

**Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Сибирская государственная автомобильно-дорожная академия (СибАДИ)»**

В.Д. Червенчук, А.Л. Иванов

**ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ. ТЕПЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ
В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АППАРАТАХ**

Учебное пособие

Омск • 2016

УДК 621.3.038(075.8)
ББК 31.264я73
Чер45

Согласно 436-ФЗ от 29.12.2010 «О защите детей от информации, причиняющей вред их здоровью и развитию» данная продукция маркировке не подлежит.

Рецензенты:

канд. техн. наук, доц. В.А. Ощепков (ОмГТУ);
канд. техн. наук, доц. А.С. Гуменюк (ОмГТУ)

Работа утверждена редакционно-издательским советом СибАДИ в качестве учебного пособия.

Червенчук, Владимир Дмитриевич.

Чер45 Электрические аппараты. Тепловые процессы в электрических аппаратах [Электронный ресурс] : учебное пособие / В. Д. Червенчук, А.Л. Иванов. – Электрон. дан. – Омск : СибАДИ, 2016. – Режим доступа: <http://bek.sibadi.org/fulltext/esd236.pdf>, свободный после авторизации. – Загл. с экрана.
ISBN 978-5-93204-939-6.

Кратко излагаются основы электрических аппаратов, назначение, принцип работы, физические явления при эксплуатации в различных режимах. Дается методика расчёта магнитных цепей, электромагнитов постоянного и переменного тока, катушек напряжения, переходного сопротивления контактов, процесса теплопроводности токонесущих частей электрических аппаратов и теплообмена их поверхностей с внешней средой, их термической стойкости. Изложены методы расчёта электромагнитных усилий в электрических аппаратах при коротком замыкании.

В конце каждого раздела читателю предлагаются вопросы для контроля усвоенных знаний.

Имеет интерактивное оглавление в виде закладок.

Предназначено для обучающихся по направлению «Электроэнергетика и электротехника», а также преподавателям, читающим учебную дисциплину «Электрические и электронные аппараты».

Подготовлено на кафедре «Тепловые двигатели и автотракторное электрооборудование».

Текстовое (символьное) издание (2,0 МБ)
Системные требования : Intel, 3,4 GHz ; 150 МБ ; Windows XP/Vista/7 ; DVD-ROM ;
1 Гб свободного места на жестком диске ; программа для чтения pdf-файлов
Adobe Acrobat Reader ; Google Chrome

Редактор Н.И. Косенкова
Техническая подготовка – Т.И. Кукина
Издание первое. Дата подписания к использованию 27.12.2016

Издательско-полиграфический центр СибАДИ. 644080, г. Омск, пр. Мира, 5
РИО ИПЦ СибАДИ. 644080, г. Омск, ул. 2-я Поселковая, 1

© ФГБОУ ВО «СибАДИ», 2016

Введение

Под электрическими аппаратами понимают всевозможные электротехнические устройства, предназначенные для включения и отключения электрических цепей, контроля их состояния, управления, измерения их параметров, защиты от перегрева и перегорания электрических и неэлектрических объектов [1, 6]. Как правило, любой из таких аппаратов может выполнять не одну, а сразу несколько различных функций. Это существенно затрудняет их классификацию по функциональному признаку.

Можно выделить следующие группы электрических аппаратов по функциональному признаку:

- 1) *Коммутационные аппараты*. Они служат для разного рода включений и выключений. Сюда входят электрические ключи, переключатели, силовые выключатели, рубильники.
- 2) *Ограничивающие электрические аппараты*. К ним относятся *реакторы*, которые представляют собой катушки индуктивности, создающие высокое индуктивное сопротивление при коротком замыкании и ограничивающие тем самым ударные токи короткого замыкания, и *разрядники* (вентильные разрядники и нелинейные ограничители перенапряжений). Для ограничения напряжений используют также полупроводниковые стабилитроны.
- 3) *Контролирующие электрические аппараты*. Они обеспечивают контроль заданных параметров. К ним относятся разного рода *реле* и *датчики*.
- 4) *Защитные электрические аппараты*. К ним относятся разного рода *предохранители*, обеспечивающие разрыв цепи при возникновении недопустимых перегрузок.
- 5) *Пускорегулирующие электрические аппараты*. Они обеспечивают управление разного рода электроприводами. К этой группе относятся контакторы, пускатели, реостаты и т.д.
- 6) *Регулирующие электрические аппараты*. Аппараты данной группы служат для регулирования заданного (эталонного) параметра системы. Это разного рода стабилитроны.

Электрические аппараты также классифицируют по напряжению: аппараты *низкого напряжения* (до 1 киловольт) и аппараты *высокого напряжения* (от 1 киловольт и выше); и по роду тока: аппараты *постоянного тока* и аппараты *переменного тока*.

Многие из вышеперечисленных аппаратов разработаны на использовании теории электромагнетизма, на знаниях об электромагнитных явлениях и магнитном взаимодействии. Поэтому начнём их изучение с электромагнитов, которые являются составной частью электромагнитных реле, форсунок, переключателей и т.д.

Глава 1. ЭЛЕКТРОМАГНИТЫ

В 1820 году Эрстед¹ обнаружил, что действие проводника с током на магнитную стрелку значительно превышает действия на неё магнитного поля Земли. При изменении направления тока на противоположное стрелка таким же образом меняла направление. Тогда же Ампер² экспериментально обнаружил, что параллельные проводники с токами одного направления притягиваются, а противоположного направления – отталкиваются. Все эти факты наталкивают на мысль, что магнитное поле создаётся движущимися зарядами (электрическим током) и действует также только на движущиеся заряды. Эти открытия привели к изобретению электромагнитов, которые могут обладать гораздо большей магнитной силой по сравнению с магнитной силой природных магнитов.

1.1. Магнитное поле и магнитодвижущая сила

Силовой характеристикой магнитного поля является *магнитная индукция* – вектор \vec{B} , который имеет направление, показываемое северным концом магнитной стрелки в данном магнитном поле. Модуль магнитной индукции равен [9, с. 140]

$$B = \frac{F_{\max}}{I \cdot l}, \quad (1.1)$$

где F_{\max} – максимальная сила действия магнитного поля на проводник длины l с током I .

Единицей измерения этой характеристики магнитного поля в СИ является тесла³ $\left[1 \frac{\text{Н}}{\text{А} \cdot \text{м}} = 1 \text{Тл}\right]$. Направления этого вектора в каждой точке поля сливаются в силовые линии. Густота силовых линий определяется магнитным потоком $\Phi = \vec{B} \times \vec{n} \cdot S = BS \cos \alpha$ по всему сечению магнитопровода (аналогия с потоком воды в трубе, который характеризуется расходом через сечение S). Измеряется магнитный поток в веберах [$1 \text{Вб} = 1 \text{Тл} \cdot \text{м}^2$].

¹ Ганс Христиан Эрстед (*Hans Christian Ørsted*, 1777—1851) - датский физик. С 1815 г. постоянный секретарь Датского королевского общества.

² Андре Мари Ампер (1775 – 1836) – французский физик, математик, химик, член Парижской АН (1814), иностранный член Петербургской АН (1830).

³ Единица измерения плотности магнитного потока (магнитной индукции) названа в честь сербского физика и изобретателя Николы Теслы (1856 – 1943).

Влияние среды, где имеется магнитный поток, оценивается вектором напряжённости $\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu \cdot \mu_0}$ (измеряется в единицах $\frac{A}{m}$), где μ – относительная магнитная проницаемость среды, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{Гн}{м}$ – абсолютная магнитная проницаемость вакуума (и воздуха).

Для ферромагнетиков $\mu \gg 1$. Она показывает, во сколько раз ферромагнитный сердечник усиливает магнитное поле \vec{B} , создаваемое током I . Ферромагнитные материалы легко намагничиваются, поэтому магнитная индукция в магнитопроводе значительно больше, чем в окружающей среде.

При постоянном электрическом токе I направление потока Φ неизменно – это будет *магнитная цепь* с постоянной магнитодвижущей силой (МДС) – аналогия ЭДС. Природные магниты также являются источником такого магнитного потока.

При переменном электрическом токе i направление потока Φ меняется – это будет магнитная цепь с переменной МДС.

На магнитные цепи, как и на электрические, распространяются понятия: узел, ветвь, контур.

Для магнитного поля также справедлив принцип суперпозиции, из которого следует, что при наличии нескольких источников магнитного поля результирующая магнитная индукция равна векторной сумме магнитных индукций полей, которые создаются каждым из этих источников в отдельности: $\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2 + \dots + \vec{B}_n$.

Сила, с которой магнитное поле \vec{B} действует на проводник с током I , называется силой Ампера. Она определяется из *закона Ампера*, который в дифференциальной форме имеет следующий вид:

$$d\vec{F}_A = I[d\vec{l}, \vec{B}]. \quad (1.1a)$$

Здесь направление вектора $d\vec{F}_A$ определяется по правилу векторного произведения. Если проводник имеет длину l , а магнитное поле однородно, то модуль силы Ампера равен

$$F_A = IBl \sin \alpha, \quad (1.2)$$

где α – угол между вектором \vec{B} и направлением тока в проводнике.

Силу ампера можно определить по *правилу левой руки* (рис. 1.1):

Расположить левую руку так, чтобы линии магнитной индукции входили в ладонь, четыре пальца были направлены по току (по направлению от плюса к минусу), тогда отставленный в сторону большой палец покажет направление силы \vec{F}_A .

Рассмотрим отдельный заряд q , движущийся со скоростью \vec{v} в магнитном поле \vec{B} . Сила \vec{F}_L , с которой магнитное поле действует на движущийся заряд, называется *силой Лоренца*¹: $\vec{F}_L = |q|[\vec{v}, \vec{B}]$

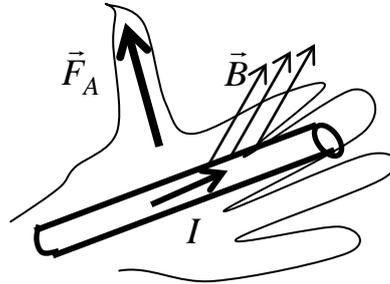


Рис. 1.1. Правило левой руки

Тогда выражение для модуля этой силы будет иметь вид

$$F_L = |q|vB \sin \alpha, \quad (1.2a)$$

где α – угол между вектором \vec{B} и направлением скорости v движущейся частицы с зарядом q .

Поскольку сила Лоренца перпендикулярна перемещению заряда, она не может совершать работы, а изменяет лишь направление скорости движущегося заряда и действует как центростремительная сила, сообщая ему центростремительное ускорение. Радиус окружности, по которой движется частица, зависит от её заряда q , массы m , скорости v и индукции \vec{B} магнитного поля.

Вопросы для самоконтроля и задания

1. Что такое магнитная индукция?
2. Напишите закон Ампера.
3. Сформулируйте закон Лоренца.
4. Напишите закон Био – Савара – Лапласа в дифференциальной форме.

1.2. Неразветвлённая однородная магнитная цепь

Рассмотрим сначала неразветвлённую однородную магнитную цепь из одного материала с постоянным сечением. По теореме циркуляции магнитного поля [9, с. 173]

$$\oint \vec{H} dl = \sum I, \quad (1.3)$$

т.е. интеграл вектора напряжённости по замкнутому контуру равен полному току, охваченному этим контуром.

Применим этот закон к кольцевому соленоиду с ферромагнитным сердечником (рис. 1.2). Магнитный поток в сердечнике будем считать близким к равномерному.

¹ Хендрик Антон Лоренц (*Hendrik Antoon Lorentz*; 1853 – 1928) — выдающийся голландский физик. В 1880 г. совместно с однофамильцем Людвигом Лоренцем (*Ludvig Valentin Lorenz*, 1829 – 1891, датский физик-теоретик) вывел формулу для данной силы.

Выделим в соленоиде контур по его средней линии с радиусом R . В силу равномерности поля вектор \vec{H} одинаков в каждой точке средней линии и касается её. Тогда согласно (1.3)

$$\oint H dl = H \cdot l_{cp} = H \cdot 2\pi R = Iw, \quad (1.4)$$

где $l_{cp} = 2\pi R$ – длина средней линии сердечника; w – число витков обмотки сердечника.

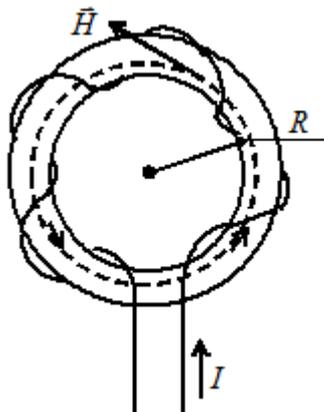


Рис. 1.2. Кольцевой соленоид с ферромагнитным сердечником

Таким образом, для однородной магнитной цепи по заданному току I однозначно можно определить модуль вектора напряжённости магнитного поля по формуле

$$H = \frac{Iw}{2\pi R}, \quad (1.5)$$

а его направление в каждой точке магнитопровода определяется по правилу буравчика. Затем можно найти магнитную индукцию

$$B = \mu\mu_0 H \quad (1.6)$$

и магнитный поток

$$\Phi = BS. \quad (1.7)$$

Измеряя одновременно ток I и магнитный поток Φ , можно снять экспериментально кривые намагничивания (рис. 1.3).

