50 с. – Режим доступа: Локальная сеть Библиотеки Азово-Черноморского инженерного института ФГБОУ ВО Донской ГАУ.

Утверждено методической комиссией по направлению подготовки 13.03.02 и 13.04.02 Электроэнергетика и электротехника.

Рецензент: к.т.н., доцент, заведующий кафедрой «Эксплуатация энергетического оборудования и электрические машины» Гуляев П.В.

© О.Б. Забродина, А.М. Исупова
О.В. Кобзистый, 2024
© Азово-Черноморский инженерный институт
ФГБОУ ВО Донской ГАУ, 2024.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ОБЩИЕ МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ИЗУЧЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ.....4
ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЦЕПЬ ТРЕХФАЗНОГО ТОКА.....6
ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ.....9
МАГНИТНЫЕ ЦЕПИ ПРИ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТНЫХ ПОТОКАХ.....18
ОБЩИЕ МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ КУРСОВОЙ РАБОТЫ.....24
ПРИМЕР ВЫПОЛНЕНИЯ ЗАДАНИЯ 1.....25
ПРИМЕР ВЫПОЛНЕНИЯ ЗАДАНИЯ 2.....31
ПРИМЕР ВЫПОЛНЕНИЯ ЗАДАНИЯ 3.....36
ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ К КУРСОВОЙ РАБОТЕ.....40
Исходные данные к заданию 1.....40
Исходные данные к заданию 2.....42
Исходные данные к заданию 3.....45
СПИСОК РЕКОМЕНДОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....50

ОБЩИЕ МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ИЗУЧЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ

Теоретические основы электротехники представляют собой обширную область научного знания о практическом применении электромагнитных явлений. При расчетах специальных электротехнических устройств встречаются трудности, для преодоления которых необходима некоторая, а иногда и значительная идеализация элементов электрических цепей и электромагнитных явлений для четкой математической формулировки задачи. Знание общих методов расчета линейных и нелинейных цепей, умение анализировать электромагнитные явления, имеющие место в электрических цепях, позволяют студентам, а впоследствии и инженерам проектировать, изготовлять и успешно эксплуатировать самые разнообразные электротехнические устройства и установки.

Цель изучения дисциплины заключается в том, чтобы обучить студентов методам расчета электромагнитных процессов и соответствующих преобразований энергии.

В результате изучения дисциплины студент должен ***знать:***

- основные законы, теоремы и принципы теоретической электротехники, теорию электрических и магнитных цепей;
- сущность физических процессов, происходящих в электрических и магнитных цепях постоянного и переменного тока, переходные процессы, основы теории электромагнитного поля;
- методы решения конкретных задач статики и динамики электротехнических систем;

уметь:

- собирать электрические цепи по предложенным схемам и анализировать процессы, происходящие в электрических и магнитных цепях;
- рассчитывать линейные и нелинейные электрические и магнитные цепи;
- использовать соответствующий математический аппарат при расчетах переходных процессов, длинных линий и простых электрических и магнитных полей.

Дисциплина базируется на знаниях, полученных студентами при изучении дисциплин "Высшая математика" "Физика", "Теоретические основы электротехники".

Знания, полученные при изучении ТОЭ, являются основой следующих дисциплин: "Электрические машины" (круговые диаграммы; схемы замещения электрических цепей; несинусоидальные токи; переходные процессы; магнитные цепи), "Метрология, стандартизация и сертификация" (расчет и измерение мощности; линейные и нелинейные цепи, теория электромагнитного поля), "Электроприводв и электротехнологии", "Прикладная электроника", "Электроснабжение", "Электроэнергетические системы и сети" и «Релейная защита и автоматизация систем электроснабжения», «Переходные процессы в электроэнергетических системах» и др., а также используются при выполнении курсовых работ и проектов по направлению подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника.

Данное пособие предназначено для оказания методической помощи студентам при изучении дисциплины и выполнении курсовой работы по дисциплине на тему «Расчет установившихся и переходных режимов в электрических и магнитных цепях».

В первой части методического пособия приводятся темы, которые студент должен изучить самостоятельно для выполнения курсовой работы. В конце каждой темы приведены вопросы для самоконтроля изучения раздела и краткие методические комментарии к наиболее сложным или важным элементам расчетов.

Далее в методическом пособии приведены примеры выполнения разделов курсовой работы и в конце - задания на курсовую работу.

ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЦЕПЬ ТРЕХФАЗНОГО ТОКА

Генератор трехфазной ЭДС. Векторные диаграммы. Основные схемы соединения источников и приемников (звезда и треугольник). Симметричный и несимметричный режимы. Расчет симметричных и несимметричных режимов трехфазных цепей. Напряжение смещения нейтрали.

Активная, реактивная и полная мощности трехфазных цепей. Измерение активной мощности трехфазных цепей.

Вращающееся магнитное поле. Получение вращающегося магнитного поля с помощью двухфазной и трехфазной системы токов. Принципы действия асинхронного и синхронного двигателей.

Метод симметричных составляющих. Разложение несимметричной системы на симметричные системы прямой, обратной и нулевой последовательности. Применение метода симметричных составляющих для расчета трехфазных цепей.

Вопросы для самоконтроля

- Какое соединение сопротивлений называется звездой сопротивлений, какое треугольником сопротивлений?
- Как преобразовать треугольник сопротивлений в звезду сопротивлений и наоборот?
- Фазные напряжения трехфазной системы, графики их мгновенных значений и векторные диаграммы.
- Понятие о связанных и несвязанных трехфазных цепях.
- Назовите и изобразите графически способы соединения обмоток трехфазного генератора и трехфазной нагрузки.
- Линейные и фазные напряжения и токи, соотношения между ними при соединении нагрузки по схеме «звезда» с нулевым проводом.
- Линейные и фазные напряжения и токи, соотношения между ними при соединении нагрузки по схеме «звезда» без нулевого провода.
- Линейные и фазные напряжения и токи, соотношения между ними при соединении нагрузки по схеме «треугольник».
- Как рассчитать мощность трехфазной симметричной и несимметричной цепи?
- Как измерить мощность трехфазной симметричной и несимметричной цепи?
- Эффективность передачи электроэнергии по трехфазным цепям.
- Что такое симметричные составляющие нулевой, прямой и обратной последовательности?
- Как аналитически определяют симметричные составляющие нулевой (прямой, обратной) последовательности?
- Суть метода симметричных составляющих.

Методические указания по изучению темы

При изучении материала необходимо обратить внимание на связь между фазными и линейными токами, а также между фазными и линейными напряжениями при различных соединениях обмоток генератора и нагрузки.
Характер этой зависимости может быть различным при симметричной и несимметричной системе питания и несимметрии нагрузки. Поэтому при расчете токов и напряжений на участках трехфазной цепи следует в самом начале расчета четко установить, к какого рода цепям, симметричным или же несимметричным, она относится.

Это важно, поскольку в случае симметрии системы напряжений и симметричной нагрузке можно вести расчет токов и напряжений для одной фазы, а затем путем разворота векторов токов и напряжений на $\pm 120^0$ определить соответствующие токи и напряжения других фаз.

Расчет несимметричной трехфазной сети ведется для каждой фазы в отдельности. При расчете трехфазной несимметричной системы полезно строить топографические диаграммы напряжений, совмещенные с векторными диаграммами токов электрических цепей, которые дают наглядное представление о соотношениях напряжений и токов на различных участках электрической цепи.

Выбранный метод расчета зависит от схемы соединений обмоток генератора и сопротивлений нагрузки.

При изучении метода симметричных составляющих необходимо твердо усвоить метод аналитического разложения заданной несимметричной системы векторов напряжений (токов) на симметричные составляющие нулевой, прямой и обратной последовательностей.

При этом полезно предварительно проанализировать схемы соединения обмоток генератора и нагрузки с тем, чтобы установить на каких участках невозможны токи и напряжения нулевой последовательности. Это позволит упростить расчеты.

Симметричные составляющие нулевой последовательности по известной системе несимметричных трехфазных векторов токов или напряжений $\underline{A}$, $\underline{B}$ и $\underline{C}$ вычисляются следующим образом:

$$\underline{A}_0 = \underline{B}_0 = \underline{C}_0 = \frac{\underline{A} + \underline{B} + \underline{C}}{3}$$

и представляют систему трех векторов, совпадающих по фазе.

Симметричные составляющие прямой последовательности по известной системе несимметричных трехфазных векторов токов или напряжений $\underline{A}$, $\underline{B}$ и $\underline{C}$ вычисляют так:

$$\underline{A}_1 = \frac{\underline{A} + a\underline{B} + a^2\underline{C}}{3}; \qquad \underline{B}_1 = \underline{A}_1 e^{-j120^o}; \qquad \underline{C}_1 = \underline{A}_1 e^{j120^o}$$

и представляют систему трех векторов, сдвинутых один относительно другого на 120^0 и вращающихся против часовой стрелки, причем за вектором $\underline{A_1}$ следует вектор $\underline{B_1}$, а за ним – вектор $\underline{C_1}$. Заметим, что:

$$a = e^{j120^o}; \qquad a^2 = e^{-j120^o}.$$

Симметричные составляющие обратной последовательности по известной системе несимметричных трехфазных векторов токов или напряжений $\underline{A}$, $\underline{B}$ и $\underline{C}$ определяются по выражениям:

$$\underline{A}_2 = \frac{\underline{A} + a^2\underline{B} + a\underline{C}}{3}; \qquad \underline{B}_2 = \underline{A}_2 e^{j120^o}; \quad \underline{C}_2 = \underline{A}_2 e^{-j120^o}.$$

Они представляют систему трех векторов, сдвинутых один относительно другого на 120^0 и вращающихся против часовой стрелки, причем за вектором $\underline{A_2}$ следует вектор $\underline{C_2}$, а за ним – вектор $\underline{B_2}$.

Графически симметричные составляющие прямой, обратной и нулевой последовательностей складываются согласно приведенным выше выражениям. Для этого при умножении вектора на множитель a вектор поворачивают на комплексной плоскости на угол 120^0, а при умножении на множитель a^2 – на угол *минус* 120^0.

ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ

Понятие о переходных процессах, причины их возникновения. Законы коммутации. Классический метод расчета переходных процессов. Включение цепи с активным сопротивлением и индуктивностью (цепи с активным сопротивлением и конденсатором) на постоянное и синусоидальное напряжение. Переходные процессы в цепях с несколькими реактивными элементами. Расчет переходных процессов в разветвленных цепях. Операторный метод расчета переходных процессов. Оригиналы и изображения. Законы Ома и Кирхгофа в операторной форме. Операторная схема замещения электрической цепи. Теорема разложения. Методы расчета переходных процессов в нелинейных цепях.

Вопросы для самоконтроля

- Что называется переходным процессом в электрической цепи?
- Как формулируются законы коммутации?
- Что понимают под начальными условиями при расчетах переходных процессов?
- Какие начальные условия называют независимыми? Как их определяют?
- Какие начальные условия называют зависимыми? Как их определяют?
- Что понимают под принужденным значением переходной величины?
- Что понимают под свободным током (свободным напряжением)?
- Каков порядок расчета переходных процессов в линейных электрических цепях классическим методом?
- Что такое характеристическое уравнение, для чего его составляют при расчете переходных процессов?
- Какова связь свободной составляющей переходного процесса с корнями характеристического уравнения?
- Как определяют постоянные интегрирования при решении дифференциального уравнения?
- Каков порядок расчета переходных процессов операторным методом?
- Что такое операторная схема замещения и как она составляется?
- Какими элементами в операторной схеме замещения обозначаются индуктивность, емкость, постоянная ЭДС?
- Для чего и как пользуются формулой разложения?
- Какие разновидности формулы разложения вы знаете? Как они связаны с корнями характеристического уравнения?
- Как перейти от изображения искомой величины к ее оригиналу?
- Как проверить правильность полученного аналитического выражения для переходного тока или напряжения, полученного в результате расчетов?
- Как построить временную диаграмму переходной величины?

Методические указания по изучению темы

Вариант задания на контрольную работу выдается преподавателем. Каждый вариант отличатся от другого либо значениями исходных данных, схемой электрической цепи, либо искомой переходной величиной.

В каждом варианте задана схема электрической разветвленной линейной цепи с постоянной ЭДС и ее параметры, значения которых выбирают из таблицы в зависимости от номера варианта.

Требуется определить закон изменения во времени тока в одной из ветвей электрической цепи или напряжения на одном из ее элементов после коммутации (замыкании или размыкании ключа).

Задачу необходимо решить двумя методами: классическим и операторным.

Классический метод расчета переходных процессов в линейных электрических цепях с сосредоточенными параметрами заключается в следующем:

- на схеме электрической цепи обозначают положительные направления токов;
- составляют систему интегродифференциальных уравнений по законам Кирхгофа для послекоммутационной цепи;
- определяют принужденную составляющую, как общее решение неоднородного линейного дифференциального уравнения относительно искомого тока (напряжения);
- составляют характеристическое уравнение и вычисляют его корни;
- определяют вид свободной составляющей переходного тока (напряжения);
- вычисляют независимые и зависимые начальные условия;
- определяют постоянные интегрирования.
- переходной ток (напряжение) определяют как сумму принужденной и свободной составляющих.

Положительные направления токов проставляют произвольно на схеме электрической цепи, которая получается после коммутации. Поскольку при действии в цепи постоянных ЭДС в данной контрольной работе рассматриваются переходные режимы, то для буквенных обозначений токов применяют строчные буквы латинского алфавита, например, i_1, i_2 и т.д.

Систему интегродифференциальных уравнений составляют по законам Кирхгофа для послекоммутационной цепи. Мгновенные значения напряжений на различных элементах электрической цепи записывают при этом следующим образом;

- на активном сопротивлении: $u_R = i \cdot R;$
- на индуктивности: $u_L = L\dfrac{di}{dt};$

- на емкости: $$u_C = \frac{1}{C}\int i\,dt.$$

В результате преобразований системы дифференциальных уравнений получают **неоднородное дифференциальное уравнение второго порядка относительно искомой переходной величины** (тока и напряжения) с постоянными коэффициентами, выраженными через параметры электрической цепи.

Для получения **характеристического уравнения** в неоднородном дифференциальном уравнении символ дифференцирования *d/dt* заменяют на множитель *p* и приравнивают полученное выражение к нулю.

Например, для неразветвленной электрической цепи (рис. 1) можно записать следующее уравнение:

$$u_L + u_R + u_C = U;$$

или

$$L\frac{di}{dt} + iR + \frac{1}{C}\int i\,dt = U.$$

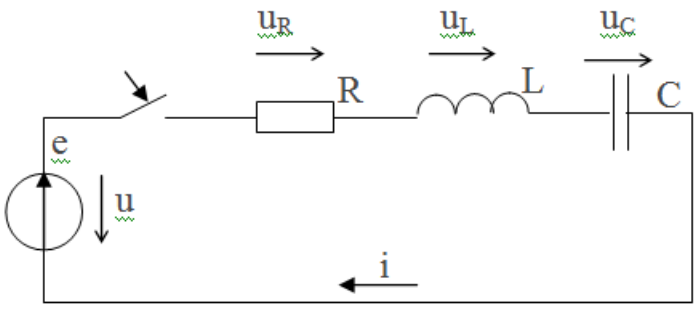


Рис. 1

Продифференцировав полученное выражение, получим неоднородное дифференциальное уравнение второго порядка относительно переходного тока *i:*

$$L\frac{d^2i}{dt^2} + R\frac{di}{dt} + \frac{1}{C}i = \frac{du}{dt}. \qquad (1)$$

Этому уравнению соответствует характеристическое уравнение вида

$$Lp^2 + Rp + \frac{1}{C} = 0$$

или

$$LCp^2 + RCp + 1 = 0. \qquad (2)$$

Характеристическое уравнение можно получить также, если составить уравнение для комплексного полного входного сопротивления данной электрической цепи (рис.1) вида

$$z(j\omega) = j\omega L + R + \frac{1}{j\omega C},$$

заменить в нем параметр $j\omega$ на сомножитель p и приравнять полученное выражение к нулю:

$$pL + R + \frac{1}{pC} = 0.$$

После приведения уравнения к общему знаменателю получим уравнение (2).