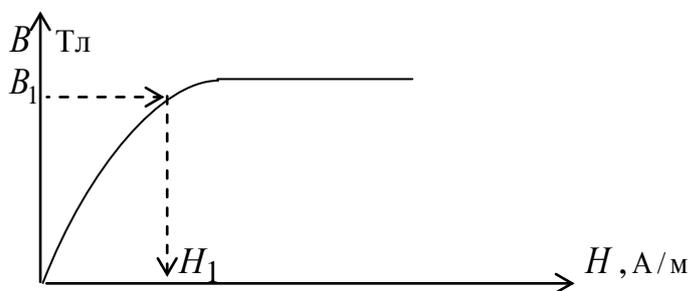


Рис.1.3. График кривой намагничивания сердечника

При заданной кривой намагничивания можно решать две задачи:

1. Прямая задача. По заданному магнитному потоку Φ найти H_1 и намагничивающий ток I .
2. Обратная задача. По заданному намагничивающему току I найти магнитный поток Φ .

Эти две задачи решались без учёта рассеяния магнитного потока. В неоднородной магнитной цепи решения этих задач усложняются.

Вопросы для самоконтроля и задания

1. Сформулируйте теорему о циркуляции магнитного поля.
2. Какова связь напряжённости и индукции магнитного поля?
3. Какова связь напряжённости и тока в обмотке круглого соленоида?

1.3. Прямая задача расчёта неразветвлённой неоднородной магнитной цепи

Пусть заданы геометрические размеры магнитной цепи (рис. 1.4,а), кривая намагничивания, характеризующая свойства ферромагнитных материалов [5, с. 170 – 175] (рис. 1.4,б) и магнитный поток Φ .

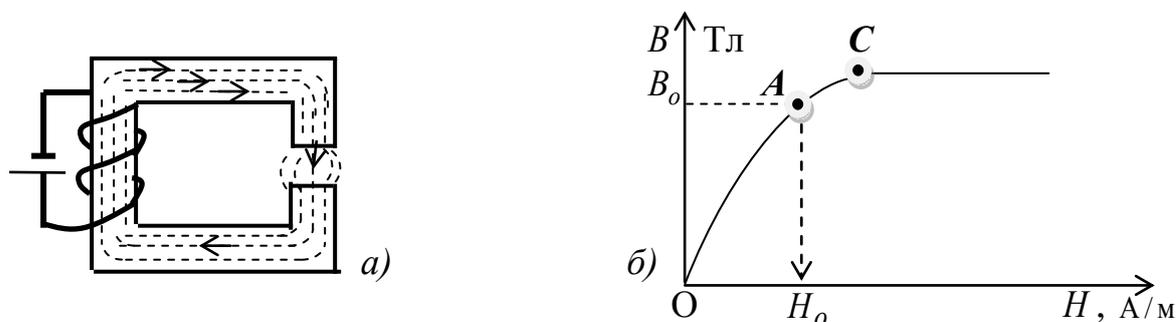


Рис. 1.4 Схема магнитной цепи (а) и кривая намагничивания (б)

Требуется определить поперечное сечение сердечника S и намагничивающий ток I .

Решение. На кривой намагничивания (см. рис. 1.4, б) показана точка C – граница насыщения (все домены ферромагнетика ориентированы по силовым линиям магнитного поля). Оптимальная точка намагничивания A лежит ниже точки C . Точке A соответствует оптимальное значение магнитной индукции сердечника B_0 .

При индукции $B < B_0$ увеличивается сечение магнитопровода $S = \Phi / B$ (т.е. будет иметь место перерасход стали), а при $B > B_0$ начнёт резко возрастать напряжённость H , что потребует резкого увеличения тока или числа витков в обмотке (перерасход меди).

Для вычисления тока магнитную неоднородную цепь делят на однородные участки, вдоль которых H и B неизменны. Таких участков здесь два: сердечник, имеющий постоянное сечение, и воздушный зазор. Магнитные индукции на каждом участке

$$B_c = \frac{\Phi}{S_c} \text{ и } B_3 = \frac{\Phi}{S_3}, \quad (1.8)$$

где S_c и S_z – сечения сердечника и зазора соответственно. Обычно в зазоре магнитный поток несколько выпучивается ($S_z > S_c$, рис. 4,а), однако при небольших зазорах $S_z \cong S_c$.

Напряжённость в зазоре определится из $H_z = \frac{B_z}{\mu_0}$, а напряжённость в сердечнике $H_c = H_o$ – по кривой намагничивания (рис. 4,б). В законе полного тока (1.3) интеграл по контуру ($\oint \vec{H}dl = \sum_{i=1}^n H_i l_i$) можно заменить соответствующей суммой, получим

$$H_c \cdot l_c + H_z \cdot l_z = Iw, \quad (1.9)$$

где l_c, l_z – длина сердечника и зазора соответственно.

Из последнего равенства следует

$$I = \frac{1}{w} (H_c \cdot l_c + H_z \cdot l_z)$$

и задача решена.

Произведение $H_i \cdot l_i = U_i$ называется магнитным напряжением, показывающим, какая доля МДС $F = Iw$ расходуется на проведение потока Φ через данный участок магнитной цепи. Чем больше напряжённость поля H_i и чем больше длина участка l_i , тем больше ампер-витков $F = Iw$ надо затратить для проведения через него магнитного потока.

Значение напряжённости в воздушном зазоре значительно больше, чем в сердечнике. В частности, для электротехнической стали $\mu_{\max} = 4000$. Поэтому при равных величинах B (при коротких зазорах $S_z \cong S_c$ и, следовательно, $B_z \cong B_c$) напряжённость $H_z = 4000 H_c$, т.е. 1 мм зазора эквивалентен 4 м сердечника из данной стали.

Паразитные воздушные зазоры в магнитных цепях должны исключаться, поскольку они вызывают резкое увеличение намагничивающих токов. Для уменьшения намагничивающих токов длины участков магнитопровода должны быть как можно короче.

Если магнитная цепь имеет заметный воздушный зазор, то в выражении (1.9) обычно $H_c \cdot l_c \ll H_z \cdot l_z$. При расчётах такой цепи можно пренебречь величиной $H_c \cdot l_c$, т.е. считать, что сердечник – идеальный магнитопровод, не требующий МДС на прохождение по нему магнитного потока.

Вопросы для самоконтроля

1. Какой точке кривой намагничивания соответствует оптимальное значение магнитной индукции сердечника?
2. Если выбрать в качестве точки намагничивания точку насыщения сердечника, то к чему это приведёт?
3. Если точку намагничивания взять ниже оптимальной, то к чему это приведёт?
4. Как отличаются между собой магнитные проницаемости воздуха и электротехнической стали?

1.4. Обратная задача расчёта неразветвлённой неоднородной магнитной цепи. Аналогия магнитных цепей с электрическими

Пусть заданы размеры и материал магнитопровода, число витков w и ток I магнитной цепи. Требуется найти поток Φ [4, с. 172 – 175].

Решение. Теперь известна правая часть $F = Iw$ уравнения (1.9). Как распределить эту МДС между сердечником и зазором? Такую задачу решают методом от обратного. Суть этого метода в том, что сначала задаются произвольно несколькими значениями магнитного потока Φ_1, Φ_2, Φ_3 и для каждого из них решают прямую задачу, определяя соответствующие им токи намагничивания I_1, I_2, I_3 . Затем по полученным данным строится график $\Phi(I)$. Отложив на нём заданный ток I_0 (рис. 1.5), находят искомую величину магнитного потока Φ_0 .

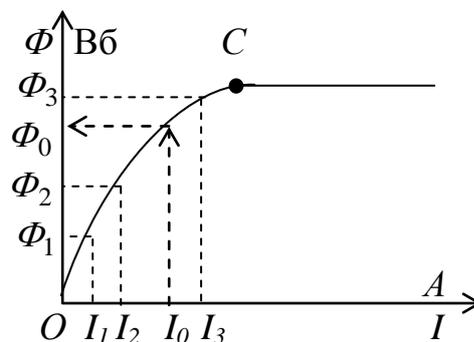


Рис.1.5. Вебер-амперная характеристика

Кривая $\Phi(I)$ устанавливает однозначную зависимость между намагничивающим током I (причиной) и создаваемым им магнитным потоком Φ (следствием). Она называется магнитной или вебер-амперной характеристикой данной магнитной цепи и определяется расчётом или экспериментально. Функция $\Phi(I)$ нелинейная. Вначале поток Φ растёт пропорционально току (линейная часть характеристики). Но при приближении к границе насыщения ферромагнитного сердечника даже значительное увеличение тока I даёт малое приращение величине магнитного потока Φ . Поэтому работа в зоне насыщения нерациональна.

Из выражения (1.9) исключим напряжённости участков магнитной цепи, используя соотношения (1.6), (1.7) и (1.8). Получим

$$\Phi \cdot R_{mc} + \Phi \cdot R_{mз} = Iw, \quad (1.10)$$

где $R_{mc} = \frac{l_c}{\mu \cdot \mu_0 \cdot S_c}$, $R_{mз} = \frac{l_з}{\mu_0 \cdot S_з}$ – магнитные сопротивления сердечника и воздушного зазора.

По аналогии с электрической цепью уравнение (1.10) можно назвать уравнением состояния магнитной цепи. Оно показывает, что магнитодвижущая сила $F = Iw$ расходуется на проведение магнитного потока Φ через магнитные сопротивления R_{mc} и $R_{mз}$ участков магнитной цепи.

Между магнитными и электрическими цепями имеется формальная аналогия между их величинами. Эта аналогия приведена в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Аналогия между электрическими и магнитными параметрами

Электрическая цепь	Магнитная цепь
I – электрический ток	Φ – магнитный поток
E – ЭДС	$F = Iw$ – МДС
R – электрическое сопротивление $R = \rho \frac{l}{S}$	R_M – магнитное сопротивление $R_M = \frac{1}{\mu_a} \frac{l}{S}$
ρ – удельное электрическое сопротивление	$\frac{1}{\mu_a}$ – удельное магнитное сопротивление
$\gamma = \frac{1}{\rho}$ – удельная электропроводность	μ_a – абсолютная магнитная проницаемость среды $\mu_a = \mu_0 \mu$.
$U = IR$ – электрическое напряжение	$U_M = \Phi \cdot R_M$ – магнитное напряжение
\vec{J} – вектор плотности эл. тока	\vec{B} – вектор магнитной индукции
$I = \int_S \vec{J} d\vec{S}, \operatorname{div} \vec{J} = 0$	$\Phi = \int_S \vec{B} d\vec{S}, \operatorname{div} \vec{B} = 0$
\vec{E} – вектор напряжённости эл. поля	\vec{H} – вектор напряжённости магн. поля
$\vec{J} = \gamma \cdot \vec{E}, U = \int_l \vec{E} dl$	$\vec{B} = \mu_a \cdot \vec{H}, U_M = \int_l \vec{H} dl$
Объёмная плотность энергии, $\frac{\text{Дж}}{\text{м}^3}$ $w_e = \frac{\epsilon_0 \epsilon \cdot E^2}{2}, \epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Ф}}{\text{м}}$	Объёмная плотность энергии, $\frac{\text{Дж}}{\text{м}^3}$ $w_m = \frac{\mu_0 \mu \cdot H^2}{2}, \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Гн}}{\text{м}}$
$\sum I = 0$ – первый закон Кирхгофа	$\sum \Phi = 0$ – первый закон Кирхгофа
$\sum E = \sum IR$ – второй закон Кирхгофа	$\sum F = \sum \Phi R_M$ – второй закон Кирхгофа

Магнитные сопротивления, как и электрические, пропорциональны длинам участков, обратно пропорциональны их сечениям и зависят от свойств материала участка (магнитной проницаемости). Магнитные сопротивления воздушных зазоров намного больше, чем сердечников. В частности, для рассмотренной выше магнитной цепи $R_{M3} = 4000R_{M1}$.

Выражение, аналогичное закону Ома для электрической цепи, условно называют законом Ома для магнитной цепи:

$$\Phi = \frac{Iw}{R_{M1} + R_{M3}} = \frac{Iw}{\sum_{i=1}^n R_{Mi}}, \quad (1.11)$$

т.е. магнитный поток равен МДС, делённой на общее сопротивление магнитной цепи $\sum_{i=1}^n R_{mi}$, n – число участков.

Первый закон Кирхгофа¹ для магнитных цепей – алгебраическая сумма магнитных потоков в узле равна нулю.