Другой способ получения характеристического уравнения используют для проверки правильности его определения путем решения системы интегродифференциальной системы уравнений.

Решение полученного **дифференциального уравнения** (1) представляют в виде суммы двух величин: частного решения неоднородного уравнения, выражающего принужденное значение искомого тока (напряжения) и общего решения однородного дифференциального уравнения, описывающего свободный режим.

Например, для рассматриваемой электрической цепи (рис. 1) переходный ток и напряжения на отдельных участках электрической цепи можно записать в виде:

$$i = i_{пр} + i_{св}; \qquad u_R = u_{Rпр} + u_{Rсв};$$

$$u_L = u_{Lпр} + u_{Lсв}; \qquad u_C = u_{Cпр} + u_{Cсв}.$$

Принужденная составляющая ($i_{пр,}\, u_{пр}$) представляет собой значение искомой переходной величины (тока или напряжения), которое она будет иметь после окончания переходного процесса. Значение этой величины определяют путем расчета электрической цепи любым из известных методов в установившемся режиме.

Вид **свободной** составляющей переходной величины (тока, напряжения) определяется **значениями корней характеристического уравнения**, полученными в результате его решения.

Поскольку в данной контрольной работе характеристическое уравнение (2) представляет собой квадратное уравнение, то в результате его решения получают два корня p_1 и p_2.

Значения корней характеристического уравнения зависят от параметров электрической цепи и ее конфигурации, которые определяют знак дискриминанта в решении квадратного уравнения. Корни могут быть либо отрицательными вещественными и равными, либо отрицательными вещественными и разными, либо комплексными сопряженными.

Если **корни** характеристического уравнения **отрицательные вещественные равные**, то свободная составляющая переходной величины (тока или напряжения) имеет вид

$$i_{св} = A_1 e^{pt} + tA_2 e^{pt},$$

где A_1 и A_2 – постоянные интегрирования;

$p=p_1=p_2$ - корни характеристического уравнения.

Если **корни** характеристического уравнения **отрицательные вещественные разные** $p_1 \neq p_2$, то вид свободной составляющей переходной величины будет следующий:

$$i_{св} = A_1 e^{p_1 t} + A_2 e^{p_2 t},$$

а если **корни комплексные и сопряженные** вида $p_{1,2} = -\delta \pm j\omega_0$, то

$$i_{св} = A\ e^{-\delta t} \sin(\omega_0 t + \nu),$$

где δ - собственное затухание;

ω_0 – собственная частота;

A и ν - постоянные интегрирования.

Значения постоянных интегрирования в уравнениях свободных токов и напряжений определяют из начальных условий.

Начальные условия - это значения токов и напряжений на участках электрической цепи, которые имеют место в первый момент после коммутации.

Начальные условия делят на независимые и зависимые. **Независимые начальные условия** определяют с использованием законов коммутации только для тока на участке цепи с индуктивностью и для напряжения на емкости.

Согласно законам коммутации ток в индуктивности скачком измениться не может, поэтому его значение в первый момент после коммутации должно быть равно значению тока в индуктивности в последний момент перед коммутацией, то есть

$$i_L(0_) = i_L(0+) = i_L(0).$$

Из законов коммутации также следует, что напряжение на емкости скачком измениться не может, тогда

$$u_C(0-) = u_C(0+) = u_C(0).$$

Значения независимых начальных условий определяют из расчета докоммутационной электрической цепи в установившемся режиме известными методами расчета.

Токи и напряжения на остальных участках электрической цепи в первый момент после коммутации (**зависимые начальные условия**) определяют путем решения системы интегродифференциальных уравнений, составленных для послекоммутационной цепи, с использованием законов Кирхгофа и уже определенных независимых начальных условий.

Зависимые начальные условия обозначают, например, для цепи, представленной на рис. 7, следующим образом: $u_R(0+)$; $u_L(0+)$ и т. д.

Определение **постоянных интегрирования** в полученных выражениях переходной величины (тока или напряжения) в зависимости от вида корней характеристического уравнения имеет свои особенности. Но в любом случае для определения постоянных интегрирования предварительно рассчитывают принужденное значение искомой величины, начальные условия для искомой величины и ее первой производной по времени.

Если характеристическое уравнение содержит два равных отрицательных вещественных корня, то общее решение неоднородного дифференциального уравнения имеет (например, для тока в цепи) вид

$$i = i_{np} + A_1 e^{pt} + tA_2 e^{pt}. \qquad (3)$$

Для определения постоянных интегрирования A_1 и A_2 составляют систему двух уравнений для момента времени $t = (0_{+,})$, причем уравнение (5) получают путем дифференцирования выражения (3):

$$\begin{cases} i(0+) = i_{np}(0+) + A_1 & (4) \\ \dfrac{di}{dt}_{|t=0+} = \dfrac{di_{np}}{dt}_{|t=0+} + p_1 A_1 + A_2 & (5) \end{cases}$$

Если в послекоммутационной цепи действуют постоянные ЭДС, то производная принужденной составляющей переходной величины будет равна нулю.

Решение системы уравнений (4) и (5) дает значения постоянных интегрирования A_1 и A_2.

Если характеристическое уравнение содержит два разных отрицательных вещественных корня, то общее решение неоднородного дифференциального уравнения имеет (например, для тока в цепи) вид

$$i = i_{np} + A_1 e^{p_1 t} + A_2 e^{p_2 t}.$$

Тогда система уравнений для начальных условий искомой величины и ее первой производной будет следующая:

$$\begin{cases} i(0+) = i_{np}(0+) + A_1 + A_2; \\ \dfrac{di}{dt}_{|t=0+} = \dfrac{di_{np}}{dt}_{|t=0+} + p_1 A_1 + p_2 A_2. \end{cases}$$

Решение данной системы уравнений дает значения постоянных интегрирования A_1 и A_2.

Если характеристическое уравнение содержит два разных комплексных сопряженных корня, то общее решение неоднородного дифференциального уравнения имеет (например, для тока в цепи) вид

$$i = i_{np} + A\, e^{-\delta t} \sin(\omega_0 t + \nu).$$

Тогда система уравнений для начальных условий искомой величины и ее первой производной будет такая:

$$\begin{cases} i(0+) = i_{np}(0+) + A \sin\nu; \\ \dfrac{di}{dt}_{|t=0} = \dfrac{di_{np}}{dt}_{|t=0+} + \delta A \sin\nu + A\,\omega_0 \cos\nu. \end{cases}$$

Решая эту систему уравнений, определяют постоянные интегрирования A и v.

Операторный метод расчета переходных процессов.

Основной трудностью решения классическим методом является определение постоянных интегрирования. Операторный метод дает возможность выполнять интегрирование линейных дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами без определения постоянных интегрирования.

Суть операторного метода расчета переходных процессов в линейных электрических цепях с сосредоточенными параметрами заключается в том, что с целью упрощения расчетов функцию вещественного переменного (времени) $f(t)$ заменяют соответствующей ей функцией комплексного переменного $F(p)$.

Функцию комплексного переменного $F(p)$ получают в результате прямого преобразования Лапласа, представляющего собой интеграл вида

$$F(p) = \int_0^\infty f(t)e^{-pt}dt,$$

причем функцию $f(t)$ называют оригиналом, а функцию $F(p)$ – ее изображением. Эту связь в сокращенном виде записывают следующим образом:

$$F(p) \bullet\!\!-\!\!\bullet f(t).$$

В результате такой замены решение системы интегро-дифференциальных уравнений относительно функции $f(t)$ заменяют решением системы алгебраических уравнений относительно функции $F(p)$.

Расчет переходных процессов в линейных электрических цепях с сосредоточенными параметрами операторным методом выполняют в следующей последовательности:

- составляют и вычерчивают операторную схему после коммутационной электрической цепи;
- намечают положительные направления токов на участках операторной схемы замещения электрической цепи;
- выбирают метод решения задачи (контурных токов, узловых напряжений, двух узлов и т.п.) и составляют соответствующие выбранному методу уравнения в операторной форме или системы уравнений;
- находят решение задачи (изображение искомой переходной величины в операторной форме);
- по найденному изображению переходной величины с помощью формулы разложения находят оригинал переходного тока (напряжения).

Операторную схему составляют на основе заданной электрической схемы послекоммутационной цепи. При ее составлении все переменные величины – токи, напряжения и ЭДС ($i(t), u(t), e(t)$) заменяют их операторными изображениями $I(p), U(p), E(p)$.

Участок цепи с индуктивностью L заменяют участком, содержащим последовательно соединенные операторное сопротивление Lp и ЭДС, численно

равную произведению индуктивности на начальное значение тока в индуктивности $L \cdot i(0)$ и направленную согласно положительному направлению тока в данной ветви в исходной схеме электрической цепи.

Участок цепи с емкостью C заменяют участком, содержащим последовательно соединенные операторное сопротивление $1/pC$ и ЭДС, численно равную частному от деления начального напряжения на емкости на множитель p, то есть $u_C(0)/p$, и направленную навстречу напряжению u_C в исходной схеме электрической цепи.

Значения $i(0)$ и $u_C(0)$ определяются как независимые начальные условия так, как описано в классическом методе расчета.

Постоянная ЭДС E источника электроэнергии или постоянное напряжение U, действующие в заданной электрической цепи, также заменяются на их операторные изображения и обозначают в операторных схемах как E/p и U/p.

При этом операторные сопротивления ветвей записывают аналогично тому, как их записывали бы в символическом виде (в комплексной форме записи), но $j\omega$ заменяют на множитель p.

Пример операторной схемы электрической цепи, соответствующей электрической цепи, изображенной на рис. 1, приведен на рис.2.

Полное операторное сопротивление цепи для данной операторной схемы имеет вид

$$Z(p) = R + j\omega L + \frac{1}{j\omega C}.$$

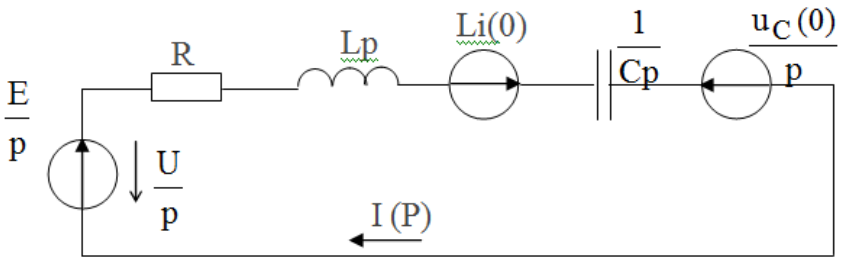


Рис.2

Для операторных схем также справедливы законы Ома и Кирхгофа.
Первый закон Кирхгофа в операторной форме:

$$\sum_{k=1}^{m} I_k(p) = 0;$$

второй закон Кирхгофа в операторной форме:

$$\sum_{k=1}^{N}\left[E_k(p) + L_k i_k(0) - \frac{u_{ck}(0)}{p}\right] = \sum_{k=1}^{N}\left[I_k(p)\cdot Z_k(p)\right],$$

где k – номер ветви;

m – число ветвей, сходящихся в узел;

N – число ветвей контура, для которого составляется уравнение

по второму закону Кирхгофа.

Используя законы Ома и Кирхгофа, а также известные методы расчета линейных электрических цепей (метод преобразований, метод контурных токов, метод двух узлов, метод эквивалентного генератора и т.п.), составляют системы уравнений, необходимые и достаточные для получения изображения искомой переходной величины (тока или напряжения), выраженных через параметры цепи.

Как правило, после соответствующих преобразований решение системы уравнений получают в виде рациональной дроби, многочлен числителя которой имеет меньшую степень, чем многочлен знаменателя:

Заметим также, что a_k и b_k – вещественные числа.

$$F(p)=\frac{F_1(p)}{F_2(p)}=\frac{b_0 p^m+b_1 p^{m-1}+b_2 p^{m-2}+...+b_{m-1}p+b_m}{a_0 p^n+a_1 p^{n-1}+a_2 p^{n-2}+...+a_{n-1}p+a_n}.$$

Оригинал искомой переходной величины (тока, напряжения) определяют с помощью формулы разложения. Для этого приравнивают к нулю многочлен, лежащий в знаменателе, то есть

$$F_2(p)=0,$$

и находят его корни $p_1, p_2, \ldots, p_n$.

Если корни уравнения вещественные и различные, то оригинал определяют по выражению

$$f(t)=\sum_{k=1}^{n}\frac{F_1(p_k)}{F_2'(p_k)}e^{p_k t}. \qquad (6)$$

Если знаменатель дроби имеет один корень, равный нулю, то есть его можно представить в виде $F_2(p)=p\,F_3(p)$, тогда оригинал переходной величины определяют по выражению

$$f(t)=\frac{F_1(0)}{F_3(0)}+\sum_{k=1}^{n}\frac{F_1(p_k)}{p_k F_3'(p_k)}e^{p_k t}.$$

Если корни комплексные сопряженные, то оригинал переходной величины определяют из уравнения (6), но при этом учитывают, что функции от комплексно сопряженных значений сами являются комплексно сопряженными, поэтому величину

$$\frac{F_1(p_k)}{p_k F_3'(p_k)}e^{p_k t},$$

входящую под знак суммирования, рассчитывают только для одного корня, вторая сумма будет сопряженной ей величиной. Особенности преобразования приведены в прилагаемых примерах решения задач.

По окончании расчетов переходной величины сравнивают полученные в двух методах расчета значения переходного тока (напряжения) и делают выводы.

МАГНИТНЫЕ ЦЕПИ ПРИ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТНЫХ ПОТОКАХ

Основные величины, характеризующие магнитное поле. Неферромагнитные и ферромагнитные материалы. Петля гистерезиса и кривые намагничивания.

Понятие о магнитной цепи. Магнитодвижущая сила. Падение магнитного напряжения. Законы магнитной цепи. Аналогия между магнитными и электрическими цепями. Линейные и нелинейные магнитные цепи. Расчет неразветвленных и разветвленных магнитных цепей.

Вопросы для самоконтроля

- Сформулируйте законы Кирхгофа для магнитных цепей и проведите аналогию между величинами, характеризующими электрические и магнитные цепи.
- Можно ли применять принцип наложения для расчета магнитных цепей из ферромагнитных материалов?
- В каких единицах измеряют магнитный поток, магнитодвижущую силу, магнитную индукцию, напряженность и намагниченность магнитного поля?
- Какие магнитные цепи называют разветвленными?
- Какие уравнения могут быть составлены для неразветвленных и разветвленных магнитных цепей?
- Дайте определение магнитодвижущей силе.
- Дайте определение падению магнитного напряжения на участке цепи.
- Как строится вебер-амперная характеристика?

Методические указания по изучению темы

Расчет магнитных цепей основывается на законе полного тока. В частности, на нем основывается второй закон Кирхгофа для магнитной цепи.

Первый закон Кирхгофа для магнитных цепей вытекает из принципа непрерывности силовых линий магнитного поля.

В задании к контрольной работе приводится однородная или неоднородная разветвленная магнитная цепь, состоящая из нескольких участков, различающихся, в общем случае, длиной, площадью поперечного сечения, материалом.

Под участком магнитной цепи понимают ее часть, выполненную из одного и того же материала и имеющую одинаковое поперечное сечение и один и тот же магнитный поток. Чаще всего встречаются магнитные цепи, имеющие, кроме участков из ферромагнитного материала, воздушные зазоры.

Расчет магнитных цепей постоянного тока во многом аналогичен решению задач для нелинейных цепей постоянного тока. Для расчета магнитных цепей, имеющих ферромагнитные материалы, нельзя пользоваться методом наложения, поскольку отсутствует линейная зависимость между магнитными потоками и создающими их токами. Эту связь устанавливают экспериментально и выражают в виде кривых намагничивания, заданных таблично или графически. Как правило, аналитические выражения, описывающие кривые намагничивания ферромагнит-

ных материалов сердечников, отсутствуют. Поэтому задачи решают графоаналитическим методом.

Приступая к расчетам, необходимо иметь в виду, что все задачи, связанные с расчетом магнитных цепей, делят условно на два класса: прямые задачи и обратные задачи.

Если в условии заданы магнитные потоки или значения магнитной индукции в ветвях магнитной цепи, а необходимо определить значения магнитодвижущей силы (МДС), тока катушки или числа витков катушки с определенным током, то такую задачу решают аналитически с использованием заданных кривых намагничивания ферромагнитных материалов, образующих магнитную цепь, и относят ее к классу прямых задач.

Если в условии задачи заданы значения МДС, конфигурация, размеры и материал всех участков магнитной цепи, а требуется определить значения магнитных потоков или индукции в ветвях или на отдельных участках магнитной цепи, то задачу решают графоаналитическим способом и относят к классу обратных задач.

Обратные задачи, как правило, значительно сложнее прямых, поскольку неизвестно распределение магнитного напряжения между участками. Магнитное сопротивление участка зависит от значения магнитной проницаемости μ, которая, в свою очередь, определяется неизвестной еще магнитной индукцией.

Поэтому задачу решают методом последовательных приближений. Для этого строят вспомогательные вебер-амперные характеристики, представляющие зависимость магнитных потоков от падений магнитного напряжения на определенных участках магнитной цепи.

Следует заметить, что практически любое решение задачи является приближенным решением, поскольку в расчетах не учитываются потоки рассеяния.

Чтобы построить вебер-амперную характеристику участка магнитной цепи, показанного на рис.3, предварительно по второму закону Кирхгофа составляют уравнение для замкнутого контура магнитной цепи (данной ветви, условно замкнутой падением магнитного напряжения между его концами).

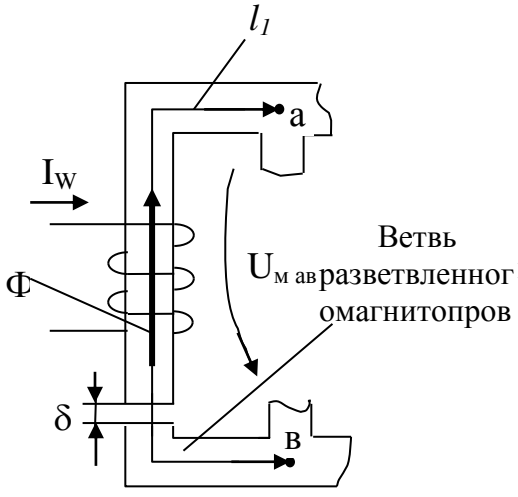


Рис. 3

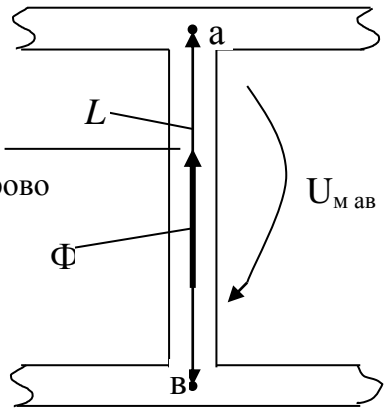


Рис. 4

Например, для цепи по рис.3 уравнение будет следующим:

$$Iw = H_1 \cdot l_1 + H_в \cdot \delta + U_{мав},$$

тогда падение магнитного напряжения $U_{м\,ав}$ на данном участке:

$$U_{мав} = Iw - H_1 \cdot l_1 - H_в \cdot \delta, \qquad (7)$$

где I - ток в катушке намагничивания;

H_1 – напряженность магнитного поля в сердечнике;

w - число витков катушки с током;

δ - толщина воздушного зазора.

А для участка без МДС (катушки с током) по рис.4 падение магнитного напряжения определится из выражения

$$H_2 \cdot l_2 = -U_{мав}. \qquad (8)$$

Задаваясь значениями магнитного потока от *0* до $Ф_{max}$, вычисляют соответствующие им значения падений магнитного напряжения на расчетном участке магнитной цепи. Обычно вычисления выполняют табличным методом. По данным таблицы строят вебер-амперные характеристики, которые затем используют для решения задачи.

Например, рассчитанная согласно уравнению (7) таблица будет выглядеть следующим образом:

B, Тл	$Ф$, Вб	H_1, А/м	$H_1 \cdot l_1$, А	$H_{в1}$	$H_{в1} \cdot \delta$	$U_{мав}=Iw-H_1 \cdot l_1- H_{в1} \cdot \delta$, А
1	2	3	4	5	6	7
0	*0*	*0*	*0*	*0*	*0*	Iw
B_1	$B_1 \cdot S$	H_{11}	$H_{11} \cdot l_1$	$H_{в1} \cdot$	$H_{в1} \cdot \delta$	$U_{мав}=Iw-H_{11} \cdot l_1- H_{в1} \cdot \delta$
B_2	$B_2 \cdot S$	H_{12}	$H_{12} \cdot l_1$	$H_{в2} \cdot$	$H_{в2} \cdot \delta$	$U_{мав}=Iw-H_{12} \cdot l_1- H_{в2} \cdot \delta$
…	…	…	…	…	…	…
B_k	$B_k \cdot S$	H_{1k}	$H_{1k} \cdot l_1$	$H_{вк} \cdot$	$H_{вк} \cdot \delta$	$U_{мав}=Iw- H_{1k} \cdot l_1- H_{вк} \cdot \delta$

Удобно в данном случае в начале расчета в колонке 1 таблицы поместить значения магнитной индукции, взятые из основной кривой намагничивания того материала, из которого выполнен сердечник, а в колонке 3 - соответствующие им значения напряженности магнитного поля, определенные по той же кривой намагничивания. Тогда магнитный поток в колонке 2 вычисляют как $Ф = B \cdot S,$ значе-

ния падения магнитного напряжения на участке $U_{мав}$ определяются из выражения (7).

При определении напряженности магнитного поля в воздушном зазоре и на участках, выполненных из неферромагнитного материала, пользуются выражением

$$H_в = \frac{B_в}{\mu_0},$$

где $B_в$ – магнитная индукция в воздушном зазоре;

μ_0 - магнитная постоянная, $\mu_0=4\pi\cdot10^{-7}=1{,}256\cdot10^{-6}$ Гн/м.

. По данным колонок 2 и 7 строится вебер-амперная характеристика, примерный вид которой показан на рис. 5.

Вебер-амперная характеристика участка магнитной цепи будет выглядеть как на рис. 5.

При наличии в магнитной цепи воздушного зазора для построения вебер-амперной характеристики можно взять в качестве первого значения магнитный поток в воздушном зазоре, считая магнитное сопротивление воздушного зазора равным сопротивлению всей цепи, то есть

$$\Phi_0 = \frac{Iw}{\frac{\delta}{\mu_0 S}},$$

где S - площадь сечения воздушного зазора.

Основанием для такого выбора является то, что даже малый воздушный зазор имеет магнитное сопротивление значительно большее, чем вся остальная часть цепи из ферромагнитного материала.

Для уравнения (8) таблица примет вид:

B, Тл	Φ, Вб	H_2, А/м	$U_{мав}=-H_k\cdot l_2$, А
1	2	3	4
0	*0*	*0*	*0*
B_1	$B_1\cdot S$	H_{21}	$U_{мав1}=-H_{21}\cdot l_2$
B_2	$B_2\cdot S$	H_{22}	$U_{мав2}=-H_{21}\cdot l_2$
…	…	…	…
B_k	$B_k\cdot S$	H_{2k}	$U_{мав4}=-H_{2k}\cdot l_2$

При расчете разветвленной магнитной цепи часто применяют метод двух узлов для решения обратной задачи.

Метод расчета заключается в следующем:

- на схеме магнитной цепи намечают положительные направления магнитных потоков;
- обозначают узловые точки, например буквами «а» и «в»;
- составляют уравнения по второму закону Кирхгофа для контуров, представляющих собой ветвь разветвленной цепи, условно замкнутую падением маг-

нитного напряжения между узлами «а» и «в» $U_{мав}$. При этом число составленных уравнений будет равно числу ветвей.

А вебер-амперная характеристика такой ветви имеет вид, показанный на рис. 6.

Решение задачи, то есть фактическое значение падения магнитного напряжения $U_{мав}$ между узлами магнитной цепи, находят графически по уравнению, составленному по первому закону Кирхгофа для магнитной цепи.

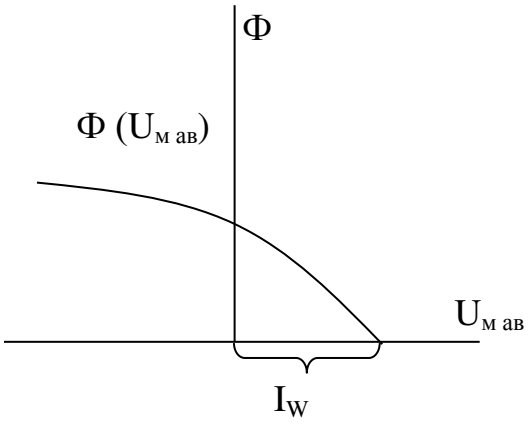


Рис. 5

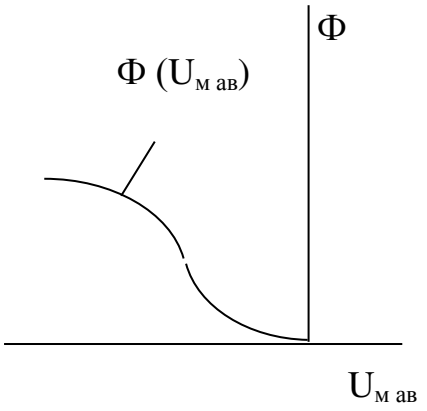


Рис. 6

Для каждой ветви рассчитывают вебер-амперную характеристику $\Phi_k=f(U_{мав})$. Все вебер-амперные характеристики строят в одной системе координат. Например, на рис.7 показаны вебер-амперные характеристики трехстержневого магнитопровода – зависимости магнитных потоков ветвей от падения магнитного напряжения между двумя узлами.

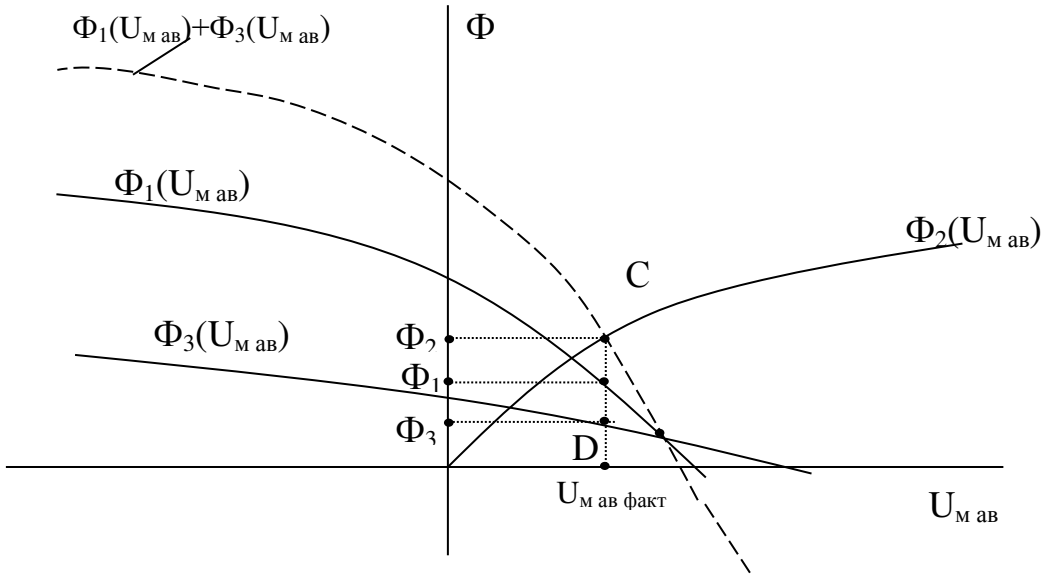


Рис. 7

По графикам определяют значения магнитных потоков в ветвях при данном значении $U_{мав}$, затем вычисляют при необходимости значения магнитной индукции и напряженности в стержнях магнитопровода.

Например, на рис. 7 точка С дает решение задачи при условии

$$\Phi_1 + \Phi_3 - \Phi_2 = 0.$$

Искомые значения магнитных потоков находят на линии пересечения отрезка CD с вебер-амперными характеристиками ветвей.

ОБЩИЕ МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ КУРСОВОЙ РАБОТЫ

К выполнению курсовой работы следует приступать только после изучения теоретического материала по соответствующему разделу, изложенному в учебниках, в задачниках, в которых приводится решение подобных задач, и в настоящих методических указаниях, где объясняется ход решения аналогичной задачи.

Решение должно сопровождаться краткими, но исчерпывающими пояснениями. При необходимых преобразованиях следует вычертить все промежуточные схемы.

Текст, формулы и числовые выкладки должны быть написаны от руки четко и аккуратно или набраны в текстовом редакторе на компьютере, обозначения в схемах и по ходу изложения должны соответствовать государственным стандартам (ГОСТ), а все величины выражаться в единицах СИ. Схемы, векторные диаграммы и графики должны вычерчиваться с помощью чертежных принадлежностей или выполняться с использованием графических редакторов.

При решении задачи разными методами все напряжения и токи должны сохранять свои буквенные обозначения и направления. Расчеты производить до третьей значащей цифры.

В конце работы следует указать используемую литературу.

Каждый студент получает индивидуальное задание по курсовой работе. Сдавая на кафедру курсовую работу, студент обязан на первой странице ее привести индивидуальное задание. Курсовые работы, в которых не окажется задания или которые выполнены не по своему варианту, не зачитываются, а студенту выдается новое задание.

Если работа не зачтена по причине наличия грубых ошибок, то студент все исправления выполняет в той же пояснительной записке, в случае значительной переработки в конце пояснительной записки добавляется необходимое количество страниц.

Работы, выполненные с нарушением этих правил, не зачитываются, как и работы, содержащие серьезные ошибки.

ПРИМЕР ВЫПОЛНЕНИЯ ЗАДАНИЯ 1

«ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЦЕПЬ ТРЕХФАЗНОГО ТОКА»

Исходные данные:

Данные двигателя 4А150S2				Сопротивления		
				Линии		Печи
U, В	P_2, кВт	$cos\ \varphi$	КПД	*Rл.,Ом*	*Хл*, Ом	*Rпеч*, Ом
380/660	15	0,91	0,88	2	2,5	12

Требуется для приведенной ниже электрической цепи:

1. Выбрать схему соединения двигателя и начертить схему цепи.
2. Определить все токи в цепи.
3. Определить все токи в цепи при обрыве сопротивления в одной из фаз печи.
4. Разложить аналитически и графически эти токи на симметричные составляющие.