Второй закон Кирхгофа для магнитных цепей – сумма падений магнитных потенциалов по замкнутому контуру равна сумме МДС по этому контуру.

Для магнитных цепей, как и для электрических, возможно составление схем замещения [5, с. 6]. Эти схемы рассчитываются с помощью указанных выше законов. Следует только иметь в виду, что магнитные сопротивления существенно нелинейны.

На рис. 1.6 представлен пример схемы замещения для электромагнита постоянного тока (без учёта рассеяния по потоку [2, с. 24]).

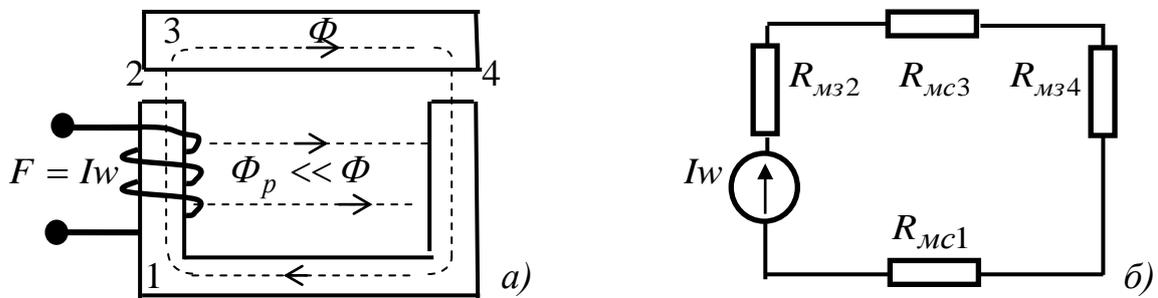


Рис. 1.6. Электромагнит постоянного тока (а) и его схема замещения (б)

Вопросы для самоконтроля и задания

1. Что собой представляет вебер-амперная характеристика?
2. Напишите закон Ома для магнитной цепи.
3. Какой смысл имеет в магнитной цепи величина, обратная абсолютной магнитной проницаемости магнитопровода?
4. В каких единицах измеряется магнитодвижущая сила?
5. Сформулируйте первый закон Кирхгофа для магнитной цепи.
6. Что обеспечивает аналогия между магнитными и электрическими полями?

¹ Густав Роберт Кирхгоф (*Gustav Robert Kirchhoff*; 1824 – 1887) – немецкий физик, с 1862 года состоял членом-корреспондентом Санкт-Петербургской академии наук, в 1875 году избран членом Берлинской академии наук.

1.5. Особенности магнитных цепей с переменной МДС. Магнитный поток идеальной катушки переменного тока с ферромагнитным сердечником

В установившемся режиме ток намагничивающей катушки постоянного тока, согласно закону Ома, равен $I = U / R$. При включении этой же катушки в цепь переменного тока

$$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + X_L^2}},$$

где U – действующее напряжение сети; R – активное сопротивление проводов катушки; X_L – индуктивное сопротивление катушки, которое формально учитывает токоограничивающее влияние ЭДС самоиндукции E_L , возникающей в катушке на переменном токе $i(t) = \sqrt{2}I \sin \omega t$.

Ток в идеальном индуктивном элементе (не имеющем активного сопротивления R) ограничивается возникшим здесь ЭДС самоиндукции, значение которой определяется причинно-следственной цепочкой

$$u \rightarrow i \rightarrow \Psi \rightarrow e_i \rightarrow u, \quad (1.12)$$

а именно, переменное напряжение u (с амплитудой $\sqrt{2}U$) вызывает переменный ток i (с амплитудой $I_{\max} = \sqrt{2}I$) такой, что создаваемый им переменный магнитный поток с *потокосцеплением* Ψ [4, с. 149] наводит в индуктивном элементе ЭДС самоиндукции $e_i = -L \frac{di}{dt}$ с такой амплитудой, что она точно уравнивает приложенное напряжение.

Из-за влияния индуктивного сопротивления X_L ток в катушке цепи переменного тока меньше, чем в цепи постоянного тока. Поэтому катушки, рассчитанные на включение в цепь переменного тока, нельзя включать в цепь постоянного тока на то же напряжение (они сгорят).

Обычно для катушек в цепи переменного тока $X_L \gg R$, поэтому при изучении главных свойств магнитных цепей переменного тока можно пренебречь активным сопротивлением R , т.е. считать катушку идеальной с нулевым R и нулевым потоком рассеяния ($R = 0; \Phi_p = 0$).

При включении идеальной катушки в цепь переменного тока установившиеся в этой цепи процессы описываются причинно-следственной цепочкой (1.12). В сердечнике такой катушки и в окружающем её воздушном пространстве будет наводиться переменное магнитное поле $B(t)$ и переменный магнитный поток. Пусть $\Phi = \Phi(t)$ – мгновенное значение величины магнитного потока (в момент времени t), а w – число витков катушки. Тогда величину ЭДС самоиндукции можно определить по формуле

$$e_L = -w \frac{d\Phi}{dt}.$$

Учитывая (1.12), можно записать $u = w \frac{d\Phi}{dt}$. Интегрируя это уравнение, получим

$$\Phi = \frac{1}{w_0} \int u(t) dt, \quad (1.13)$$

т.е. магнитный поток $\Phi(t)$ в идеальной катушке цепи переменного тока создаётся током i , но характер его изменения определяется приложенным напряжением $u(t) = U_m \sin \omega t$. Подставим это значение напряжения в (1.13) и, проинтегрировав, получим

$$\Phi = \frac{1}{w_0} \int U_m \sin \omega t dt = -\frac{U_m}{w \cdot \omega} \cos \omega t = \Phi_m \sin(\omega t - 90^\circ),$$

где $\Phi_m = \frac{U_m}{w \cdot \omega}$ – амплитуда магнитного потока; $U_m = \sqrt{2}U$ – амплитуда напряжения. Из полученного результата следует, что:

- а) при синусоидальном напряжении, приложенном к идеальной катушке, её магнитный поток – синусоидален;
- б) магнитный поток отстаёт от напряжения по фазе на 90° ;
- в) частота колебаний значений магнитного потока равна частоте синусоидального напряжения, приложенного к идеальной катушке;
- г) амплитуда магнитного потока Φ_m определяется амплитудным значением приложенного напряжения U_m .

С учетом $\omega = 2\pi f$ и $U_m = \sqrt{2}U$ приложенное к катушке действующее напряжение равно

$$U_L = \frac{2\pi f}{\sqrt{2}} w \Phi_m = 4,44 f \cdot w \cdot \Phi_m. \quad (1.14)$$

Так связаны между собой индуктивное напряжение катушки, его частота, число её витков и амплитуда магнитного потока.

Переменный магнитный поток приводит к нагреву магнитопровода из-за магнитных потерь в стали, которые вызываются перемагничиванием сердечника (гистерезисные потери) и вихревыми токами в сердечнике (вихревыми потерями).

Для уменьшения гистерезисных потерь применяют электротехнические стали и сплавы с узкой петлёй гистерезиса.

Для уменьшения вихревых потерь сердечник набирают (шихтуют) из пластин толщиной (0,35 – 0,5) мм, изолированных друг от друга лаком, папиросной бумагой и т.д.

Удельные магнитные потери в ферромагнитных материалах приводятся в каталогах в зависимости от материала, частоты тока и индукции.

Следовательно, ферромагнитные сердечники для магнитных цепей постоянного тока могут быть сплошными, а для магнитных цепей

переменного тока набираются (шихтуются) из тонких листов электротехнической стали.

Магнитные цепи широко используются в трансформаторах и электрических машинах. Свойство катушек изменять своё сопротивление с изменением воздушного зазора используется для создания индуктивных датчиков перемещения (по величине тока можно судить о величине воздушного зазора между сердечником и якорем).

В сварочном деле это свойство используется для регулирования величины сварочного тока (при увеличении зазора индуктивное сопротивление катушки уменьшается и ток растёт, а при уменьшении зазора, ток, наоборот, увеличивается).

Способность электромагнита притягивать близко лежащие ферромагнитные тела используется в тяговых электромагнитах. Ток, проходя по катушке ферромагнитного сердечника, создаёт магнитный поток Φ . По обеим сторонам воздушного зазора создаются два противоположных полюса – **N** (северный) и **S** (южный). Направление силовых линий потока Φ в сердечнике от **S** к **N**, а в воздушном зазоре от **N** к **S**, что образует замкнутую цепь магнитопровода. Общее тяговое усилие электромагнита в зазоре

$$F = \frac{\Phi^2}{2\mu_0 S_z}, \quad \text{где } S_z \text{ – сечение воздушного зазора. К основным}$$

характеристикам тяговых электромагнитов относятся общее тяговое усилие, измеряемое в ньютонах, и максимальный ход, измеряемый в миллиметрах.

Вопросы для самоконтроля

1. Какова природа индуктивного сопротивления в катушке цепи переменного тока?
2. Почему катушки, рассчитанные на включение в цепь переменного тока, нельзя включать в цепь постоянного тока на то же напряжение?
3. Как связаны между собой индуктивное напряжение катушки, его частота, число её витков и амплитуда магнитного потока?
4. Какие потери электрической энергии возникают в сердечнике электромагнита переменного тока и как их уменьшить?

1.6. Электромагниты постоянного тока. Рабочий цикл

В таких электромагнитах магнитное поле создаётся с помощью обмотки постоянного тока. Несмотря на разнообразие, электромагниты имеют узлы с общим назначением для всех их видов:

- катушка с намагничивающей обмоткой;
- неподвижная часть магнитопровода (сердечник);
- подвижная часть магнитопровода (якорь).

В зависимости от расположения якоря относительно остальных узлов электромагнита и характера воздействий на якорь со стороны магнитного потока электромагниты постоянного тока подразделяются на следующие типы:

- электромагниты с втягивающимся якорем;
- электромагниты с внешним притягивающимся якорем;
- электромагниты с внешним поперечно движущимся якорем.

Кроме того, в зависимости от способа включения обмотки катушки различают электромагниты с обмотками параллельного или последовательного включения. В первом случае ток в цепи обмотки определяется только её параметрами, а во втором – параметрами остальных элементов цепи.

И наконец, электромагниты различаются по скорости их срабатывания.

Циклический характер работы электромагнита определяется тем, что якорь совершает поступательное или вращательное движение в ограниченных пределах и периодически требует возврата в своё исходное положение.

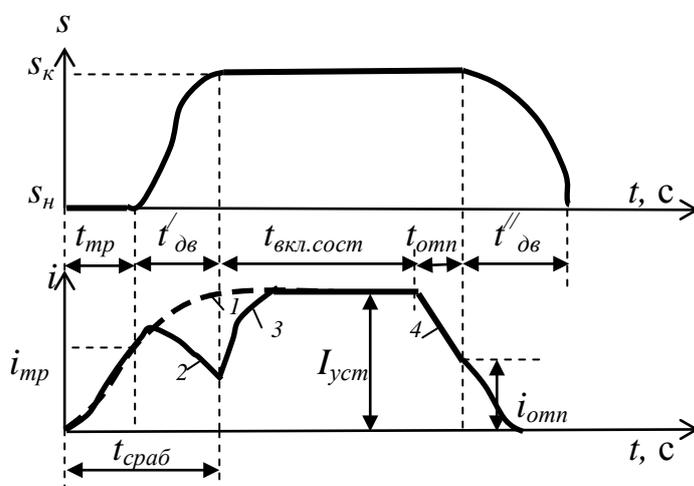


Рис. 1.7. Кривые $s = s(t)$ и $I = I(t)$ рабочего цикла электромагнита

Рабочий цикл электромагнита описывают кривые зависимости от времени $s = s(t)$ – положения якоря и $I = I(t)$ – тока в обмотке катушки (рис. 1.7).

Первым этапом рабочего цикла является процесс срабатывания. Его продолжительность $t_{ср}$. Он начинается с момента подачи питания на обмотку, когда якорь переходит из своего начального состояния s_n в конечное s_k . Этот этап подразделяется на период $t_{тр}$ трогания и период движения $t'_{дв}$.

В период трогания ток в обмотке нарастает до i_{mp} . Электромагнитная сила при этом достигает равенства с силами, противодействующими движению якоря.

Время трогания $t_{тр}$, в течение которого ток достигает величины i_{mp} , определяется как схемой включения обмотки и условиями её питания, так и параметрами самого электромагнита и его нагрузки. Характер движения зависит от соотношения движущих (электромагнитных) сил и противодействующих им сил, а также массы якоря, трения и т.д.

В период движения при срабатывании совершается работа, и ток в обмотке может уменьшиться (кривая 2). Это изменение связано с процессом установления тока в обмотке, который имел бы место при неподвижном якоре (кривая 1). Время движения при срабатывании при сложении с временем трогания определяет время срабатывания

$$t'_{\text{дв}} + i_{\text{тр}} = t_{\text{сраб.}}$$

После перемещения якоря в положение s_k следует период включенного состояния, в течение которого система находится в покое, а обмотка остаётся во включенном состоянии. В начальной стадии этого периода ток в обмотке нарастает до установившегося значения $I_{\text{уст}}$ (кривая 3) и далее остаётся неизменным до конца данного периода.