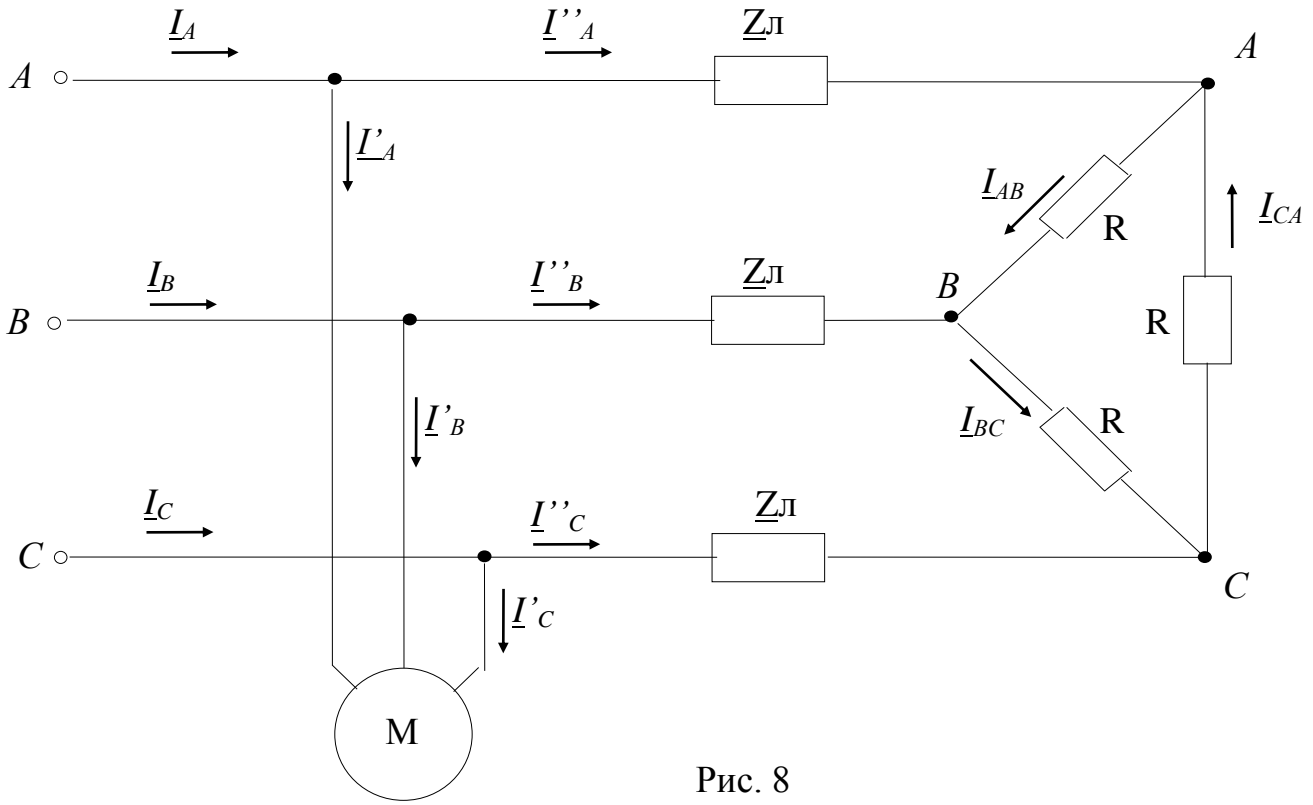


Рис. 8

РЕШЕНИЕ

1. Исходя из соотношения напряжения двигателя и напряжения сети, соединяем обмотки треугольником.

2. Преобразуем симметричный треугольник с сопротивлениями ***R*** в симметричную эквивалентную звезду с сопротивлениями ***R`***.

$$R' = \frac{R}{3} = \frac{12}{3} = 4 \ Ом.$$

Этот эквивалентный потребитель (вместе с сопротивлением линии) включен параллельно электродвигателю.

Поскольку трехфазная электрическая цепь симметричная, то можно изобразить эквивалентную схему для одной фазы (рис. 9) и выполнить преобразование цепи и расчет токов в одной фазе цепи.

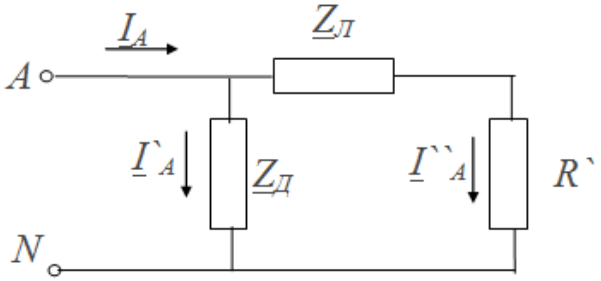


Рис. 9

Ток двигателя линейный

$$I'_A = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \eta \cdot \cos\varphi} = \frac{15000}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0{,}88 \cdot 0{,}91} = 28{,}4 \ \ A.$$

Этот ток будет отставать по фазе от фазного напряжения на угол $\varphi = arccos\ 0{,}91 = 24{,}4^0$.

Поэтому в символическом виде этот ток и токи других фаз запишутся следующим образом:

$$\underline{I}'_A = 28{,}4e^{-j24{,}4^\circ} = 25{,}9 - j11{,}7A;$$
$$\underline{I}'_B = \underline{I}'_A \cdot e^{-j120^\circ} = 28{,}4e^{-j24{,}4^\circ} \cdot e^{-j120^\circ} =$$
$$= 28{,}4e^{-j144{,}4^\circ} = -23{,}1 - j16{,}5A;$$
$$\underline{I}'_C = \underline{I}'_A \cdot e^{j120^\circ} = 28{,}4e^{-j24{,}4^\circ} \cdot e^{j120^\circ} =$$
$$= 28{,}4e^{j95{,}6^\circ} = -2{,}7 + j28{,}3 \ \ A.$$

Фазные токи:

$$\underline{I}`_{ab} = \frac{\underline{I}`_A}{\sqrt{3}} \cdot e^{j30^\circ} = \frac{28{,}4e^{-j24{,}4^\circ}}{\sqrt{3}} \cdot e^{j30^\circ} = 16{,}4e^{j5{,}6^\circ} A;$$

$$\underline{I}`_{bc} = \underline{I}`_{ab} \cdot e^{-j120^\circ} = 16{,}4e^{-j114{,}4^\circ} A;$$

$$\underline{I}`_{ca} = \underline{I}`_{ab} \cdot e^{j120^\circ} = 16{,}4e^{j125{,}6^\circ} A.$$

Токи печи: линейные:

$$\underline{I}``_A = \frac{\underline{U}_A}{\underline{Z}_л + R`} = \frac{220}{2 + j2{,}5 + 4} = \frac{220}{6{,}5e^{j22{,}6^\circ}} = 33{,}8e^{-j22{,}6^\circ} =$$

$$= 31{,}2 - j13A;$$

$$\underline{I}``_B = \underline{I}``_A \cdot e^{-j120^\circ} = 36{,}6e^{-j22{,}6^\circ} \cdot e^{-j120^\circ} = 33{,}8e^{-j142{,}6^\circ} =$$

$$= -27{,}5 - j19{,}6\ A;$$

$$\underline{I}``_C = \underline{I}``_A \cdot e^{j120^\circ} = 36{,}6e^{-j22{,}6^\circ} \cdot e^{j120^\circ} = 33{,}8e^{j97{,}4^\circ} = -4{,}35 + j33{,}5A.$$

в) Фазные токи печи:

$$\underline{I}``_{ab} = \frac{\underline{I}``_A}{\sqrt{3}} e^{j30^\circ} = \frac{33{,}8e^{-j22{,}6^\circ}}{\sqrt{3}} \cdot e^{j30^\circ} = 19{,}5e^{j7{,}4^\circ} A;$$

$$\underline{I}``_{bc} = \underline{I}``_{ab} e^{-j120^\circ} = 19{,}5e^{-j112{,}6^\circ} A;$$

$$\underline{I}``_{ca} = \underline{I}``_{ab} e^{j120^\circ} = 19{,}5e^{j127{,}4^\circ} A.$$

Токи в начале линии с учетом токов в двигателе определяются по первому закону Кирхгофа

$$\underline{I}_A = \underline{I}`_A + \underline{I}``_A = 25{,}9 - j11{,}7 + 31{,}2 - j13{,}4 = 57{,}1 - j25{,}1 = 62{,}4e^{-j23{,}7^\circ} A;$$

$$\underline{I}_B = \underline{I}`_B + \underline{I}``_B = -23{,}1 - j16{,}5 - 27{,}5 - j19{,}6 = -50{,}6 - j36{,}1 = 62{,}4e^{-j143{,}7^\circ} A;$$

$$\underline{I}_C = \underline{I}`_C + \underline{I}``_C = -2{,}7 + j28{,}3 - 4{,}35 + j33{,}5 = -7{,}05 + j61{,}8 = 62{,}4e^{j96{,}3^\circ} A;$$

3. Определение токов в цепи при обрыве фазы СА печи.

Так как двигатель находится в начале линии, то его токи не изменятся. Изменятся токи после двигателя.

Схема электрической цепи, полученная после обрыва фазы печи представлена на рис. 10.

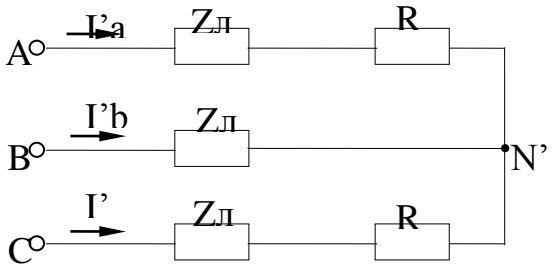


Рис. 10

Для определения этих токов найдем сначала фазные напряжения. Для этого предварительно выразим в комплексной форме линейные напряжения сети и проводимости фаз. Так как при расчете симметричной цепи мы приняли, что фазное напряжение $\underline{U}_A$ направлено по действительной оси, то линейное напряжение $\underline{U}_{AB}$, опережающее его на угол 30^o, запишется следующим образом:

$$\underline{U}_{AB} = 380e^{j30^\circ} = 329 + j190 \ \ B,$$

а два других напряжения $\underline{U}_{BC}$, $\underline{U}_{CA}$, будут равны:

$$\underline{U}_{BC} = \underline{U}_{AB} \cdot e^{-j120^\circ} = 380e^{-j90^\circ} = -j380B;$$
$$\underline{U}_{CA} = \underline{U}_{AB} \cdot e^{j120^\circ} = 380e^{j150^\circ} = -329 + j190B.$$

Сопротивления фаз:

$$\underline{Z}_A = \underline{Z}_C = \underline{Z}_Л + R = 14 + j2{,}5 = 14{,}2e^{j10{,}1} \ \ Ом;$$

$$\underline{Z}_B = \underline{Z}_Л = 2 + j2{,}5 = 3{,}2e^{j51{,}3} \ Ом.$$

Проводимости фаз:

$$\underline{Y}_A = \underline{Y}_C = \frac{1}{\underline{Z}_A} = \frac{1}{14{,}2e^{j10{,}1^\circ}} = 0{,}07e^{-j10{,}1^\circ} = 0{,}069 - j0{,}012Cм;$$

$$\underline{Y}_B = \frac{1}{\underline{Z}_B} = \frac{1}{3{,}2e^{j51{,}3^\circ}} = 0{,}31e^{-j51{,}3^\circ} = 0{,}194 - j0{,}242Cм.$$

Фазные напряжения приемника:

$$\underline{U}_A^{`} = \frac{\underline{U}_{AB} \cdot \underline{Y}_B - \underline{U}_{CA} \cdot \underline{Y}_C}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C} =$$

$$\frac{380e^{j30^\circ} \cdot 0{,}31e^{-j51{,}3^\circ} - 380e^{j150^\circ} \cdot 0{,}07e^{-j10{,}1^\circ}}{2 \cdot (0{,}069 - j0{,}012) + 0{,}194 - j0{,}242} = \frac{117{,}8e^{-j21{,}3^\circ} - 26{,}6e^{j139{,}8^\circ}}{0{,}425e^{-j38{,}7^\circ}} =$$

$$= \frac{109{,}75 - j42{,}8 + 20{,}3 - j17{,}17}{0{,}425e^{-j38{,}7^\circ}} = \frac{143{,}2e^{-j24{,}7^\circ}}{0{,}425e^{-j38{,}7^\circ}} = 336{,}9e^{j14^\circ} = 326{,}89 + j81{,}5B;$$

$$\underline{U}_B^{`} = \underline{U}_A^{`} - \underline{U}_{AB} = 326{,}89 + j81{,}5 - 329 - j190 = -2{,}11 - j108{,}5 = 108{,}52e^{-j91{,}1^\circ} B;$$

$$\underline{U}_C^{`} = \underline{U}_A^{`} + \underline{U}_{CA} = 326{,}89 + j81{,}5 - 329 + j190 = -2{,}11 + j271{,}5 = 271{,}5e^{j90{,}4^\circ} B.$$

Токи нагрузки:

$$\underline{I}_A^{``} = \frac{\underline{U}_A^{`}}{\underline{Z}_A} = \frac{336{,}9e^{j14^\circ}}{14{,}2e^{j10{,}1^\circ}} = 23{,}72e^{j3{,}9^\circ} = 23{,}66 + j1{,}61A;$$

$$\underline{I}_B^{``} = \frac{\underline{U}_B^{`}}{\underline{Z}_B} = \frac{108{,}5e^{-j91{,}1^\circ}}{3{,}2e^{j51{,}3^\circ}} = 33{,}9e^{-j142{,}4^\circ} = -26{,}86 - j20{,}68A;$$

$$\underline{I}_C^{``} = \frac{\underline{U}_C^{`}}{\underline{Z}_C} = \frac{271{,}5e^{j90{,}4^\circ}}{14{,}2e^{j10{,}1^\circ}} = 19{,}12e^{j80{,}3^\circ} = 3{,}22 + j18{,}85A.$$

Определяем токи в линии:

$$\underline{I}_A = \underline{I}_A^{`} + \underline{I}_A^{``} = 25{,}9 - j11{,}7 + 23{,}66 + j1{,}61 = 49{,}56 - j10{,}09 = 50{,}57e^{-j11{,}5^\circ} A;$$

$$\underline{I}_B = \underline{I}_B^{`} + \underline{I}_B^{``} = -23{,}1 - j16{,}5 - 26{,}86 - j20{,}68 = -49{,}96 - j37{,}18 = 62{,}27e^{-j143{,}34^\circ} A;$$

$$\underline{I}_C = \underline{I}_C^{`} + \underline{I}_C^{``} = -2{,}7 + j28{,}3 + 3{,}22 + j18{,}85 = 0{,}52 + j47{,}15 = 47{,}15e^{j89{,}37^\circ} A.$$

4. Разложим полученную несимметричную систему токов на симметричные составляющие.

4.1 **Аналитически:**

- токи нулевой последовательности:

$$\underline{I}_{A0} = \underline{I}_{B0} = \underline{I}_{C0} = \frac{\underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C}{3} = \frac{49{,}56 - j10{,}09 - 49{,}96 - j37{,}18 + 0{,}52 + j47{,}15}{3} \approx 0$$

- токи прямой последовательности:

$$\underline{I}_{A1} = \frac{\underline{I}_A + a\underline{I}_B + a^2\underline{I}_C}{3} = \frac{49{,}56 - j10{,}09 + 62{,}27e^{-j143{,}34^\circ} \cdot e^{j120^\circ} + 47{,}15e^{j89{,}37^\circ} \cdot e^{-j120^\circ}}{3} = 52{,}88e^{-j21{,}8^\circ} A;$$

$$\underline{I}_{B1} = \underline{I}_{A1} \cdot e^{-j120^\circ} = 52{,}88e^{-j141{,}8^\circ} A;$$

$$\underline{I}_{C1} = \underline{I}_{A1} \cdot e^{j120^\circ} = 52{,}88e^{j98{,}2^\circ} A.$$

- токи обратной последовательности:

$$\underline{I}_{A2} = \frac{\underline{I}_A + a^2\underline{I}_B + a\underline{I}_C}{3} =$$

$$\frac{49{,}56 - j10{,}09 + 62{,}27e^{-j143{,}34^\circ} \cdot e^{-j120^\circ} + 47{,}15e^{j89{,}37^\circ} \cdot e^{j120^\circ}}{3} = 0{,}41 + j9{,}55 = 9{,}56e^{j87{,}5^\circ} A;$$

$$\underline{I}_{B2} = \underline{I}_{A2} \cdot e^{j120^\circ} = 9{,}56e^{j207{,}5^\circ} A;$$

$$\underline{I}_{C2} = \underline{I}_{A2} \cdot e^{-j120^\circ} = 9{,}56e^{-j32{,}5^\circ} A.$$

4.2**. Графически:**

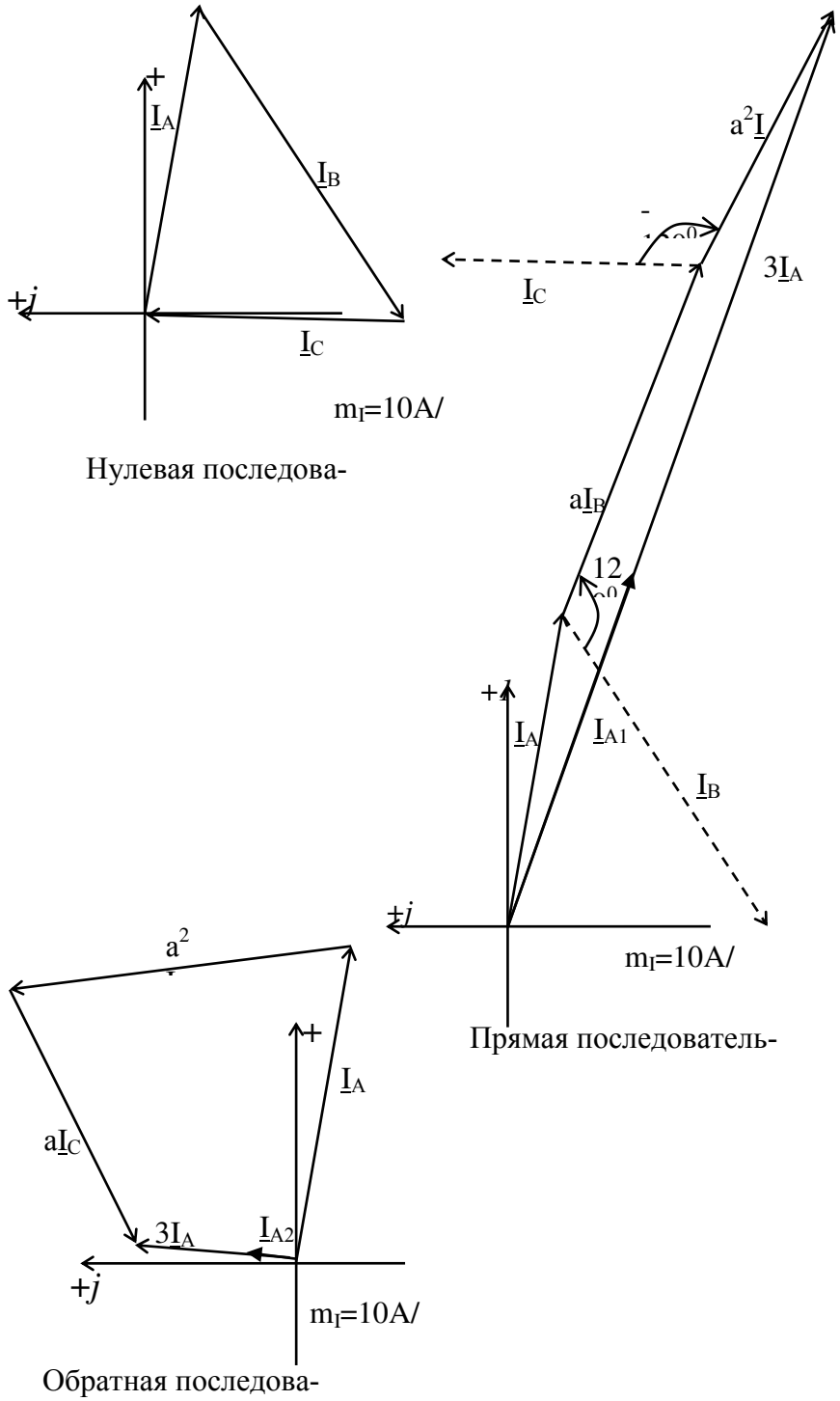


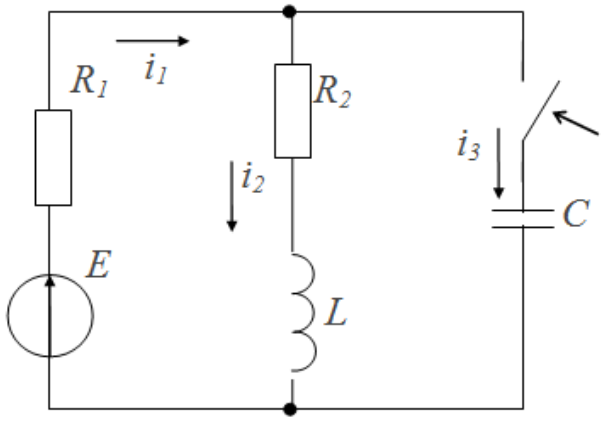
Рис. 11

ПРИМЕР ВЫПОЛНЕНИЯ ЗАДАНИЯ 2

«ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ»

Исходные данные:

№ схемы	E, В.	R_1, Ом	R_2, Ом.	L, мГн.	C, мкФ
14	40	6	10	1	2,5



Требуется: Определить закон изменения во времени тока в неразветвленной части цепи. Задачу решить классическим и операторным методом.

РЕШЕНИЕ

Классический метод расчета

Составляем характеристическое уравнение системы через комплексное сопротивление цепи.

Составим систему уравнений для цепи, образующейся после коммутации:

$$\begin{cases} i_1 \cdot R_1 + i_2 \cdot R_2 + L \cdot \dfrac{di_2}{dt} = E, & (1) \\ i_1 \cdot R_1 + \dfrac{1}{C}\int i_3 dt = E, & (2) \\ i_1 - i_2 - i_3 = 0. & (3) \end{cases}$$

Решим систему уравнений относительно тока i_1. Для этого продифференцируем выражение (2).

$$R_1 \cdot \frac{di_1}{dt} + \frac{1}{C} i_3 = 0; \quad (4)$$

$$i_3 = -R_1 C \cdot \frac{di_1}{dt}; \quad (5)$$

из (1)

$$i_2 = i_1 - i_3 = i_1 + R_1 C \cdot \frac{di_1}{dt}, \quad (6)$$

подставим (5) и (6) в (1)

$$i_1 R_1 + i_1 R_2 + R_1 R_2 C \cdot \frac{di_1}{dt} + L \cdot \frac{di_1}{dt} + R_1 CL \cdot \frac{d^2 i_1}{dt^2} = E \ .$$

Разделим выражение на $R_1 CL$:

$$\frac{d^2 i_1}{dt^2} + \frac{di_1}{dt}\left(\frac{1}{R_1 C} + \frac{R_2}{L}\right) + i_1\left(\frac{R_1 + R_2}{R_1 CL}\right) = \frac{E}{R_1 CL}.$$

Подставим численные значения параметров цепи

$$\frac{d^2 i_1}{dt^2} + \frac{di_1}{dt}\left(\frac{1}{6 \cdot 2{,}5 \cdot 10^{-6}} + \frac{10}{1 \cdot 10^{-3}}\right) + i_1\left(\frac{6+10}{6 \cdot 2{,}5 \cdot 10^{-6} \cdot 1 \cdot 10^{-3}}\right) =$$

$$= \frac{40}{6 \cdot 2{,}5 \cdot 10^{-6} \cdot 1 \cdot 10^{-3}}$$

$$\frac{d^2 i_1}{dt^2} + 76{,}7 \cdot 10^3 \frac{di_1}{dt} + 1{,}07 \cdot 10^9 = 2{,}67 \cdot 10^9 \qquad (7)$$

Заменим величину $\frac{d}{dt}$ на параметр p получим характеристическое уравнение вида

$$p^2 + 7{,}667 \cdot 10^4 p + 1{,}067 \cdot 10^9 = 0. \qquad (8)$$

Так как характеристическое уравнение системы оказалось уравнением второй степени, то соответствующее дифференциальное уравнение является уравнением второго порядка.

В результате решения квадратного уравнения получим два корня:

$$p_1 = -58{,}4 \cdot 10^3 \quad c^{-1}; \quad p_2 = -18{,}264 \cdot 10^3 \quad c^{-1}.$$

Составляем выражения для мгновенных значений токов и напряжений.

Общий вид решения неоднородного уравнения:

$$i(t) = i_{1пр} + i_{1св}.$$

Поскольку корни характеристического уравнения вещественные и различные, то решение можно записать в следующем виде:

$$i_1(t) = i_{1пр.} + i_{1св} = i_{1пр.} + A_1 e^{p_1 t} + A_2 e^{p_2 t} \text{ А}. \qquad (9)$$

Принужденную составляющую найдем из послекоммутационной цепи как

$$i_{1пр} = \frac{E}{R_1 + R_2} = \frac{40}{6 + 10} = 2{,}5 A.$$

Для определения постоянных интегрирования A_1 и A_2 воспользуемся начальными условиями, которые задаются первым и вторым законами коммутации. Первый закон коммутации относится к току в катушке i_2, второй - к напряжению на конденсаторе u_c .Поэтому нужно составить уравнения для i_2 и u_c так, чтобы они оба содержали постоянные A_1 и A_2. Для этого продифференцируем выражение (9), и, подставив полученное значение принужденного тока, получим систему уравнений:

$$\begin{cases} i_1(t) = 2{,}5 + A_1 e^{p_1 t} + A_2 e^{p_2 t} \\ \dfrac{di_1}{dt} = p_1 A_1 e^{p_1 t} + p_2 A_2 e^{p_2 t} \end{cases}$$

при $t=0$ она примет вид

$$\begin{cases} i_1(0) = 2{,}5 + A_1 + A_2 \\ \left.\dfrac{di_1}{dt}\right|_{t=0+} = p_1 A_1 + p_2 A_2 \end{cases}$$

Определим начальные условия:
независимые начальные условия (ННУ) из законов коммутации:

$$Uc(0_+) = Uc(0_-) = 0;$$

$$i_2(0_+) = i_2(0_-) = \frac{E}{R_1 + R_2} = \frac{40}{6 + 10} = 2{,}5\,A;$$

зависимые начальные условия из уравнений (1 – 6):

из (2) $\quad i_1(0_+)R_1 + U_C(0_-) = E;$

$$i_1(0_+) = \frac{E - U_C(0_-)}{R_1} = \frac{40}{6} = 6{,}7\,A. \quad i_3(0_+) = i_1(0_+) - i_2(0_+) = 6{,}7 - 2{,}5 = 4{,}2\,A;$$

из (4) $\quad \dfrac{d\,i_1}{dt} = -\dfrac{1}{CR_1} i_3(0_+) = -\dfrac{1}{2{,}5 \cdot 10^{-6} \cdot 6} \cdot 4{,}2 = -28 \cdot 10^4\ A/c.$

При $t=0$ получим:

$$\begin{cases} 6{,}7 = 2{,}5 + A_1 + A_2; \\ -28 \cdot 10^4 = -58{,}4 \cdot 10^3 A_1 - 18{,}264 \cdot 10^3 A_2; \end{cases}$$

или

$$\begin{cases} A_1 = 4{,}2 - A_2; \\ -3{,}472 \cdot 10^4 = 40{,}136 \cdot 10^3 A_2; \end{cases} \quad \text{тогда} \quad \begin{cases} A_1 = 5{,}07; \\ A_2 = -0{,}87. \end{cases}$$

Искомый ток получим в виде:

$$i_1(t) = 2{,}5 + 5{,}07e^{-58400\ t} - 0{,}87e^{-18264\ t},\ A.$$

Операторный метод

Расчетная операторная схема приведена на рисунке П8. На схеме обозначены положительные направления изображений токов ветвей и значения ЭДС, учитывающих возможность наличия запаса энергии в реактивных элементах цепи.

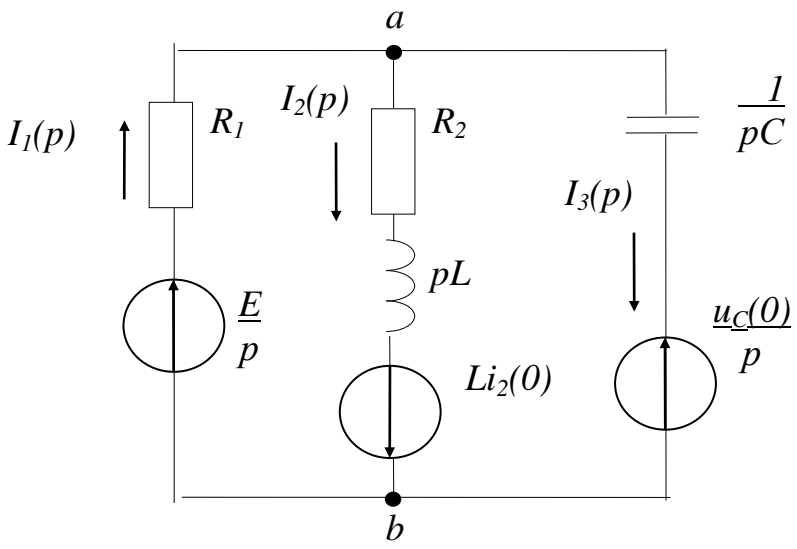


Рис. 13

Для нахождения изображений токов ветвей воспользуемся методом двух узлов.

Тогда изображение напряжения между узлами а и в при *Uc(0)= 0* определится по формуле

$$U_{ab}(p) = \frac{\dfrac{E}{p} \cdot \dfrac{1}{R_1} - Li_2(0) \cdot \dfrac{1}{R_2 + pL} + \dfrac{u_C(0)}{p} \cdot pC}{\dfrac{1}{R_2 + pL} + \dfrac{1}{R_1} + pC} =$$

$$= \frac{E(R_2 + pL) - pLR_1 i_2(0)}{p^2 LCR_1 + p(R_2 R_1 C + L) + R_1 + R_2},$$

а изображение искомого тока будет равно:

$$I_1(p)=\frac{\frac{E}{p}-U_{ab}(p)}{R1}=\frac{\frac{E}{p}-\frac{E(R_2+pL)-pLR_1i_2(0)}{p^2LCR_1+p(R_2R_1C+L)+R_1+R_2}}{R1}=$$

$$=\frac{p^2ELC+p(ECR_2+Li_2(0))+E}{p(p^2LCR_1+p(R_2R_1C+L)+R_1+R_2)}=\frac{G(p)}{H(p)}.$$

Для того чтобы воспользоваться формулой разложения и найти оригинал искомого тока, вычислим значения многочленов при $i_2(0)=2{,}5A$

$$G(p)=1\cdot10^{-7}\cdot p^2+0{,}0035p+40;$$

$$H'(p)=3p^2LCR_1+2p(R_2R_1C+L)+R_1+R_2=4{,}5\cdot10^{-8}p^2+2{,}3\cdot10^{-3}p+16.$$

Здесь *p* корни уравнения *H(p)=0*.

$$p_1=0\ \ c^{-1};\quad p_2=-58{,}4\cdot10^3\ \ c^{-1};\quad p_3=-18{,}264\cdot10^3\ \ c^{-1}.$$

$$G(p_1)=40;$$

$$H'(p_1)=16;$$

$$G(p_2)=1\cdot10^{-7}(-58400)^2+0{,}0035(-58400)+40=176{,}65;$$

$$H'(p_2)=4{,}5\cdot10^{-8}(-58400)^2+2{,}3\cdot10^{-3}(-58400)+16=35{,}16;$$

$$G(p_3)=1\cdot10^{-7}(-18264)^2+0{,}0035(-18264)+40=9{,}43;$$

$$H'(p_3)=4{,}5\cdot10^{-8}(-18264)^2+2{,}3\cdot10^{-3}(-18264)+16=-11.$$

Применив формулу разложения, получим искомый ток:

$$i_1(t)=\frac{40}{16}+\frac{176{,}65}{35{,}16}e^{-58400\ t}+\frac{9{,}43}{-11}e^{-18264\ t}=2{,}5-5{,}03e^{-58400\ t}+0{,}86e^{-18264\ t}A.$$

Сравнивая выражение тока, полученное операторным методом, с соответствующим выражением, полученным классическим методом видим, что результат достаточно близкий.

Временная диаграмма тока в неразветвленной части цепи представлена на рис. 14.