Длительность включенного состояния зависит от требований эксплуатации. Температура нагрева обмотки при этом не должна превосходить допустимого значения.

Процесс возврата якоря в исходное состояние, так же как и срабатывание, происходит в два этапа. Сначала при отключении обмотки ток спадает до величины тока отпускания $i_{\text{омн}}$, при котором электромагнитная сила становится равной силе, возвращающей якорь в исходное положение. Длительность этого процесса характеризуется промежутком времени $t_{\text{омн}}$, зависящим от нагрузки, условий отключения обмотки и от задерживающего действия вихревых токов в массивных частях электромагнита и короткозамкнутых контурах, если такие имеются. Перемещение подвижных частей в исходное положение происходит в течение времени $t''_{\text{дв}}$, которое зависит от ряда факторов и, в первую очередь, от величины усилий, отбрасывающих якорь. Время отпускания $t_{\text{омн}}$ и время движения $t''_{\text{дв}}$ в сумме составляют время возврата

$$t_{\text{возвр}} = t_{\text{омн}} + t''_{\text{дв}}$$

Цикл работы электромагнита завершается периодом отключенного состояния, в течение которого обмотка обесточена и происходит её охлаждение.

Вопросы для самоконтроля

1. Какие узлы электромагнитов являются общими для всех их видов?
2. Какие схемы включения электромагнита в цепь постоянного тока существуют и в чём их отличия?
3. Из каких этапов состоит рабочий цикл электромагнита?
4. Что влияет на время срабатывания электромагнита?

1.7. Параметры и характеристики электромагнита постоянного тока

Наиболее общими являются динамические характеристики, которые учитывают изменение намагничивающей силы электромагнита в процессе его срабатывания за счёт действия ЭДС самоиндукции и движения, а также учитывают трение, демпфирование (амортизация, гашение колебаний) и инерцию подвижных частей. Для некоторых типов электромагнитов (быстродействующие приводы выключателей, электромагнитные вибраторы

и т.д.) знание динамических характеристик обязательно (только они в достаточной мере характеризуют их работу). Но в связи с тем, что определение динамических характеристик требует больших объёмов вычислений, в большинстве случаев ограничиваются рассмотрением лишь статических характеристик. Последние получаются, если не учитывать влияния на электрическую цепь движущегося якоря, изменения потокосцепления по времени, т.е. считать, что действующее значение тока в обмотке не меняется.

К статическим характеристикам электромагнита относятся:

- 1) *электромеханическая характеристика* – это зависимость от положения якоря электромагнитной силы для различных значений напряжения и тока в обмотке: $F_{эм} = f(s)$ при $U = \text{const}$ и $F_{эм} = \varphi(s)$ при $I = \text{const}$. Данная характеристика должна быть такой, чтобы в любом положении s якоря электромагнитная сила была больше противодействующей;
- 2) *нагрузочная характеристика* связывает значение электромагнитной силы с напряжением на обмотке или с током в ней: $F_{эм} = f(U)$ и $F_{эм} = \varphi(I)$ при $s = \text{const}$;
- 3) *условная полезная работа* определяется как произведение электромагнитной силы, соответствующей данному положению якоря s , на величину его возможного хода $(W_{II})_y = F_{эм}(s_k - s_n)$ при $I = \text{const}$;
- 4) *время срабатывания электромагнита* при прочих равных условиях является функцией начальной силы, противодействующей перемещению якоря $t_{сраб} = f(F_n)$ при $U = \text{const}$;
- 5) *характеристика нагрева* – это зависимость температуры нагрева от продолжительности включённого состояния $\vartheta_{обм} = f(t)$;
- 6) *показатель добротности электромагнита* – это отношение веса электромагнита к величине условной полезной работы $D = \frac{G}{(W_{II})_y} = f(s)$;
- 7) *показатель экономичности* – это отношение потребляемой мощности к величине условной полезной работы $\mathcal{E} = \frac{P}{(W_{II})_y} = f(s)$.

Все эти характеристики позволяют установить пригодность данного электромагнита к определённым условиям его работы.

К основным параметрам электромагнитов относят:

а) *мощность, потребляемая магнитом*, может ограничиваться как величиной допустимого нагрева его обмотки, так и условиями питания цепи обмотки. Для силового электромагнита, как правило, ограничением является его нагрев за период включенного состояния. Некоторые электромагниты (для реле регуляторов и др.) проектируют из расчёта получения

максимального усилия, т.е. минимального потребления мощности при заданной полезной работе. Такие магниты характеризуются небольшими ходами и легкими подвижными частями. Нагрев их обмоток значительно ниже допустимого. Путём увеличения катушки потребляемую мощность можно значительно снизить;

б) *коэффициент запаса*. Практически намагничивающую силу трогания можно считать равной намагничивающей силе срабатывания электромагнита. Отношение намагничивающей силы, соответствующей установившемуся значению тока, намагничивающей силе срабатывания, называют коэффициентом запаса $K_3 = \frac{(Iw)_y}{(Iw)_{cp}} = \frac{I_y}{I_{cp}}$ (обычно $K_3 = 1,4$);

в) *коэффициент возврата* – это отношение намагничивающей силы, при которой происходит возврат якоря, к намагничивающей силе срабатывания. Он повышается при уменьшении хода якоря.

Вопросы для самоконтроля и задания

1. В чем принципиальная разница между динамическими и статическими характеристиками электромагнита?
2. Перечислите статические характеристики электромагнита.
3. Назовите основные параметры электромагнитов.
4. Каковы причины ограничения потребляемой мощности электромагнита?

1.8. Форсировка электромагнитов постоянного тока

Форсировка – ускорение срабатывания. Определяющим во времени срабатывания является время трогания, фактически – изменение **постоянной времени цепи**. Существуют следующие способы форсировки:

а) включение дополнительного резистора R_D в цепь катушки (рис. 1.8) с одновременным увеличением питающего напряжения $U > U_n$ при $I_y = \text{const}$ уменьшает постоянную времени цепи $T = \frac{L_K}{R_K + R_D}$, а следовательно, уменьшится время трогания и срабатывания;

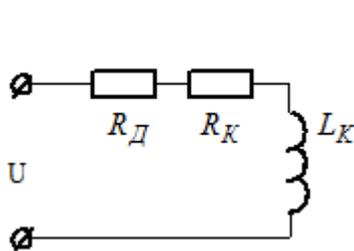


Рис. 1.8. Резистор R_D без шунта

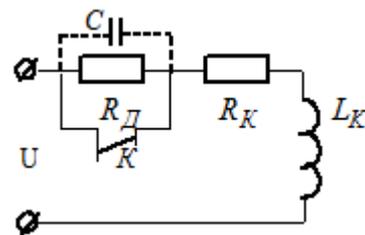


Рис. 1.9. Резистор R_D с шунтом

б) включение дополнительного резистора R_D , шунтируемого дополнительным (вспомогательным) контактом K электромагнита или конденсатором C (рис. 1.9).

В первый момент времени контакт шунтирует резистор R_D , и ток быстро достигает режима трогания из-за малого сопротивления обмотки R_K . После включения электромагнита вводится дополнительное сопротивление R_D , ограничивающее значение установившегося тока.

Действие конденсатора аналогично. В момент включения ёмкость C представляет малое сопротивление и фактически шунтирует R_D . После того, как якорь трогается, происходит дешунтирование R_D (конденсатор C зарядится).

Замедление срабатывания можно осуществить с помощью короткозамкнутого витка, надетого на сердечник (это своеобразный магнитный демпфер).

Вопросы для самоконтроля

1. Как вычисляется постоянная времени цепи?
2. Какие методы существуют для уменьшения времени срабатывания электромагнита?
3. Как можно замедлить срабатывание электромагнита?

1.9. Электромагниты переменного тока. Вибрация якоря

Магнитный поток, создаваемый обмоткой, по которой проходит переменный ток, периодически меняется по величине и направлению в соответствии с изменением переменного тока. При этом сила электромагнитного притяжения будет пульсировать от нуля до максимума с удвоенной частотой по сравнению с частотой переменного тока. В конструкциях вибраторов, электромагнитных молотках и т.д. такая пульсация используется полезно. Однако для тяговых электромагнитов она не желательна (она приводит к вибрации якоря и уменьшению тяги электромагнита). Поэтому для таких электромагнитов принимаются специальные меры для уменьшения глубины пульсации силы.

Одним из способов уменьшения вибраций является применение магнитных систем с расширенными путями магнитного потока, по каждому из которых проходят переменные магнитные потоки, сдвинутые по фазе друг относительно друга. В этом случае суммарный магнитный поток, обтекающий такой электромагнит, будет не переменным, а пульсирующим, причём пульсации будут сглаживаться за счёт индуктивности обмотки электромагнита.

Воздушные зазоры, в которых возникает полезная сила, называются *рабочими*, а те зазоры, в которых не возникает усилия в направлении возможного перемещения якоря, называют *паразитными*.

Для уменьшения потерь на вихревые токи и перемагничивание сердечник электромагнита переменного тока делают из тонколистовой стали с высоким удельным электрическим сопротивлением.

На элементарную работу электромагнитной силы $F_{эм}$, связанной с перемещением якоря на бесконечно малое расстояние ds , расходуется доля магнитной энергии dW_m , т.е. $F_{эм} ds = dW_m$, или

$$F_{эм} = \frac{dW_m}{ds}. \quad (1.15)$$

Согласно физике объёмная плотность магнитной энергии [9, с. 180] в рабочем пространстве электромагнита $w_m = \frac{BH}{2} = \frac{B^2}{2\mu_0} = \frac{\Phi^2}{2\mu_0 A^2}$, где $\Phi = BA$ – магнитный поток, пронизывающий перпендикулярную ему площадь A (сечение якоря), m^2 ; B – магнитная индукция, Тл; H – напряженность магнитного поля, А/м; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная (абсолютная магнитная проницаемость вакуума). Тогда магнитная энергия в рабочем пространстве электромагнита

$$W_m = w_m As = \frac{\Phi^2}{2\mu_0 A} s \text{ и } F_{эм} = \frac{dW_m}{ds} = \frac{\Phi^2}{2\mu_0 A}. \quad (1.16)$$

Поскольку магнитный поток изменяется по синусоидальному закону $\Phi = \Phi_m \sin \omega t$, то $F_{эм} = \frac{\Phi_m^2}{2\mu_0 A} \sin^2 \omega t = \frac{\Phi_m^2}{2\mu_0 A} \frac{1 - \cos 2\omega t}{2}$. Откуда

$$F_{эм} = \frac{F_m}{2} - \frac{F_m}{2} \cos 2\omega t, \quad (1.17)$$

где $F_m = \frac{\Phi_m^2}{2\mu_0 A}$ – амплитуда электромагнитной силы $F_{эм}$.

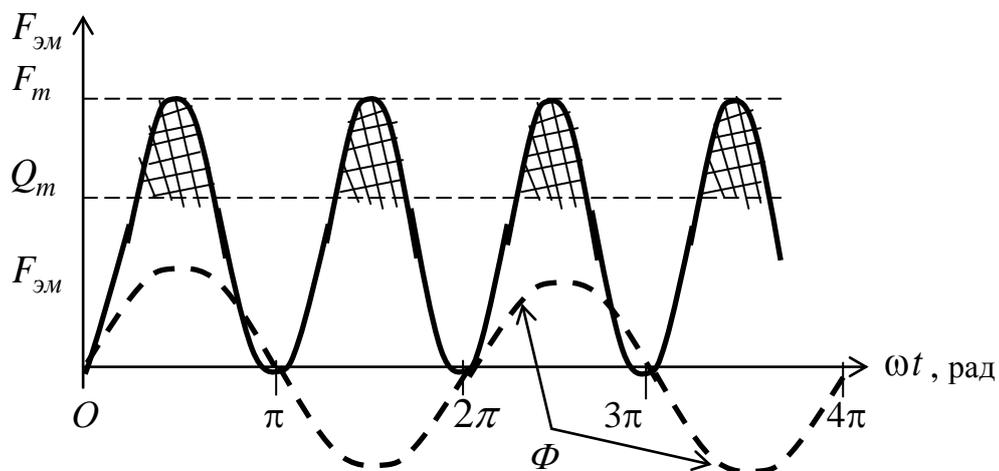


Рис. 1.10. Временная диаграмма электромагнитной силы электромагнита переменного тока

На рис. 1.10 приведены графики $\Phi(t)$ (пунктирная линия) и $F_{эм}(t)$ (сплошная линия), где Q_m – механическая характеристика, равная сумме сил, противодействующих движению якоря. Заштрихованные области соответствуют областям, в которых якорь будет притягиваться. В остальные промежутки времени якорь отпадает.