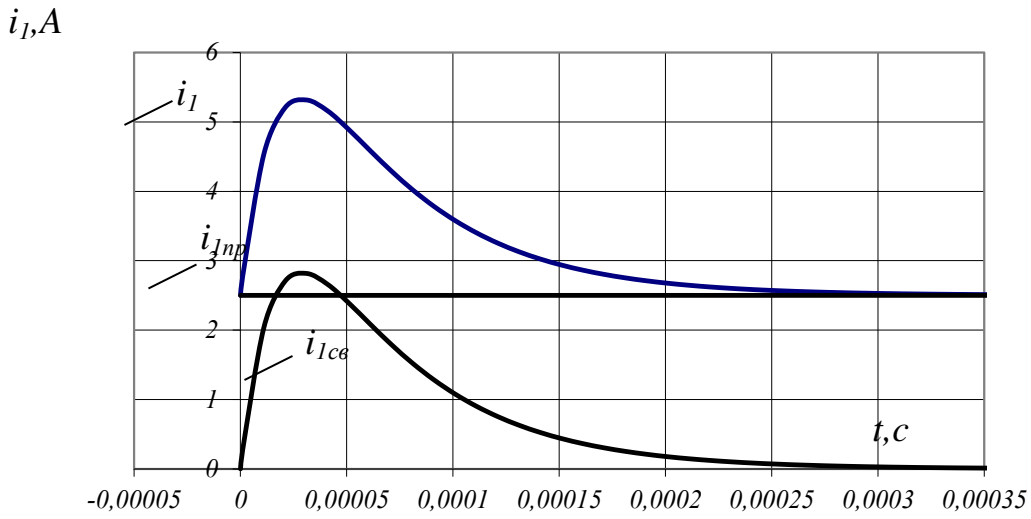


Рис. 14

ПРИМЕР ВЫПОЛНЕНИЯ ЗАДАНИЯ 3

«МАГНИТНАЯ ЦЕПЬ ПОСТОЯННОГО ТОКА»

Исходные данные:

Задан магнитопровод с катушками (рис. 15), по которым протекает постоянный ток, конструктивные параметры и значения токов приведены в таблице.

W_1	I_1	W_2	I_2	W_3	I_3	L_1	L_2	L_3	S_1	S_2	S_3	δ
-	А	-	А	-	А	см	см	см	$см^2$	$см^2$	$см^2$	мм
260	1,2	-	-	230	1	65	25	60	70	80	60	0,06

Основная кривая намагничивания материала магнитопровода представлена в табличном виде.

B, Тл	0	0,22	0,75	0,93	1,02	1,14	1,28	1,47	1,53	1,57
H,А/м	0	20	40	60	80	120	200	400	600	800

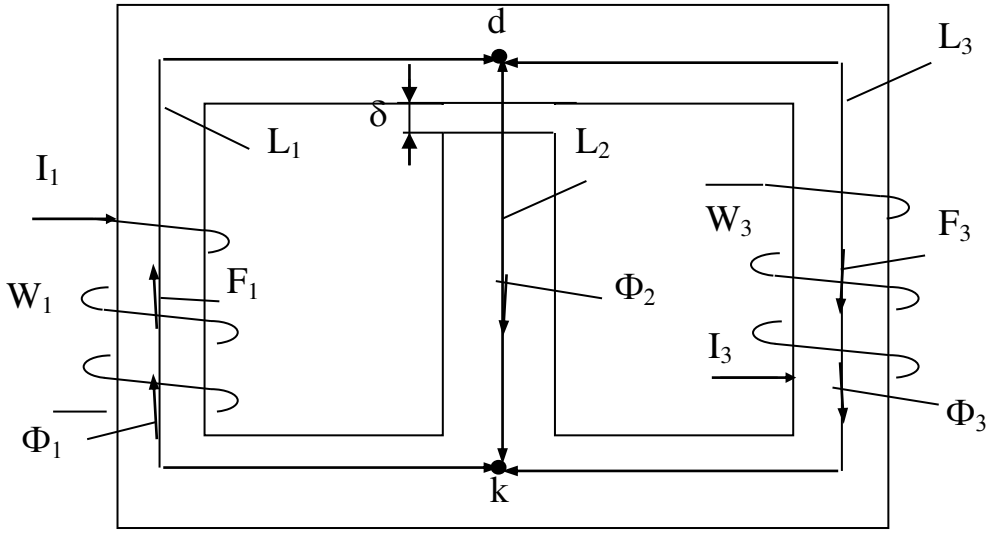


Рис. 15

Требуется определить магнитные потоки: Φ_2, Φ_3.

РЕШЕНИЕ

Составим систему уравнений по первому и второму законам Кирхгофа для магнитной цепи.

$$\begin{cases} \Phi_1 - \Phi_2 - \Phi_3 = 0; \\ H_1\ell_1 + H_2\ell_2 + H_\delta\ell_\delta = I_1W_1; \\ -H_2\ell_2 + H_3\ell_3 + H_\delta\ell_\delta = I_3W_3. \end{cases}$$

Решаем задачу методом двух узлов. Для этого составим для каждой из ветвей уравнения по второму закону Кирхгофа:

$$\begin{cases} \Phi_1 - \Phi_2 - \Phi_3 = 0; \\ Umdk + H_1\ell_1 = I_1W_1; \\ Umdk - H_2\ell_2 - H_\delta\ell_\delta = 0; \\ Umdk - H_3\ell_3 = -I_3W_3; \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \Phi_1 = \Phi_2 + \Phi_3; \\ Umdk = I_1W_1 - H_1\ell_1; \\ Umdk = H_2\ell_2 + H_\delta\ell_\delta; \\ Umdk = -I_3W_3 + H_3\ell_3. \end{cases}$$

По последним трем уравнениям с использованием основной кривой намагничивания, приведенной в исходных данных, рассчитаем вебер-амперные характеристики. Результаты расчетов приведены в таблицах.

Таблица для уравнения $Umdk_1=I_1W_1-H_1l_1$.

Таблица для уравнения $Umdk_3=-I_3W_3+H_3l_3$.

B_1	H_1	H_1l_1	$\Phi_1=B_1S_1, 10^{-4}$	$U_{мdk}$		B_3	H_3	H_3l_3	$\Phi_3=B_3S_3, 10^{-4}$	$U_{мdk}$
0	0	0	0	312		0	0	0	0	-230
0,22	20	13	15,4	299		0,22	20	12	13,2	-218
0,75	40	26	52,5	286		0,75	40	24	45	-206
0,93	60	39	65,1	273		0,93	60	36	55,8	-194
1,02	80	52	71,4	260		1,02	80	48	61,2	-182
1,14	120	78	79,8	234		1,14	120	72	68,4	-158
1,28	200	130	89,6	182		1,28	200	120	76,8	-110
1,47	400	260	102,9	52		1,47	400	240	88,2	10
1,53	600	390	107,1	-78		1,53	600	360	91,8	130
1,57	800	520	109,9	-208		1,57	800	480	94,2	250

Таблица для уравнения $U_{мdk2}=H_2l_2+H_\delta l_\delta$

B_2	H_2	H_2l_2	H_δ, 10^6	$H_\delta\delta$	$\Phi_2=B_2S_2, 10^{-4}$	$U_{мdk}$
0	0	0	0	0	0	0
0,22	20	5	0,175	10,5	17,6	15,5
0,75	40	10	0,597	35,82	60	45,82
0,93	60	15	0,74	44,4	74,4	59,4
1,02	80	20	0,812	48,72	81,6	68,72
1,14	120	30	0,908	54,48	91,2	84,48
1,28	200	50	1,019	61,14	102,4	111,14
1,47	400	100	1,17	70,2	117,6	170,2
1,53	600	150	1,218	73,08	122,4	223,08
1,57	800	200	1,25	75	125,6	275
-0,22	-20	-5	-0,175	-0,746	-17,6	-15,5
-0,75	-40	-10	-0,597	-0,926	-60	-45,82

-0,93	-60	-15	-0,74	-1,015	-74,4	-59,4
-1,02	-80	-20	-0,812	-1,134	-81,6	-68,72
-1,14	-120	-30	-0,908	-1,274	-91,2	-84,48
-1,28	-200	-50	-1,019	-1,463	-102,4	-111,14
-1,47	-400	-100	-1,17	-0,746	-117,6	-170,2

Построим вебер-амперные характеристики (рис. 16) и согласно уравнению

$$\Phi_1 = \Phi_2 + \Phi_3,$$

путем графических построений найдем потоки в ветвях магнитопровода:

$\Phi_1 =$ 106 $*10^{-4}$ *Вб;*

$\Phi_2 =$ 16 $*10^{-4}$ *Вб;*

$\Phi_3 =$ 90 $*10^{-4}$ *Вб.*

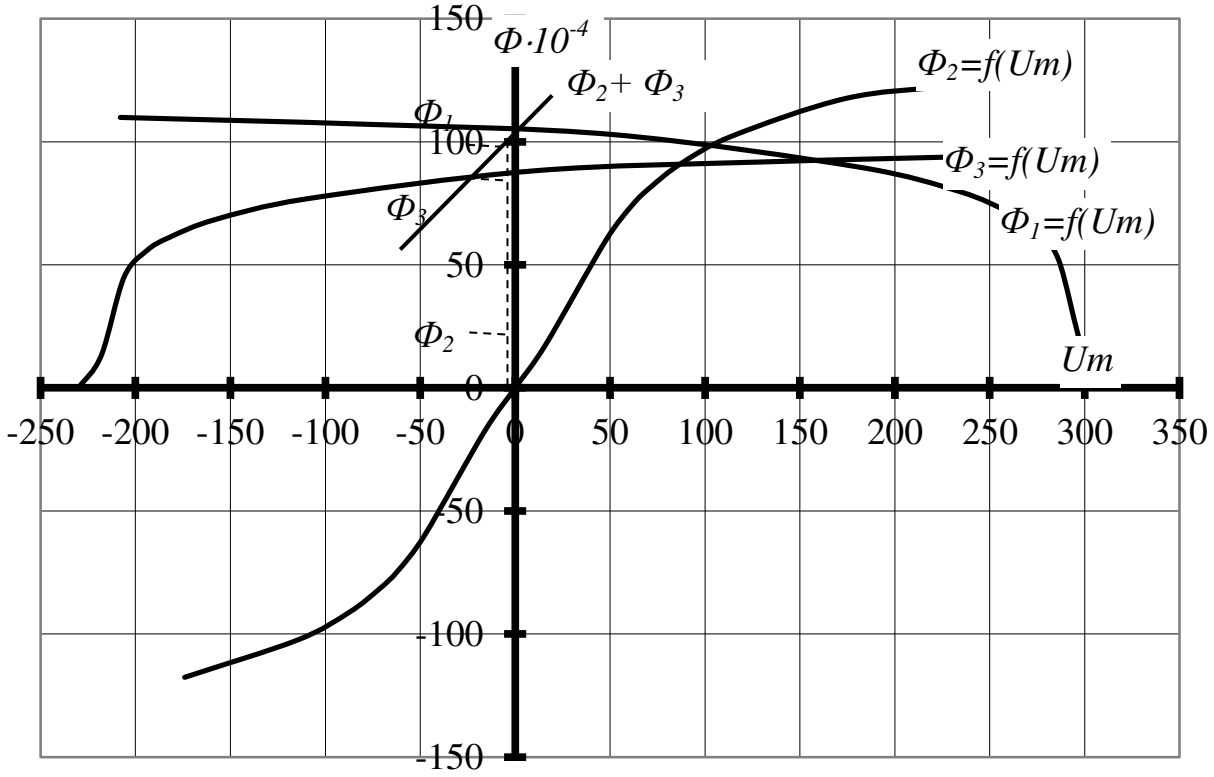


Рис.16

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ К КУРСОВОЙ РАБОТЕ

Задания к курсовой работе приведены ниже по ее разделам. Преподаватель сообщает студенту номер варианта курсовой работы. Необходимые исходные данные к расчету приведены в ниже приведенных таблицах. Для этого студент выбирает по каждому из трех разделов курсовой работы соответствующую строку таблицы (номер варианта).

Исходные данные к заданию 1

ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЦЕПЬ ТРЕХФАЗНОГО ТОКА

К трехфазной электрической цепи с напряжением 380/220 В подключены два потребителя электрической энергии. В начале линии подключен электродвигатель, паспортные данные которого приведены в таблице исходных данных, а в конце линии подключен по схеме треугольник симметричный трехфазный потребитель Rн. Задано сопротивление одного провода трехфазной линии Rл+jXл.

1. Выбрать схему подключения трех обмоток электродвигателя.
2. Начертить схему трехфазной электрической цепи.
3. Рассчитать токи и напряжения на всех участках трехфазной симметричной цепи. Построить топографическую диаграмму напряжений, совмещенную с векторной диаграммой токов цепи.
4. Рассчитать все токи в электрической цепи при обрыве одной из фаз нагрузки.
5. Разложить на симметричные составляющие линейные токи цепи.

Вариант	Электродвигатель					*Rл*, Ом	*Xл*, Ом	$R_н$, Ом
	Тип двигателя	P_2, кВт	*U*, В	КПД, %	*cos φ*			
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	4A71B2	1,1	220/380	77,5	0,87	8,0	10,0	36
2	4A80A2	1,5	220/380	81,0	0,85	6,0	10,0	32
3	4A80B2	2,2	220/380	83,0	0,87	6,0	8,0	30
4	4A90L2	3,0	220/380	84,5	0,88	4,5	5,0	24
5	4A100S2	4,0	220/380	86,5	0,89	4,0	5,0	24

1	2	3	4	5	6	7	8	9
6	4A100L2	5,5	220/380	87,5	0,91	3,0	4,0	18
7	4A112M2	7,5	380/660	87,5	0,88	2,0	4,0	18
8	4A132M2	11,0	380/660	88,0	0,90	2,0	3,0	15
9	4A150S2	15,0	380/660	88,0	0,91	2,0	2,5	12
10	4A80A4	1,1	220/380	75,0	0,81	8,0	10,0	36
11	4A80B4	1,5	220/380	77,0	0,83	6,0	10,0	32
12	4A90L4	2,2	220/380	80,0	0,83	6,0	8,0	30
13	4A100S4	3,0	220/380	82,0	0,83	5,0	5,0	24
14	4A100L4	4,0	220/380	84,0	0,84	4,0	5,0	24
15	4A112M4	5,5	220/380	85,5	0,85	3,0	4,0	18
16	4A132S4	7,5	380/660	87,5	0,86	2,0	3,0	15
17	4A132M4	11,0	380/660	87,5	0,87	2,0	2,5	12
18	4A160S4	15,0	380/660	88,5	0,88	1,5	2,5	12
19	4A80B6	1,1	220/380	74,0	0,74	8,0	6,0	36
20	4A90L6	1,5	220/380	75,0	0,74	6,0	6,0	32
21	4A100L6	2,2	220/380	81,0	0,73	5,0	8,0	30
22	4A112AB6	3,0	220/380	81,0	0,76	4,5	5,0	24
23	4A112MB6	4,0	220/380	82,0	0,81	4,0	5,0	24
24	4A132S6	5,5	220/380	85,0	0,80	3,0	4,0	18
25	4A132M6	7,5	380/660	85,5	0,81	2,0	4,0	18

Исходные данные к заданию 2

ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ
В ЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ

Рассчитать переходный ток в ветви с ЭДС классическим и операторным методом. Построить временную диаграмму тока.

№ схемы	*E1*	*R1*, Ом	*R2*, Ом	*L*, мГ	*C*, мкФ
1	110	50	50	3	40
2	50	12	18	4	100
3	200	10	20	1	10
4	120	1,6	3	1	10
5	125	10	9	10	10
6	50	1	2	2	1000
7	100	10	10	1	10
8	30	10	8	10	10
9	40	6	10	1	2,5
10	150	20	4	4	5
11	200	10	20	1	10
12	300	50	25	5	4
13	50	4	4	1	10
14	100	10	80	1	20
15	75	2	13	10	10
16	200	2	8	1	1500
17	40	3	6	50	5
18	150	2	2	1	10
19	200	8	10	1	10
20	220	20	15	2	5
21	300	3	7	1	10
22	500	10	10	1	100
23	100	4	6	1	10
24	150	20	40	2	10
25	110	1	3	10	15

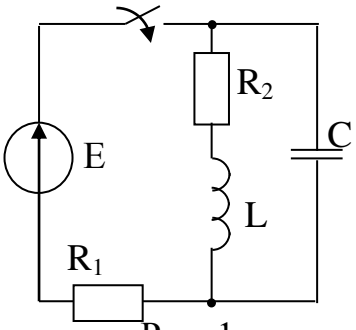


Рис. 1

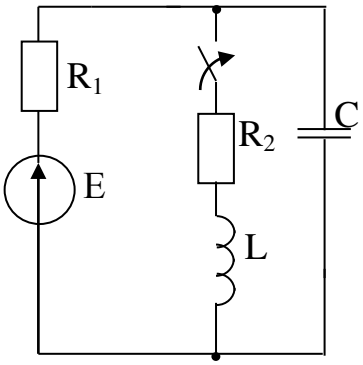


Рис. 2

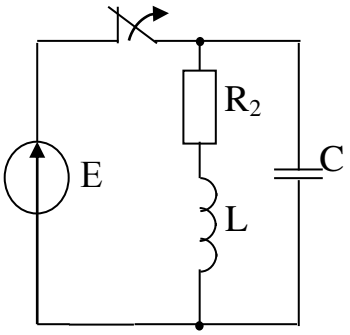


Рис. 3

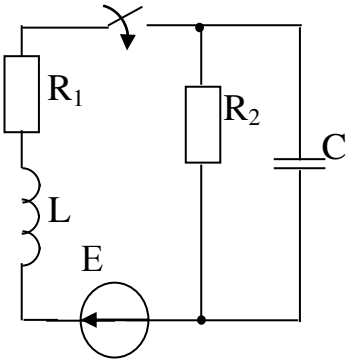


Рис. 4

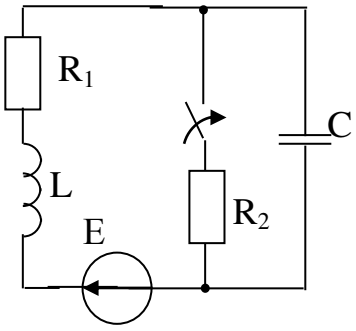


Рис. 5

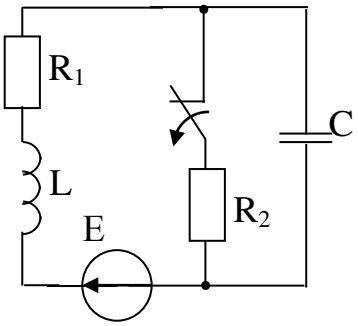


Рис. 6

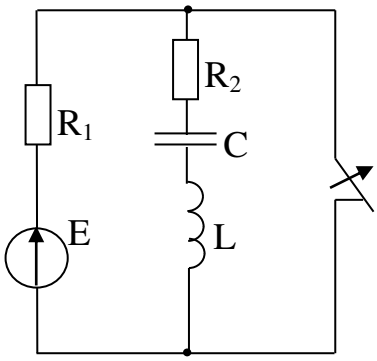


Рис. 7

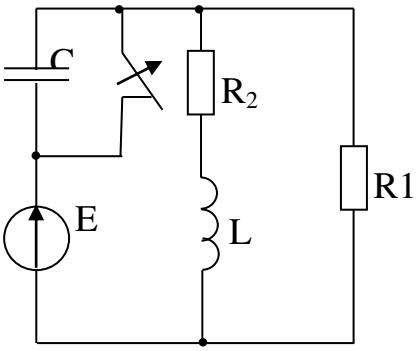


Рис. 8

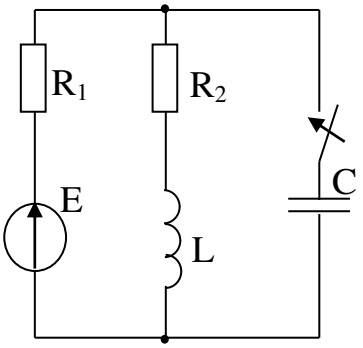


Рис. 9

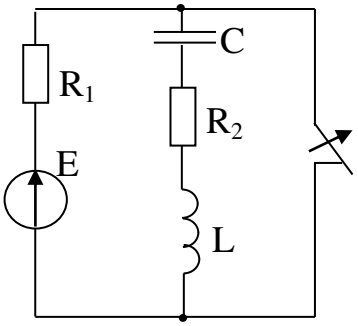


Рис. 10

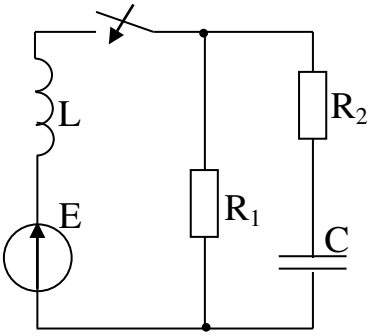


Рис. 11

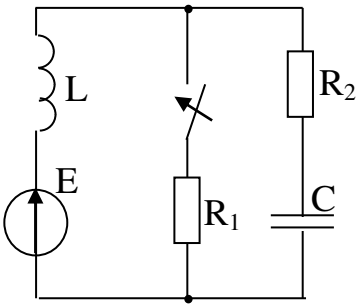


Рис. 12

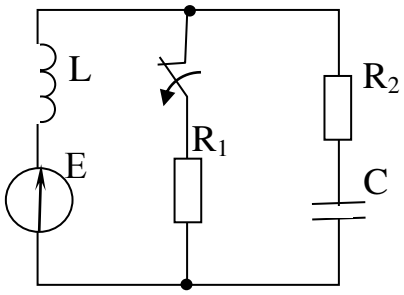


Рис. 13

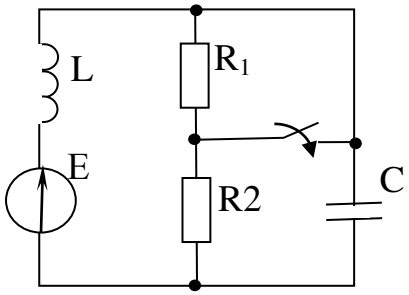


Рис. 14

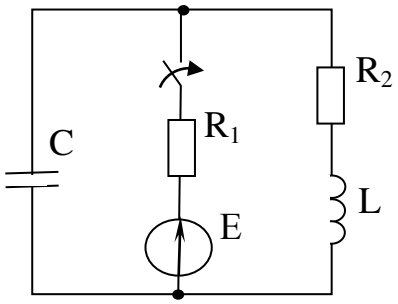


Рис. 15

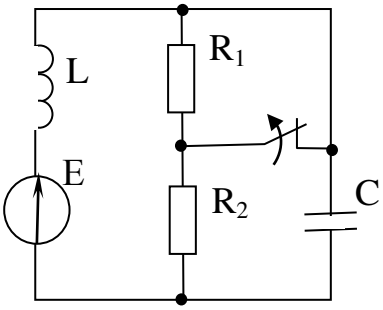


Рис. 16

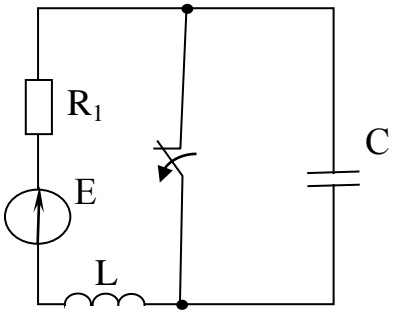


Рис. 17

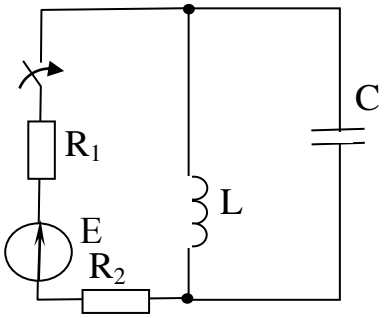


Рис. 18

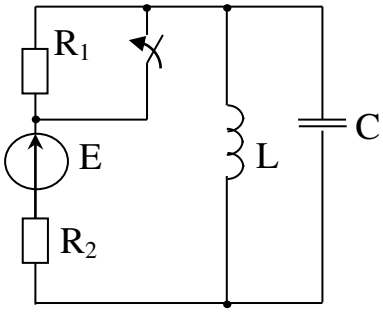


Рис. 19

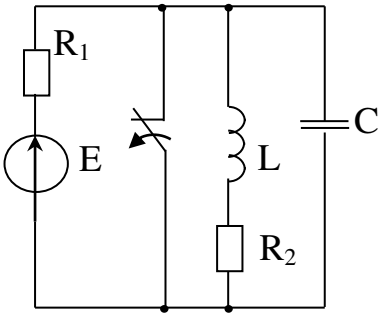


Рис. 20

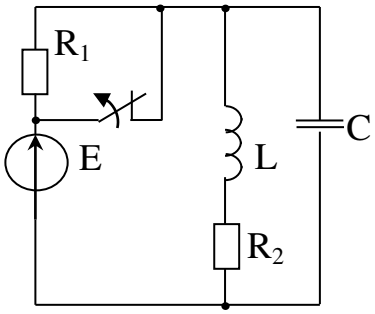


Рис. 21

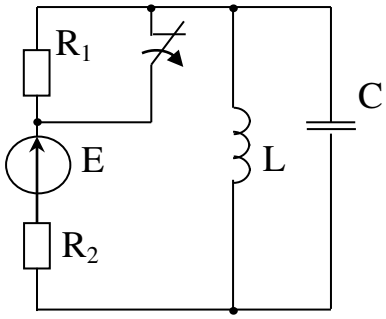


Рис. 22

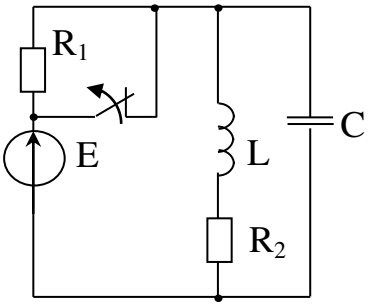


Рис. 23

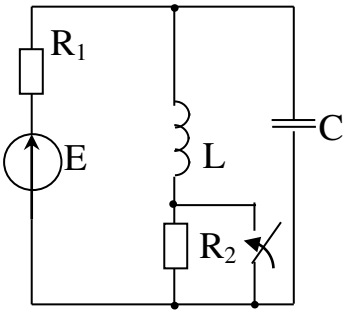


Рис. 24

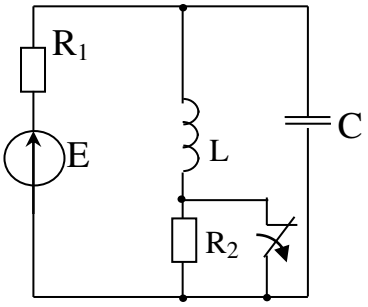


Рис. 25

Исходные данные к заданию 3

МАГНИТНАЯ ЦЕПЬ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Рассчитать заданную магнитную цепь методом двух узлов.

Основная кривая намагничивания стали магнитопровода

B,Тл	0	0,22	0,75	0,93	1,02	1,14	1,28	1,47	1,53	1,57
H, А/м	0	20	40	60	80	120	200	400	600	800

Вариант	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**
Рисунок	15	16	19	20	1	2	5
W_1	135	3000	-	350	300	600	300
I_1,А	0,47	0,1	-	0,05	1,52	0,3	0,1
W_2	-	500	550	-	-	200	300
I_2,А	0,1	0,7	0,4	0,2	-	-	-
W_3	70	-	520	1200	100	-	125
I_3,А	0,2	-	-	0,1	2,5	-	0,47
δ, мм	-	0,52	-	-	0,5	-	-
Дополнительные условия ($\Phi\cdot10^{-5}$, Вб)	Φ_2=70	-	$\Phi_2=\Phi_3$	$\Phi_2-\Phi_1$=30	-	$\Phi_1=\Phi_2$	Φ_2=0
Требуется определить	Φ_1; w_2; $U_{мав}$	Φ_1; Φ_2; $U_{мвс}$	I_3;Φ_3; $U_{мсв}$	Φ_3;Φ_1; $U_{мвс}$	Φ_1;Φ_2; $U_{мас}$	I_2;Φ_3; $U_{мав}$	I_2; Φ_3; $U_{мвс}$

Вариант	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**	**13**	**14**
Рисунок	6	9	10	15	14	17	18
W_1	105	400	375	430	400	260	700
I_1,А	1,0	0,75	0,4	0,5	0,154	1,0	0,5
W_2	100	-	-	-	210	-	-
I_2,А	0,3	-	0,3	0,1	0,1	-	-
W_3	950	200	-	200	150	230	300
I_3,А	-	1,0	-	0,5	-	1,0	-
δ, мм	-	1,0	-	-	-	1,25	-
Дополнительные условия ($\Phi\cdot10^{-5}$, Вб)	$\Phi_3-\Phi_1$=20	-	$\Phi_2=\Phi_3$	Φ_2=0	$\Phi_2-\Phi_3$=20	-	$\Phi_1=\Phi_3$
Требуется определить	I_3; Φ_1; $U_{мас}$	Φ_2; Φ_3; $U_{мав}$	W_2;Φ_3; $U_{мвс}$	Φ_1;W_2; $U_{мсв}$	I_3; Φ_1; $U_{мва}$	Φ_2;Φ_3; $U_{мас}$	I_3; Φ_3; $U_{мав}$

Вариант	**15**	**16**	**17**	**18**	**19**	**20**	**21**
Рисунок	3	4	8	11	12	15	16
W_1	100	240	200	145	19	107	125
I_1,А	-	0,25	0,25	1,0	1,0	0,6	2,4
W_2	400	390	-	102	275	-	125
I_2,А	0,05	-	0,2	0,5	-	0,1	2,8
W_3	66	-	-	2000	400	20	-
I_3,А	0,3	-	-	-	0,2	0,7	-
δ, мм	-	-	-	-	-	-	0,48
Дополнительные условия (Ф·10^{-5}, Вб)	$Ф_1$=25	$Ф_2$-$Ф_1$=20	$Ф_1$=$Ф_2$	$Ф_3$=90	$Ф_2$-$Ф_1$=20	$Ф_2$=70	-
Требуется определить	I_1; $Ф_2$; $U_{мвс}$	I_2; $Ф_1$; $U_{мас}$	W_2; $Ф_1$; $U_{мав}$	I_3; $Ф_2$; $U_{мвс}$	I_2; $Ф_3$; $U_{мвс}$	$Ф_3$; W_2; $U_{мва}$	$Ф_3$;$Ф_1$; $U_{мас}$

Вариант	**22**	**23**	**24**	**25**	**26**	**27**	**28**
Рисунок	19	20	1	2	5	6	9
W_1	-	175	350	100	60	200	900
I_1,А	-	0,1	1,3	1,8	0,5	0,53	0,3
W_2	100	-	-	-	300	150	-
I_2,А	2,2	0,2	-	1,1	-	0,7	-
W_3	520	67	500	-	350	975	1000
I_3,А	-	2,5	0,5	-	0,15	-	0,2
δ, мм	-	-	0,5	-	-	-	1,0
Дополнительные условия (Ф·10-5, Вб)	$Ф_2$=$Ф_3$	$Ф_2$-$Ф_3$=30	-	$Ф_1$=$Ф_2$	$Ф_2$=0	$Ф_3$-$Ф_1$=20	-
Требуется определить	I_3;$Ф_2$; $U_{мав}$	W_2;$Ф_2$; $U_{мвс}$	$Ф_1$;$Ф_2$; $U_{мас}$	W_2;$Ф_2$; $U_{мав}$	I_2;$Ф_1$; $U_{мвс}$	I_3;$Ф_2$; $U_{мсв}$	$Ф_1$;$Ф_3$; $U_{мва}$

Параметры магнитопровода

№ рисунка	L_1 , см	S_1, см^2	L_2 , см	S_2, см^2	L_3 , см	S_3, см^2
1	2	3	4	5	6	7
1.	20	4	12	6	30	4
2.	80	6	25	4	80	9
3.	12	2	4	1	12	1,5
4.	40	3	12	5	40	8
5.	20	4	10	8	30	6