Вопросы для самоконтроля

1. Как изменяется магнитный поток, создаваемый переменным синусоидальным электрическим током?
2. Чем отличается сердечник электромагнита переменного тока от сердечника электромагнита постоянного тока?
3. Почему в электромагнитах переменного тока имеет место вибрация якоря?
4. Как изменяется электромагнитная сила электромагнита переменного тока?

1.10. Способы устранения вибрации якоря

На стадии изготовления электромагнита в его сердечнике делается прорезь, в которую вставляется короткозамкнутый виток из материала высокой электропроводности (рис. 1.11). Этот виток охватывает 80% сечения сердечника.

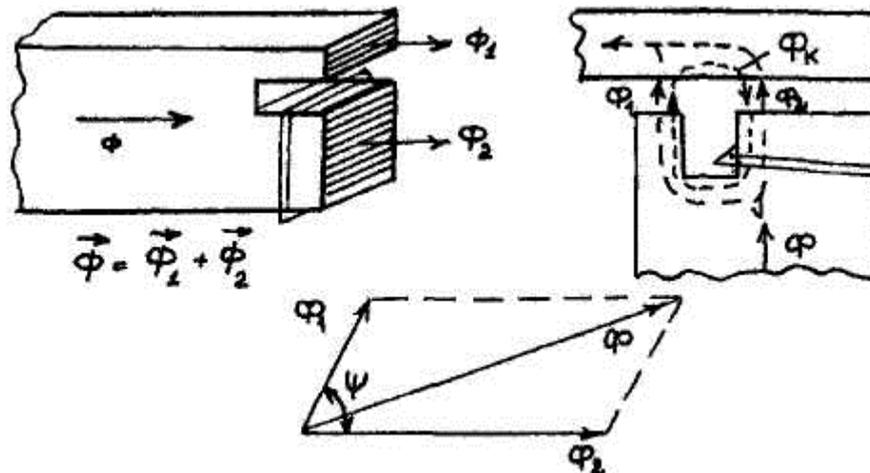


Рис. 1.11. Сердечник электромагнита переменного тока, уменьшающий вибрации якоря

Магнитный поток делится на две составляющие Φ_1 и Φ_2 . В соответствии с законом Ленца появляется магнитный поток Φ_k от короткозамкнутого витка. Причём в левой части зазора потоки Φ_1 и Φ_k складываются, а в правой части, охваченной короткозамкнутым витком, потоки Φ_2 и Φ_k вычитаются. Результирующие потоки оказываются сдвинутыми во времени на угол ψ (векторная диаграмма на рис. 1.11).

В результате значения магнитных потоков будут равны

$$\Phi_1 = \Phi_{1m} \cdot \sin \omega t \text{ и } \Phi_2 = \Phi_{2m} \cdot \sin(\omega t - \psi).$$

Зона, не охваченная короткозамкнутым витком, будет создавать силу

$$F_1 = \frac{F_{1m}}{2} - \frac{F_{1m}}{2} \cos 2\omega t,$$

а зона, охваченная короткозамкнутым витком, силу

$$F_2 = \frac{F_{2m}}{2} - \frac{F_{2m}}{2} \cos 2(\omega t - \psi).$$

В результате получается следующая зависимость тягового усилия от времени (рис. 1.12).

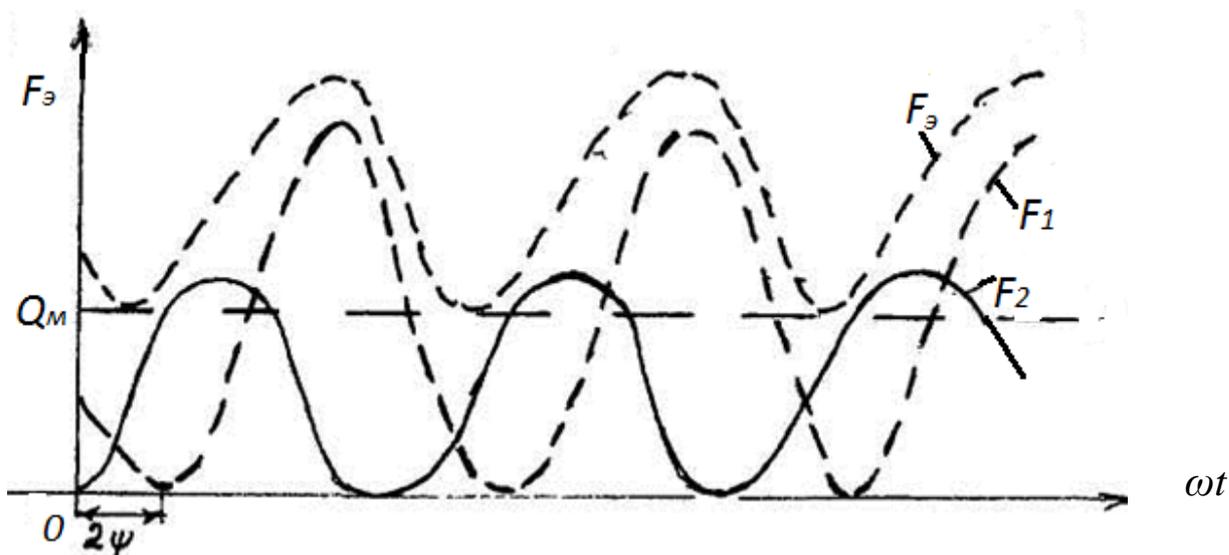


Рис. 1.12. Диаграммы электромагнитных сил в сердечнике с короткозамкнутым витком

Здесь характеристика F_1 сдвинута относительно F_2 на 2ψ . В результате их наложения результирующая магнитная электромагнитная сила будет равна

$$F_э = F_1 + F_2 = F_+ + F_-,$$

где F_+ , F_- – постоянная и переменная составляющие силы соответственно.

Из графика видно, что тяговое усилие $F_э$ больше механического сопротивления Q_m . Таким образом, вибрации якоря уже не будет.

Рассмотрим условия, при которых полностью отсутствует вибрация.

$$F_+ = \frac{F_{1m}}{2} + \frac{F_{2m}}{2},$$

$$F_- = -\frac{F_{1m}}{2} \cos 2\omega t - \frac{F_{2m}}{2} \cos 2(\omega t - \psi).$$

При $F_- = 0$ вибрация будет полностью отсутствовать. Откуда следует, что должны выполняться условия $F_{1m} = F_{2m}$ и $\psi = \frac{\pi}{2}$.

Вибрация якоря будет вполне допустимой при минимальной переменной составляющей, когда $\psi = (60 \div 65)^\circ$.

Параметры короткозамкнутого витка рассчитываются по следующим формулам:

$$\frac{S_2}{S_1 + S_2} = 0,7 \div 0,85; R_{кз} = \frac{\mu_0 \omega \cdot S_2}{\sqrt{2} \cdot \delta_k},$$

где S_1 – площадь сечения стержня, не охваченная короткозамкнутым витком; S_2 – площадь сечения стержня, охваченная этим витком, $R_{кз} = L\omega$ – индуктивное сопротивление короткозамкнутого витка, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Гн}}{\text{м}}$.

Вопросы для самоконтроля

1. Каким образом магнитный поток в сердечнике можно разделить на два потока и сдвинуть их по фазе?
2. Как определить угол сдвига потоков по фазе, при котором вибрации якоря не будет?
3. По каким формулам рассчитываются параметры короткозамкнутого витка сердечника?

1.11. Расчёт катушки напряжения электромагнита постоянного тока

К катушкам электромагнитов предъявляются следующие основные требования:

1. Надёжное включение электромагнита в наихудших условиях, т.е. при пониженном напряжении и повышенной температуре.
2. Температура катушки не должна превышать допустимую для данного класса изоляции при повышенном напряжении.
3. Минимальные габариты и экономичная технология изготовления.
4. Влагостойкость, в некоторых случаях кислотостойкость и маслостойкость.

Конструктивно катушки делятся на каркасные, бескаркасные, бескаркасные с намоткой на сердечник и бандажированные.

По способу включения они подразделяются на катушки тока (провода большого сечения, мало витков) и катушки напряжения (провода малого сечения, много витков).

При расчёте катушек исходными данными являются:

- 1) род тока (постоянный, переменный);
- 2) $U_{ном}$ – номинальное напряжение;
- 3) требуемое значение МДС;
- 4) допустимое отклонение напряжения;
- 5) режим работы (продолжительный, кратковременный);
- 6) габариты (диаметр, длина, высота намотки);
- 7) окружающая среда и её предельная температура (воздух 40° , масло 60°).

В результате расчётов определяются:

- 1) число витков w ;
- 2) сечение провода q_{np} ;
- 3) диаметр провода d_{np} ;
- 4) сопротивление катушки R_k ;
- 5) индуктивность катушки L_k ;
- 6) потребляемая мощность P_k ;
- 7) превышение температуры катушки над температурой окружающей среды τ .

Проведём расчёт катушки напряжения, габариты которой и конструкция представлены ниже.

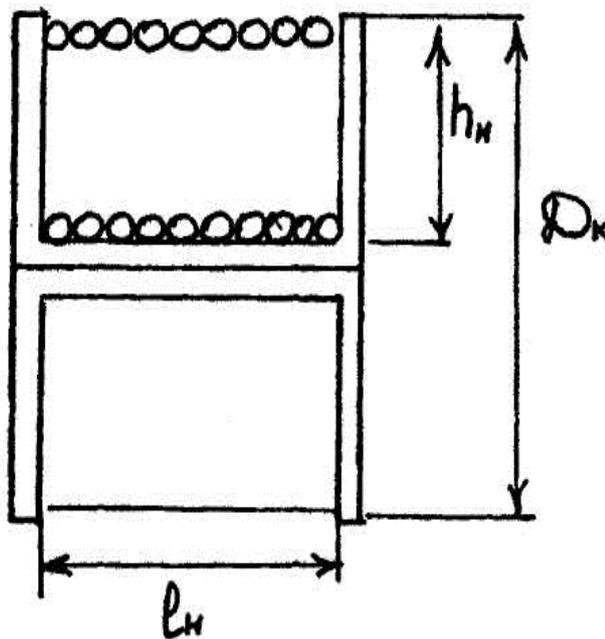


Рис. 1.13. Катушка напряжения в разрезе

Дано: геометрические размеры (рис. 1.13): D_k – диаметр катушки; l_n, h_n – длина и высота намотки; $U_{ном}$ – номинальное напряжение; Iw – требуемое значение; допустимое отклонение напряжения δU ; минимальное напряжение, при котором возможна её работа, $U_{min} = 0,7U_{ном}$.

Найти: w – число витков; q_{np}, d_{np} – сечение и диаметр провода; R_k – активное сопротивление катушки; индуктивность катушки; потребляемую мощность; перегрев катушки (превышение температуры катушки над температурой окружающей среды).

Решение:

Шаг 1. Вычислим: l_{cp} – среднюю длину витка. Средний радиус витка $r_{cp} = \frac{D/2 + D/2 - h_n}{2} = \frac{D - h_n}{2}$ (см. рис. 1.13). Тогда $l_{cp} = 2\pi r_{cp} = \pi(D - h_n)$.

Шаг 2. Найдём сечение провода из закона Ома $I = \frac{U_{\min}}{R_k}$, где $R_k = \rho \frac{l_{cp}}{q_{np}} w$ – активное сопротивление катушки. Тогда $q_{np} = \frac{I w \rho l_{cp}}{U_{\min}}$ – сечение провода.

Шаг 3. Вычислим диаметр провода по формуле $d_{np} = 2\sqrt{q_{np} / \pi}$.

Шаг 4. Зададим коэффициент укладки.

Существует три способа намотки катушек (рис.1.14).

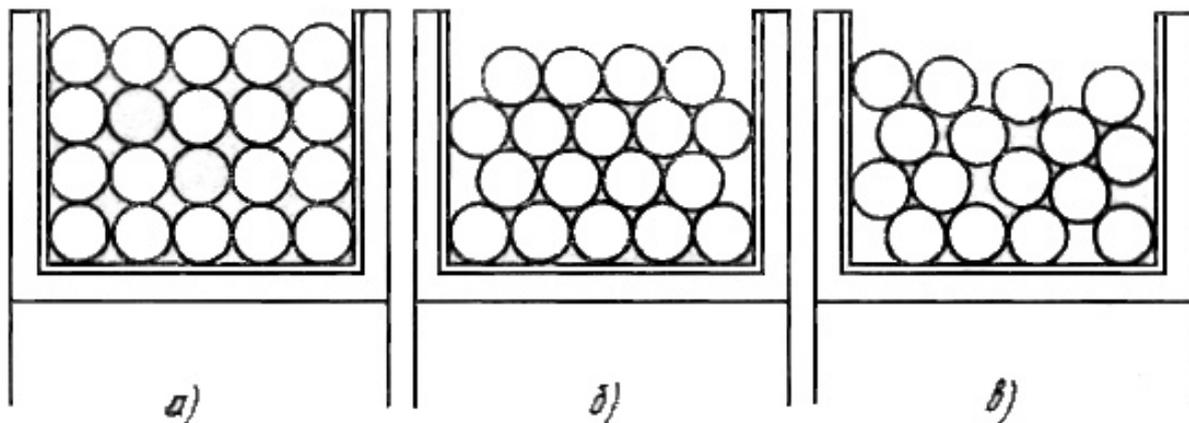


Рис. 1.14. Способы намотки катушек: а) – рядовая, коэффициент укладки $k_y = 0,75 \dots 0,85$; б) – шахматная, коэффициент укладки $k_y = 0,85 \dots 0,95$; в) – дикая, коэффициент укладки $k_y = 0,6 \dots 0,75$

По определению коэффициент укладки

$$k_y = k_{зм} \frac{\pi d_{np}^2}{4d_1^2}, \quad (1.18)$$

где $k_{зм}$ – коэффициент заполнения обмоточного пространства медью; d_1 – диаметр провода с учётом изоляции. Его определим после выбора провода с соответствующей изоляцией.

Шаг 5. Определим коэффициент заполнения обмоточного пространства медью из (1.18), то есть

$$k_{зм} = k_y \frac{4d_1^2}{\pi d_{np}^2}.$$

Шаг 6. Найдём число витков w . По определению коэффициент заполнения обмоточного пространства медью

$$k_{зм} = \frac{q_{np}}{h_n \cdot l_n} w. \quad (1.19)$$

Откуда

$$w = k_{зм} \frac{h_n \cdot l_n}{q_{np}}$$

Шаг 7. Найдём величину тока: $I = Iw/w$.

Шаг 8. Найдём магнитный поток $\Phi = BS = \mu_0 \mu \frac{Iw}{2r_{cp}} \pi r_{cp}^2 = \mu_0 \mu \frac{Iw}{2} \pi r_{cp}$,

где r_{cp} – средний радиус витка (см. шаг 1).

Шаг 9. Определим магнитную индукцию катушки: $L_k = \Phi/I$.

Шаг 10. Найдём потребляемую мощность: $P_k = I^2 R_k$.

Шаг 11. Превышение температуры катушки над температурой внешней среды определится по формуле Ньютона¹

$$\Delta\tau = \frac{P_k}{k_T S_{охл}} = \frac{P_k}{k_T \pi D_k l_n}$$

Шаг 12. Если данный перегрев удовлетворяет изоляции выбранного провода, то задача решена. В противном случае следует выбрать провод того же диаметра, но с изоляцией, выдерживающей такой перегрев.

Вопросы для самоконтроля

1. Какие основные требования предъявляются к катушкам электромагнитов?
2. Как подразделяются катушки по конструктивному признаку?
3. Как подразделяются катушки по способу включения?
4. Как вычислить коэффициент заполнения обмоточного пространства медью?
5. Как вычислить коэффициент укладки?

1.12. Расчёт катушки напряжения электромагнита переменного тока

Дано: $U_{ном}$ – номинальное напряжение; требуемое значение МДС Iw ; Φ_{max} – амплитудное значение магнитного потока, конструктивные размеры.

Найти: w – число витков; q, d – сечение и диаметр провода; R – активное сопротивление катушки; индуктивность катушки; потребляемую мощность; перегрев катушки (превышение температуры катушки над температурой окружающей среды). Если этот перегрев больше допустимого, то вычислить коэффициент включения α и $ПВ\%$ – относительную продолжительность включения для повторно-кратковременного режима.

Решение:

Шаг 1. Вычислим w . Полное напряжение $U^2 = U_R^2 + U_L^2$ с учётом (1.14):

¹ Сэр Исаак Ньютон (*Sir Isaac Newton*, 25 1643 – 1727) – английский физик, математик, механик, астроном, один из создателей классической физики.

$$U^2 = (I \cdot R)^2 + (4,44 f \cdot w \cdot \Phi_{\max})^2 \approx (4,44 f \cdot w \cdot \Phi_{\max})^2, \quad (1.20)$$

откуда $w = \frac{U}{4,44 f \cdot \Phi_{\max}}$ – неточное число витков, т.к. не учтено активное

сопротивление R . Поэтому $w_{расч} = (0,7...0,8)w$.

Шаг 2. Определим ток катушки $I = \frac{(Iw)_{\max}}{\sqrt{2} \cdot w_{расч}}$.

Шаг 3. Зададимся плотностью тока:

$j = (2...4)$ А/мм² – продолжительный режим;

$j = (5...12)$ А/мм² – повторно-кратковременный режим;

$j = (13...30)$ А/мм² – кратковременный режим.

Шаг 4. Вычислим площадь сечения провода $q = \frac{I}{j}$.

Шаг 5. Вычислим активное сопротивление катушки $R = \frac{\rho l_{cp} w_{расч}}{q}$, где $l_{cp} = 2\pi r_{cp} = \pi(D - h_n)$ (см. рис. 1.13).

Шаг 6. Далее осуществляется проверка уравнения (1.20). Если несовпадение более 10 %, то необходимо сделать перерасчёт, то есть перейти на шаг 1 и вычислить число витков по формуле $w = \frac{\sqrt{U^2 - I^2 R}}{4,44 f \cdot \Phi_{\max}}$.

Шаг 7. По диаметру $d = 2\sqrt{q/\pi}$ – и марке провода находим коэффициент заполнения обмоточного пространства $k_{зм}$ (рис. 1.15).

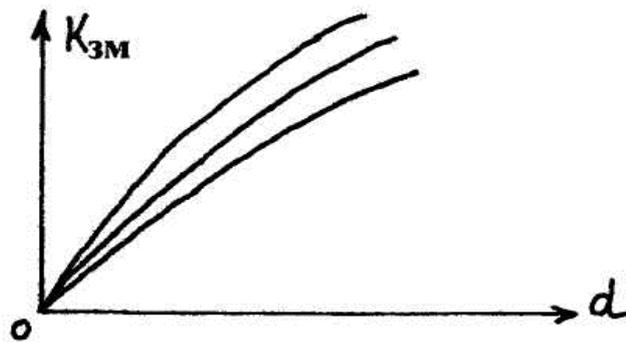


Рис. 1.15. Зависимость коэффициента заполнения обмоточного пространства от диаметра и марки провода

Шаг 8. Снова вычисляем число витков $w = k_{зм} \frac{h_n l_n}{q}$.

Шаг 9. Вычисляем сопротивление $R = \rho \frac{w l_{cp}}{q}$.

Шаг 10. Определяем ток в катушке $I_{\kappa} = \frac{U_{ном}}{R}$.

Шаг 11. Производим сравнение с заданной МДС ($wI_{\kappa} = Iw?$). Если отличие более 10%, то есть $\frac{|wI_{\kappa} - Iw|}{Iw} 100\% > 10\%$, производим перерасчёт, переходя на шаг 3, где выбираем другое значение плотности тока j .

Шаг 12. Определяем мощность, выделяемую в катушке: $P_{\kappa} = I_{\kappa}^2 R$.

Шаг 13. По формуле Ньютона установившееся превышение температуры катушки над температурой внешней среды $\theta_{уст} = \frac{P_{\kappa}}{k_T S_{бок}}$, где k_T – обобщающий коэффициент теплоотдачи с поверхности. Для катушек такого типа $k_T = (8...14) \frac{Вт}{м^2}$.

Шаг 14. Полученное значение перегрева сравнивается с допустимым для данного провода. Если $\theta_{уст} > \theta_{доп}$, то применяется провод с более высоким уровнем изоляции, если это не помогает, то такую катушку в продолжительном режиме использовать нельзя.

Шаг 15. Коэффициент включения $\alpha = \frac{k_T \cdot S_{бок} \cdot \theta_{доп}}{P_{\kappa}}$.

Шаг 16. Относительная продолжительность включения

$$ПВ\% = \frac{\tau_p \cdot 100\%}{\tau_p + \tau_{II}} = \alpha \cdot 100\% ,$$

где τ_p – рабочий период катушки, с; τ_{II} – время паузы в работе катушки при повторно-кратковременном режиме, с.

Шаг 17. Определяем, при какой ПВ% или α настоящая катушка работает без перегрева в повторно-кратковременном режиме.

Расчёт однослойной катушки в режиме on-line можно проводить по ссылке [11].

Вопросы для самоконтроля

1. Какие основные требования предъявляются к катушкам электромагнитов?
2. Как подразделяются катушки по конструктивному признаку?
3. Как подразделяются катушки по способу включения?
4. Как найти необходимое сечение провода для катушки с заданными размерами и заданной МДС и заданным номинальным напряжением источника питания?
5. Как вычислить коэффициент заполнения обмоточного пространства медью?

Глава 2. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ КОНТАКТЫ И ДУГОВОЙ РАЗРЯД

Электрический контакт – это место перехода тока из одной контакт-детали (токоведущей детали, осуществляющей контакт) в другую. Слово «контакт» происходит от латинского «contactus» – прикосновение.

2.1. Разновидности, конструктивное исполнение электрических контактов, их основные параметры

Контакты бывают *неразъёмные* (болтовое соединение двух шин), *скользящие* (реостат, ЛАТР, щётки) и *коммутирующие* (розетки, выключатели, переключатели).

По форме контакты различают на следующие группы:

- 1) *точечные* – контакт происходит в одной точке (рис. 2.1).

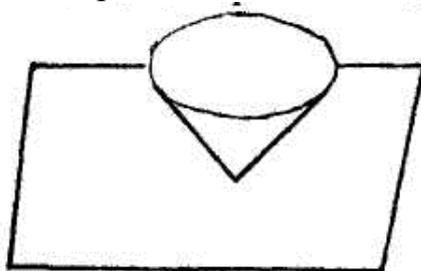


Рис.2.1. Точечный контакт

При точечном контакте допускаются небольшие усилия при нажатии, а для уменьшения сопротивления контактов применяют драгоценные металлы, не образующие окислы;

- 2) *линейные* – условное контактирование происходит по линии. В этом случае можно допускать большую степень нажатия (рис. 2.2).

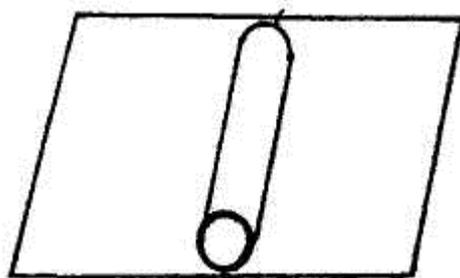


Рис.2.2. Линейный контакт

Эти контакты выполняются скользящими – цилиндр во время контактирования перемещается по плоскости и окислы стираются. Для таких контактов применяют медь;

- 3) *поверхностные* – контактирование между двумя поверхностями. Применяются при больших токах, создаётся высокая степень

нажатия, благодаря чему в некоторых местах поверхность очищается от окислов (рис. 2.3).

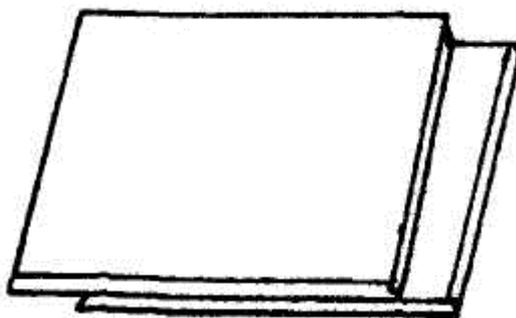


Рис. 2.3. Поверхностный контакт

На малые токи контакты выполняются в основном точечными.

Контакты, рассчитанные на средние и большие токи, делятся на следующие группы.

1. *Рычажные* – в них применяется проскальзывание подвижного контакта по неподвижному (для стирания окислов). В качестве материала контактов применяется медь.
2. *Мостиковые* – контакт осуществляется в точке сфера-сфера. Применяется для прямоходовых магнитных систем. В качестве материала применяется серебро и его сплавы.
3. *Врубные* – применяются в низковольтной аппаратуре (рубильники, предохранители). Материал – медь.
4. *Роликовые* – предназначены для токосъёма.
5. *Торцевые* – контактирование по плоскости. Контакт имеет большое переходное сопротивление и используется преимущественно как дугогаситель.
6. *Контакты с плоскими консольными пружинами* – слаботочная аппаратура, контакт в точке сфера-сфера. Материал – серебро и его сплавы.
7. *Двухступенчатый контакт* – содержит главные контакты и дугогасящие контакты (большие токи). При включении замыкаются сначала дугогасящие контакты, а потом главные, а при отключении наоборот.

Основные параметры контактных соединений следующие.

1. РАСТВОР – наименьшее расстояние между полностью разомкнутыми контактами. Его величина определяется условиями гашения дуги, видом и величиной электрического тока.