1	2	3	4	5	6	7
6.	30	7	12	12	45	12
7.	20	8	7	2	20	2
8.	25	5	10	3	32	10
9.	45	15	22	10	40	15
10.	45	40	14	13	35	19
11.	30	8	15	10	40	8
12.	28	4	8	7	28	10
13.	35	4	15	4	20	5
14.	16	8	6	4	20	5
15.	75	8	10	5	25	4
16.	70	90	35	24	70	40
17.	65	70	25	80	60	60
18.	50	25	30	50	32	70
19.	40	10	25	10	10	4
20.	30	9	9	7	30	15

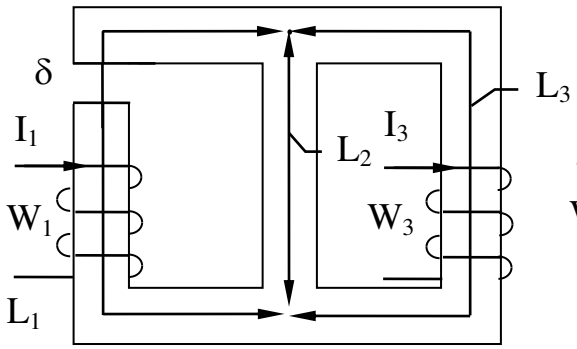


Рис. 1

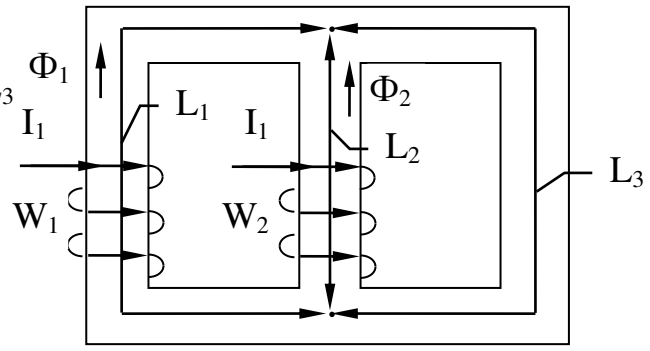


Рис. 2

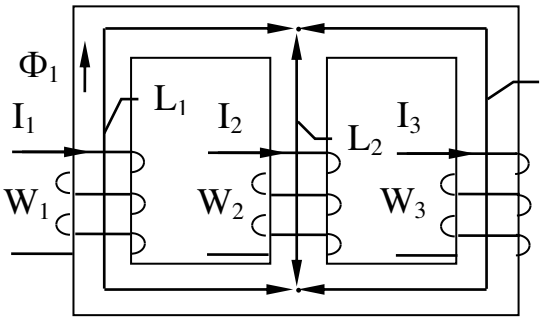


Рис. 3

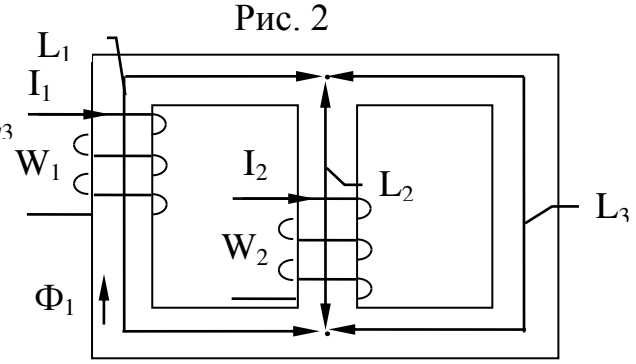


Рис. 4

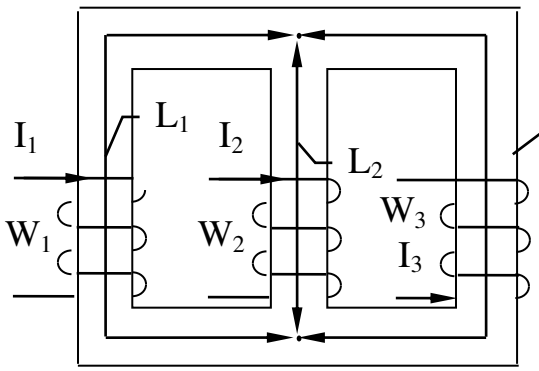


Рис. 5

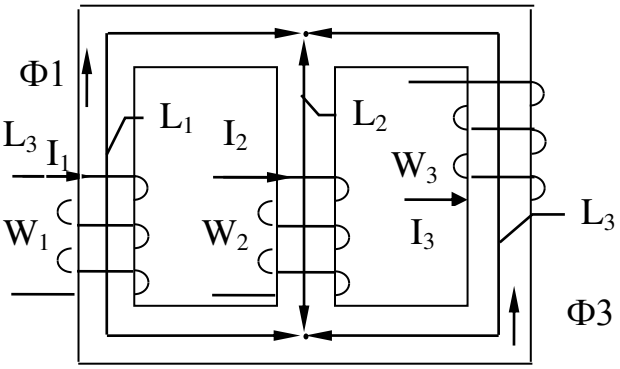


Рис. 6

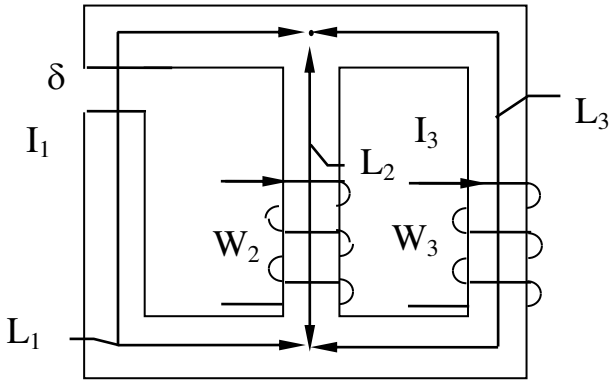


Рис. 7

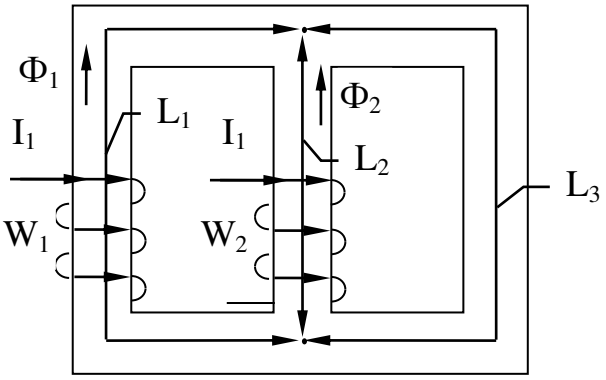


Рис. 8

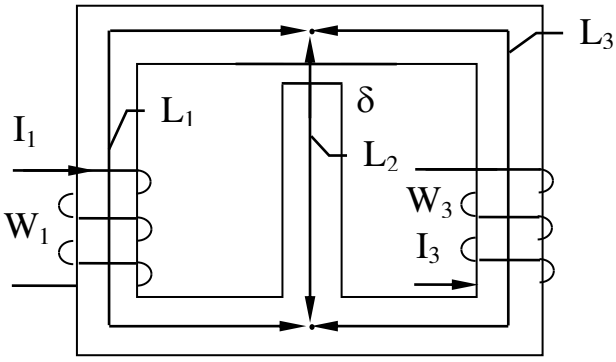


Рис. 9

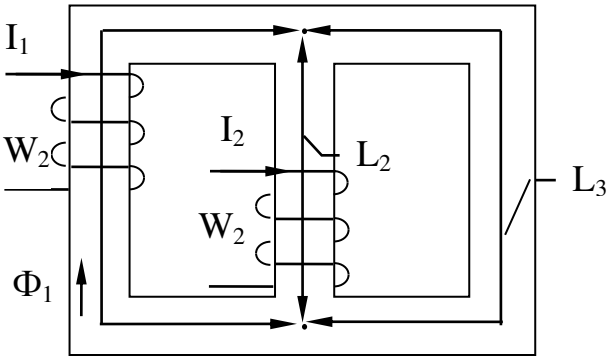


Рис. 10

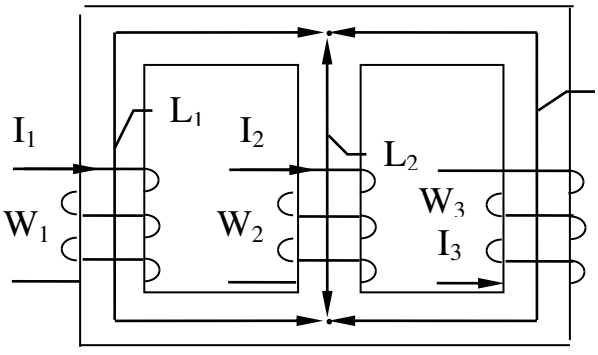


Рис. 11

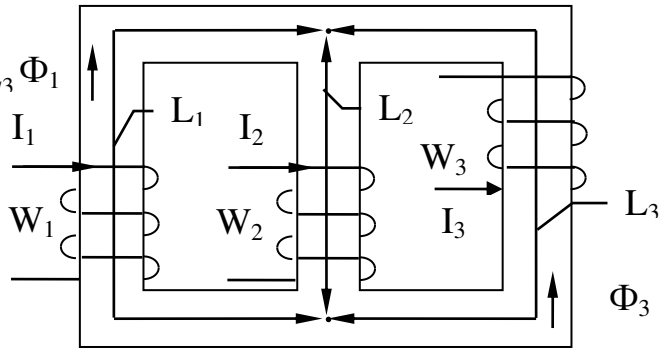


Рис. 12

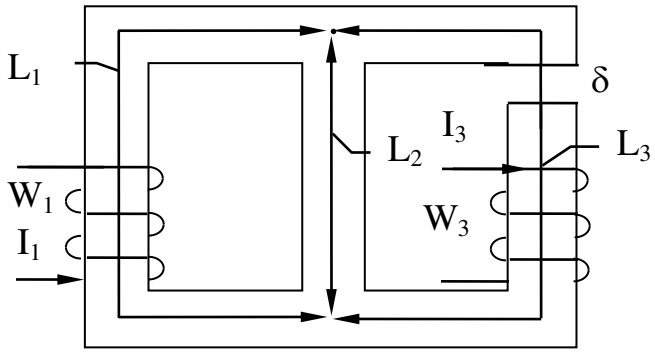


Рис. 13

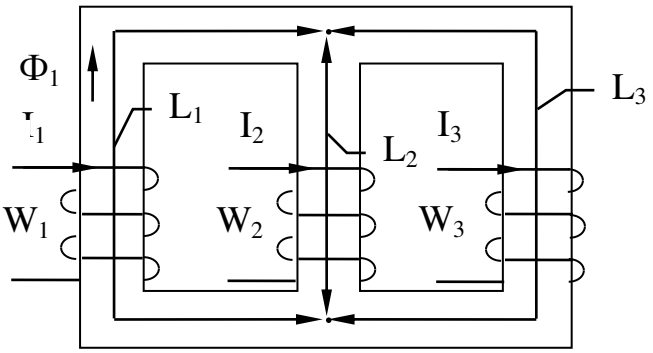


Рис. 14

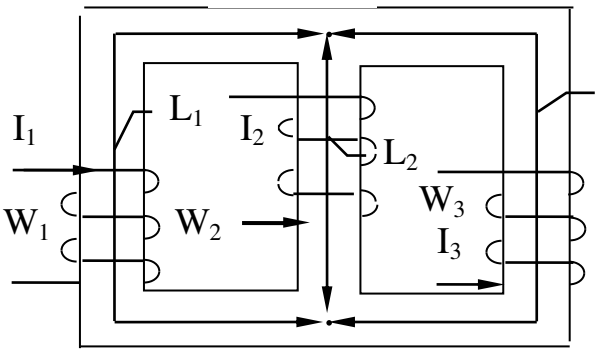


Рис. 15

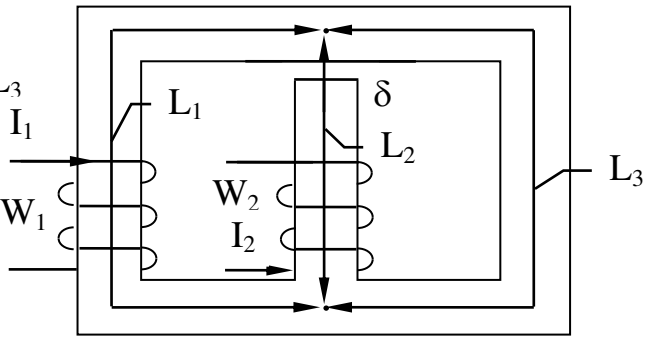


Рис. 16

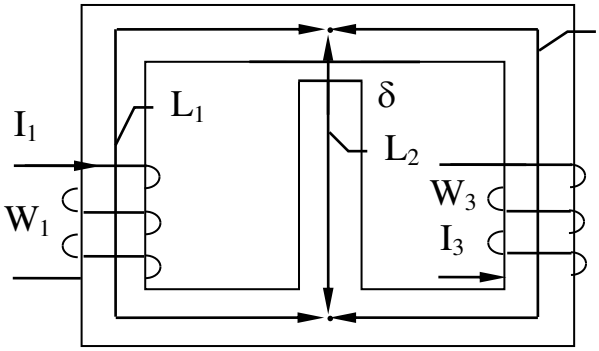


Рис. 17

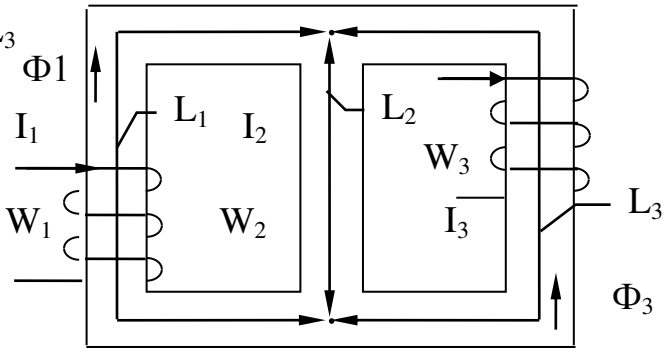


Рис. 18

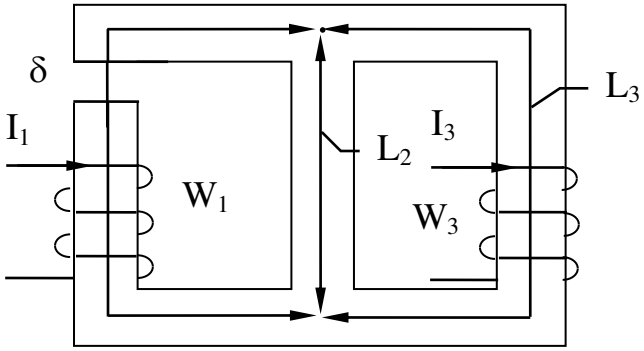


Рис. 19

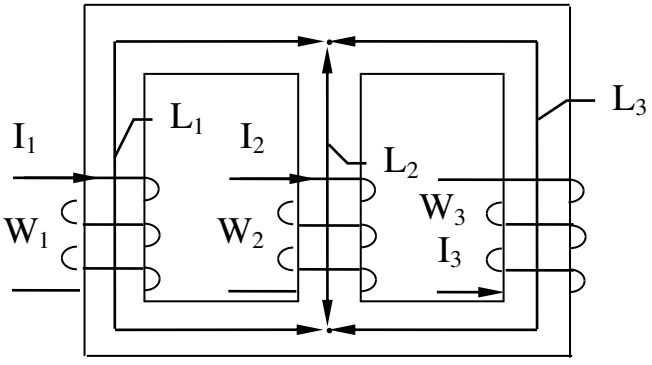


Рис. 20

СПИСОК РЕКОМЕНДОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белецкий А.Ф.Теория линейных электрических цепей [Электронный ресурс] : учебник - 3-е изд. Санкт-Петербург : Лань, 2017. — 544 с. — ISBN 978-5-8114-0905-1. Лань : электронно-библиотечная система. — Режим доступа: https://e.lanbook.com/book/91910

2. Башарин С..А.Теоретические основы электротехники : учебник для студ. учреждений высш. проф. образования / С. А. Башарин, В.В.Федоров. — 5-е изд., перераб. и доп. — М. : Издательский центр «Академия», 2013. — 384 с. — (Сер. Бакалавриат).