2. ПРОВАЛ – расстояние, которое проходит до полной остановки подвижный контакт после первого соприкосновения с неподвижным, если

неподвижный контакт убрать. Провал даёт возможность скомпенсировать износ контактов, но это требует и более мощную магнитную систему.

3. **КОНТАКТНОЕ НАЖАТИЕ** – это сила, сжимающая контакты деталей в месте их соприкосновения. Различают начальное контактное нажатие в момент первого соприкосновения контактов, т.е. когда провал равен нулю, и конечное при полном выбранном провале.

$F_0 = C \cdot \Delta l_1$ – сила начального контактного нажатия,

$F_K = F_0 + C \cdot \Delta l_2$ – сила конечного контактного нажатия,

где C – жёсткость контактной пружины; Δl_1 – первоначальное сжатие пружины; Δl_2 – дополнительное сжатие пружины при выборе провала.

Вопросы для самоконтроля и задания

1. Как контакты подразделяют по их функциональному назначению?
2. На какие группы делят контакты в зависимости от формы?
3. Перечислите виды контактов, рассчитанные на средние и большие токи.
4. Что относится к основным параметрам контактных соединений?

2.2. Переходное сопротивление контактов

Существование переходного сопротивления контактов (ПСК) связано:

- с наличием окисных плёнок на поверхности контактов;
- с тем, что при соприкосновении контактов контактирование происходит не по поверхности, а в некоторых отдельных точках (рис. 2.4).

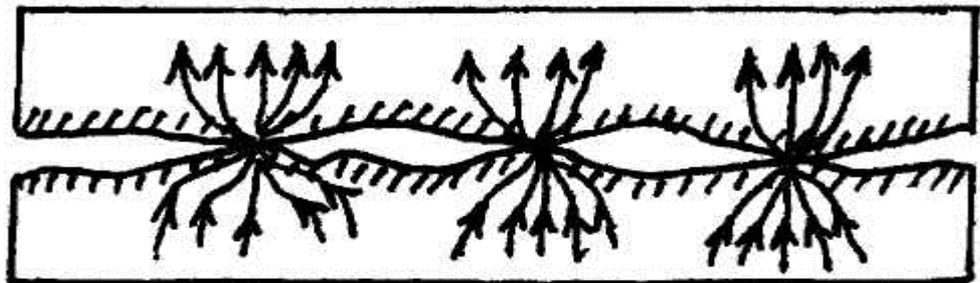


Рис. 2.4. Картина протекания тока в электрическом контакте

Суммарное сопротивление контактов определяется выражением

$$R_K = R_{nl} + R_{cm}, \quad (2.1)$$

где R_{nl} – сопротивление плёнок; R_{cm} – сопротивление стягивания.

Для слаботочных контактов наибольшее влияние оказывает первая составляющая – R_{nl} , а для сильноточных вторая – R_{cm} .

Переходное сопротивление зависит от величины контактного нажатия:

$$R_K = \frac{K_m}{0,102 P_K^m}, \quad (2.2)$$

где P_K – величина контактного нажатия; m – показатель степени, зависящий от формы контактов: $m = 0,5$ – для точечных, $m = 0,5 \dots 0,8$ – для линейных, $m = 1$ – для поверхностных; K_m – коэффициент, зависящий от материала контакта.

С ростом контактного нажатия P_K уменьшается контактное переходное сопротивление R_K (рис. 2.5), т.к. увеличиваются контактные площадки.

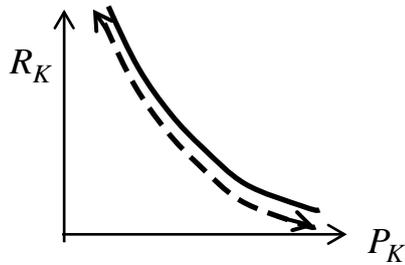


Рис. 2.5. Переходное сопротивление $R_K = f(P_K)$

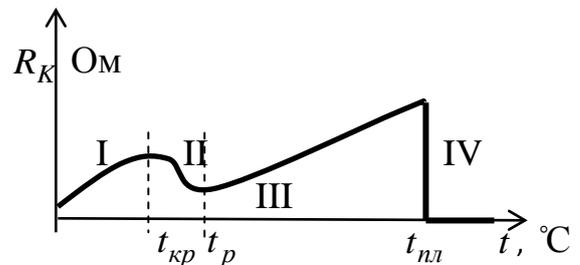


Рис. 2.6. Переходное сопротивление $R_K = f(t)$

При ослаблении контактного нажатия кривая пойдет в обратном направлении, сместившись ниже кривой возрастания P_K (рис. 2.5, пунктирная кривая). Это связано с деформацией материала контакта.

Переходное сопротивление зависит от температуры:

$$R_K = R_{K0} \left(1 + \frac{2}{3} \alpha t \right), \quad (2.3)$$

где R_K – ПСК при температуре t ; R_{K0} – ПСК при температуре $t = t_0$; α – температурный коэффициент ПСК. График зависимости R_K от t состоит из следующих участков (рис. 2.6):

I – нарастание ПСК при увеличении температуры $t_{кр}$, выше которой материал начинает размягчаться;

II – уменьшение ПСК при температуре размягчения контактов и их смятия;

III – при дальнейшем повышении температуры (от температуры рекристаллизации t_p до температуры плавления $t_{пл}$ материала контактов) ПСК будет возрастать;

IV – на этом участке при температуре плавления $t_{пл}$ контакты свариваются, и R_K практически падает до нуля (для меди $t_{пл} \approx 1100$ °C).

Переходное сопротивление зависит от состояния поверхности контактов. Шлифовка контактной поверхности увеличивает ПСК. Контакты высокоточных аппаратов должны зачищаться только крупнозернистыми напильниками, но не наждачной шкуркой. При шлифовке бугорки на поверхности становятся более пологими и их смятие затрудняется.

Переходное сопротивление зависит и от материала контактов. У меди ПСК в отключенном состоянии увеличивается в 1000 раз и в сотни раз при

включённом состоянии. Поэтому для медных контактов, находящихся длительное время во включённом состоянии, необходимо через каждые 8 часов отключать контакты и пару раз включать их под нагрузкой, чтобы с помощью дугового разряда сжечь окислы и тем самым уменьшить ПСК.

Окислы серебра имеют практически такое же сопротивление, как и серебро, поэтому с течением времени сопротивление серебряных контактов не изменяется.

Вопросы для самоконтроля и задания

1. Почему возникает переходное сопротивление контактов?
2. Объясните механизм зависимости переходного сопротивления контактов от температуры.
3. Как переходное сопротивление зависит от материала контактов?

2.3. Износ контактов при отключении

Во время размыкания контактов количество площадок контактирования уменьшается и, наконец, остаётся одна площадка, которая под действием тока разогревается, металл в этом месте расплавляется, и возникает жидкометаллический мостик, который впоследствии рвётся. Вследствие чего возникает либо электрическая искра, либо электрическая дуга (всё зависит от порога дугообразования U_d, I_d).

Электрическая искра появляется при **малых токах**, если $I < I_d$ и $U < U_d$. При этом возможны два процесса износа:

- 1) износ, связанный с образованием окисных плёнок, или **коррозия**;
- 2) износ, связанный с переносом материала контактов с одного на другой и во внешнюю среду под действием электрического поля. Он называется **эрозией** контакта.

Износ контактов при малых токах определяется по формуле

$$\sigma = \gamma_m \cdot q,$$

где $q = I \cdot \tau$ – количество электричества, Кл; γ_m – коэффициент, зависящий от свойств материала контакта, Кл⁻¹.

Износ контактов при малых токах появляется из-за наличия цепи с индуктивностью. При резком снижении тока возникает разность потенциалов, обусловленная ЭДС самоиндукции индуктивной цепи. Из-за этого возникает искровой разряд. Для уменьшения износа под действием искрового разряда используются искрогасительные цепи (рис. 2.7, 2.8).

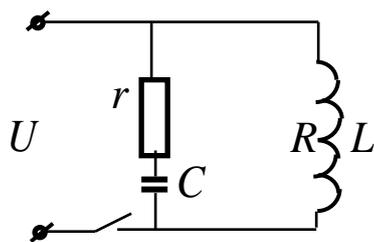


Рис. 2.7. Параллельное $r \leq \left(\frac{300}{U} - 1\right) \cdot R$

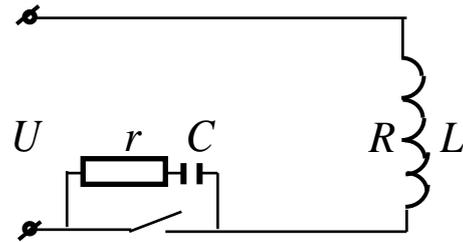


Рис. 2.8. Последовательное $r \leq \left(\frac{300}{U}\right) \cdot R$

В этом случае при размыкании часть энергии цепи уходит на зарядку конденсатора C . При этом длительность искрового разряда существенно сокращается.

Износ контактов при больших токах возникает, если $I > I_0$ и $U > U_0$.

При этом такой износ зависит от следующих факторов.

1. *От количества размыканий.* Суммарный износ Σ линейно зависит от числа n размыканий: $\Sigma = \sigma \cdot n$, где σ – износ при одном размыкании.

2. *От напряжённости H магнитного поля* (рис. 2.9).

При малых H дуга горит в основном на одних и тех же опорных площадках (точках) и износ достаточно велик. При увеличении дуга перемещается к поверхности контакта и износ уменьшается.

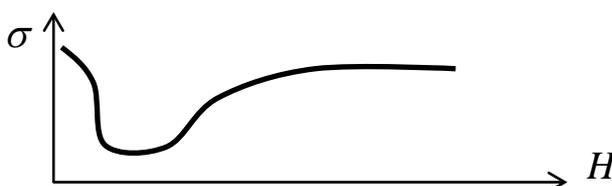


Рис. 2.9. Зависимость износа при одном замыкании от напряжённости магнитного поля

При ещё большем увеличении поля уже весь материал из расплавленного перешейка выбрасывается за пределы контактного промежутка и износ стабилизируется.

3. *От напряжения.* При наличии магнитного поля дуга покидает межконтактный промежуток уже при зазоре 1...2 мм, поэтому износ от U будет иметь очень слабую зависимость.

4. *От тока.* Линейная зависимость – чем больше ток, тем больше износ контактов.

5. *От скорости расхождения контактов.* При наличии поля износ от скорости практически не зависит. При отсутствии поля зависимость обратная – чем больше скорость расхождения, тем износ меньше.

Вопросы для самоконтроля и задания

1. Что такое коррозия контактов?
2. Что такое эрозия контактов?
3. Объясните механизм образования электрического разряда в виде искры или дуги при размыкании контактов.
4. Перечислите факторы, которые влияют на износ контактов при размыкании.

2.4. Износ контактов при включении

Данный износ связан с электрической дугой и возникает за счёт вибрации контактов.

Пусть контакты соприкоснулись в точке A (рис. 2.10), в цепи появился ток. Под действием силы натяжения контактной пружины контакты продолжают двигаться навстречу друг другу. В точке B движение

заканчивается, и под действием упругих сил начинается обратный ход контактов. В точке *C* контакты размыкаются. В точке *D* они снова замыкаются под действием контактной пружины и т.д. В промежутке *CD* появляется электрическая дуга, то есть условие появления электрической дуги

$$X_k - X_d > 0,$$

где X_k – максимальная величина отброса контакта; X_d – величина упругого восстановления деформации материала контактов (см. рис. 2.10).

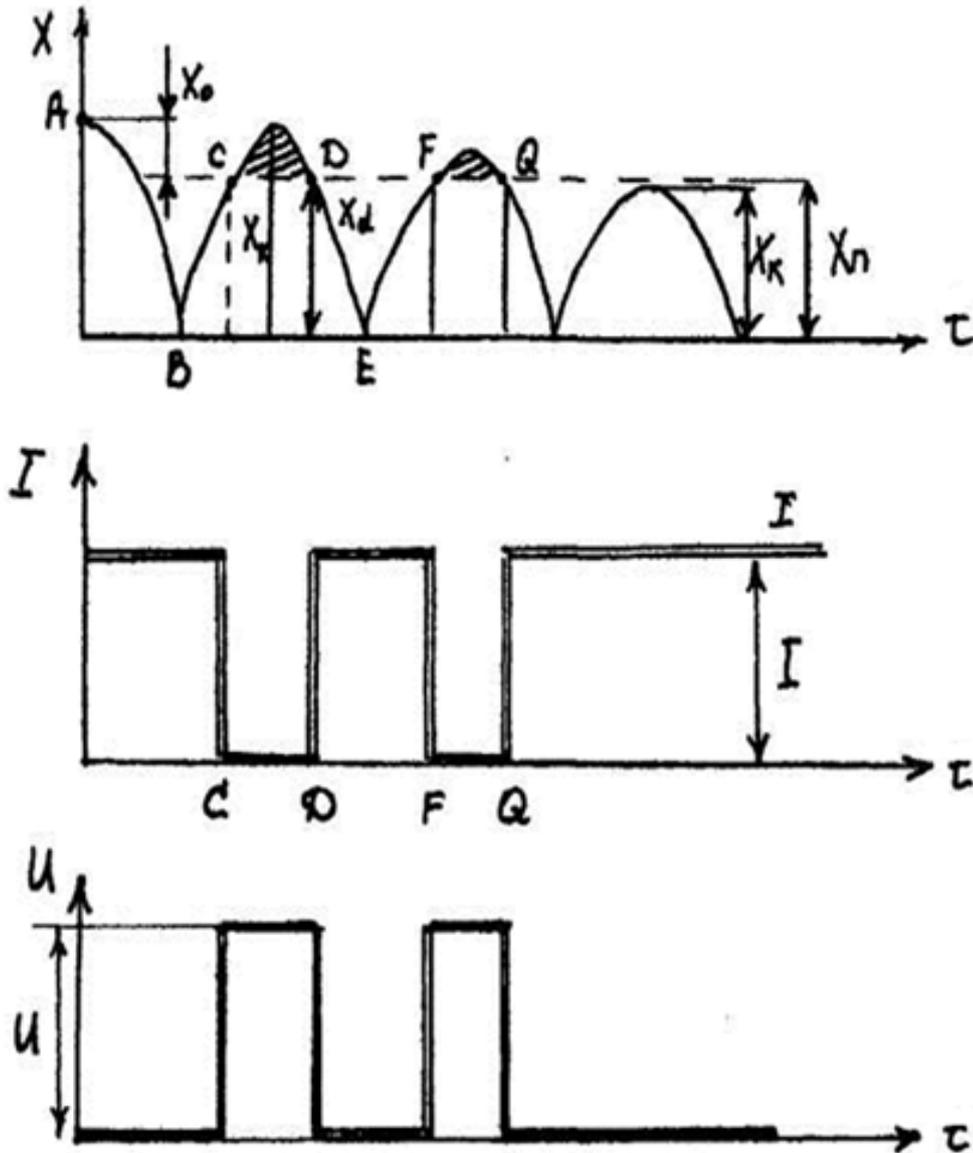


Рис. 2.10. Временные диаграммы хода контактов, тока и напряжения

Через два-три периода это условие не выполняется и дребезг (вибрация) контактов прекращается.

Износ контактов при включении зависит от:

- 1) предварительной деформации контактной пружины или начального контактного нажатия F_0 (рис. 2.11).

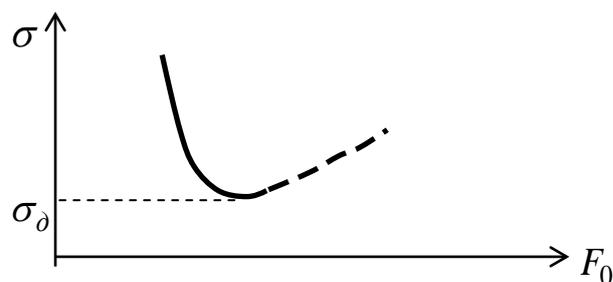


Рис. 2.11. Износ контактов $\sigma = f(F_0)$

С увеличением F_0 износ σ уменьшается до определённой величины σ_δ (сплошная линия на рис. 2.11). При дальнейшем нарастании возможен отброс контактов и появление дуги, которая станет причиной увеличения износа σ (пунктирная линия);

- 2) жёсткости контактной пружины. При увеличении жёсткости износ уменьшается;
- 3) соотношения тяговой и механической характеристик.

$F_m - F_m = F_{изб}$ – избыточное усилие (разность между тяговой и механической характеристиками). Чем больше $F_{изб}$, тем больше энергия отброса контактов и больше σ – кривая 4 (рис. 2.12).

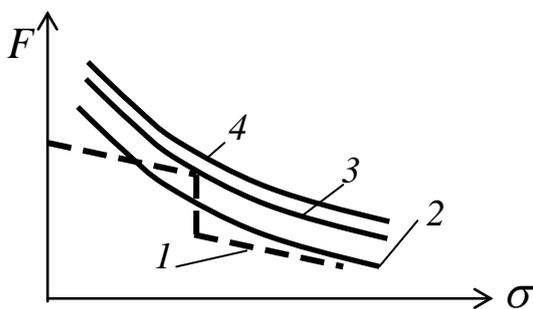


Рис. 2.12. Характеристики: 1 – механическая; 2,3,4 – тяговые

При недостаточном тяговом усилии (кривая 2) будет происходить остановка подвижной системы в момент соприкосновения контактов на участке, где $F_m - F_m < 0$ (см. рис. 2.12), что также приведёт к увеличению износа.

Для обеспечения минимального износа тяговая характеристика должна обеспечивать чёткое включение аппарата и иметь при этом минимально необходимую избыточную тягу $F_{изб}$ – кривая 3 (рис. 2.12).

Вопросы для самоконтроля

1. Как возникает явление вибрации контактов?
2. От чего зависит износ контактов при их замыкании?
3. Каким должно быть оптимальное тяговое усилие в контактах?

2.5. Материалы контактов

К материалам контактов предъявляются следующие основные требования:

- высокая электропроводность и теплопроводность;
- высокая коррозионная стойкость;
- стойкость к образованию окисных плёнок с высоким удельным сопротивлением;
- высокая твёрдость для исключения механического износа при частых коммутациях;
- малая твёрдость для уменьшения силы контактного нажатия;
- высокая дугостойкость $\tau_{пл}$;
- простота обработки и низкая стоимость.

Этим требованиям более-менее удовлетворяют следующие материалы.

Медь

Достоинства:

- 1) высокая электропроводность и теплопроводность;
- 2) высокие значения порогов дугообразования;
- 3) относительно небольшая стоимость.

Недостатки: наличие окисных плёнок с высоким удельным сопротивлением.

Область применения: шины, контакты аппаратов.

Серебро

Достоинства:

- 1) высокая проводимость;
- 2) малое удельное сопротивление;
- 3) стойкость к образованию окисных плёнок с высоким удельным сопротивлением.

Недостатки: высокая стоимость.

Область применения: контакты, накладки главных контактов двухступенчатых контактных систем.

Алюминий

Достоинства:

- 1) лёгкий в обработке;
- 2) низкая стоимость.

Недостатки: неудаляемость окисных плёнок с высоким удельным сопротивлением.

Область применения: шины, провода.

Платина, золото

Достоинства: те же, что и у серебра.

Недостатки: высокая стоимость и малая дугостойкость.

Вольфрам

Достоинства:

- 1) высокая дугостойкость и твёрдость;
- 2) стойкость против эрозии и сваривания.

Недостатки:

- 1) высокое удельное сопротивление;
- 2) образование сульфидных и окисных плёнок.

Область применения – в качестве дугогасящих контактов.

Металлокерамика

В науке и технике понятие «металлокерамика» обычно связывают с порошковой металлургией. Металлокерамику (керамико-металлические материалы) получают прессованием заготовок из порошков (металлов и керамики) с последующим их спеканием.

Для электрических контактов используются порошки вольфрама, серебра, меди, никеля. Полученный материал обладает всеми положительными качествами перечисленных компонентов.

Вопросы для самоконтроля и задания

1. Перечислите основные требования, которые предъявляют к материалам контактов.
2. Какие из материалов этим требованиям более-менее удовлетворяют?
3. Что такое металлокерамика? Каковы достоинства этого материала?

2.6. Процессы образования и гашения электрической дуги.

Вольт-амперные характеристики дуги постоянного тока

При размыкании и замыкании контактов могут возникать разного рода электрические разряды.

В обычных условиях молекулы воздуха электрически нейтральны, поэтому воздух, не имея носителей электрических зарядов, электрический ток не проводит. Однако высокая разность потенциалов между разомкнутыми контактами может вызвать явление *ионизации* – распад электрически нейтральных молекул газа на ионы и электроны, и такой газ уже станет электропроводным.

Дуга – это явление прохождения электрического тока через ионизированный газ. Известны четыре основных пути появления в дуговом промежутке электрических зарядов (ионов и электронов): ударная и термическая ионизация, термоэлектронная и автоэлектронная эмиссии.

Термоэлектронная эмиссия – это явление испускания электронов раскалённой поверхностью *катода*. Разомкнутые контакты представляют собой электроды с определённой разностью потенциалов. Отрицательно заряженный электрод называется катодом. После разрыва жидкометаллического мостика на катоде образуется пятно, которое и является основанием дуги. Под действием температуры этого пятна электроны получают кинетическую энергию, необходимую для преодоления

потенциального барьера и покидают поверхность катода, попадая в межконтактное пространство.

При наличии сильного электрического поля электроны могут покидать поверхность катода даже без предварительного их возбуждения. Это явление называется *автоэлектронной эмиссией*. Возникновение дугового разряда связано с явлениями термоэлектронной и автоэлектронной эмиссии. Но эти явления лишь начало развития дугового разряда. Для поддержания электрической дуги этих эмиссий электронов недостаточно.

Процессы, которые поддерживают дугу, это *термическая и ударная ионизации*. Под воздействием высокой температуры электронейтральные молекулы газа распадаются на ионы и электроны. Это явление называется *термической ионизацией*. Температура створа электрической дуги достигает 7000 К.

При этом число и скорость движения заряженных частиц (а также хаотически движущихся молекул) могут возрасти настолько, что при соударении электрона с нейтральной молекулой из последней может быть выбит электрон. В результате появляется ещё один электрон и положительно заряженный ион. Такая ионизация газа называется *ударной ионизацией*.

Гашение дуги связано с процессами *деионизации* газа. К ним относятся:

1. *Рекомбинация* – процесс образования нейтральных атомов при соударении и слиянии разноимённо заряженных частиц.
2. *Диффузия* – процесс выноса заряженных частиц за пределы дугового пространства, что ведёт к уменьшению проводимости дуги. Этот вынос заряженных частиц можно обеспечить с помощью магнитного поля.

Основной характеристикой электрической дуги является вольт-амперная характеристика (ВАХ), т.е. зависимость падения напряжения на дуге от величины тока. При свободном горении ВАХ дуги имеет падающий характер – с увеличением тока в дуге напряжение на ней уменьшается.

Падение напряжения на дуге зависит не только от величины тока, но также и от скорости его изменения. При медленном изменении тока процессы ионизации и деионизации успевают за этим изменением, и ВАХ при таком условии будет называться статической (см. рис. 2.13, кривая 1).

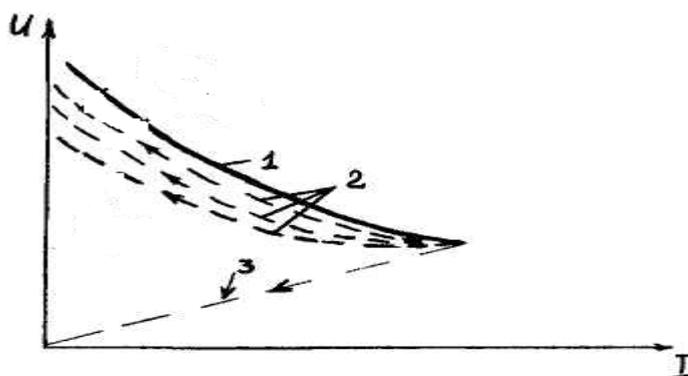


Рис. 2.13. ВАХ: 1 – статическая; 2 – динамические; 3 – идеальная динамическая

При быстром изменении тока дуговой промежуток не успевает прийти в соответствие с величиной тока в цепи, и ВАХ будет отличаться от статической. Такая ВАХ называется динамической (см. рис. 2.13, кривые 2).

Идеальная динамическая характеристика при мгновенном изменении тока представлена прямой 3 (см. рис. 2.13).

Вопросы для самоконтроля и задания

1. Что такое электрическая дуга?
2. Что представляет собой явление термоэлектронной эмиссии?
3. Объясните явления термической и ударной ионизации газа.
4. Что определяет вольт-амперная характеристика контакта?

2.7. Распределение напряжения по длине дуги постоянного тока

Катодное падение напряжения сосредоточено на очень небольшом участке дуги (рис. 2.14). Этот участок непосредственно примыкает к катоду (при нормальном атмосферном давлении около 0,001 мм).

Средняя напряженность электрического поля у катода достигает величины порядка $E_K \approx 10^5$ В/см, а катодное напряжение $U_K \approx 10 \dots 20$ В.

Анодное падение напряжения имеет место в области, непосредственно примыкающей к аноду (см. рис. 2.14). Оно не является необходимым условием существования дугового разряда, т.к. задача анода относительно пассивна – принимать идущий к нему электронный поток. Величина анодного падения напряжения зависит от температуры анода и рода металла. Средняя напряженность электрического поля у анода достигает $E_A \approx 10^4$ В/см, а анодное напряжение $U_A \approx 5 \dots 10$ В.

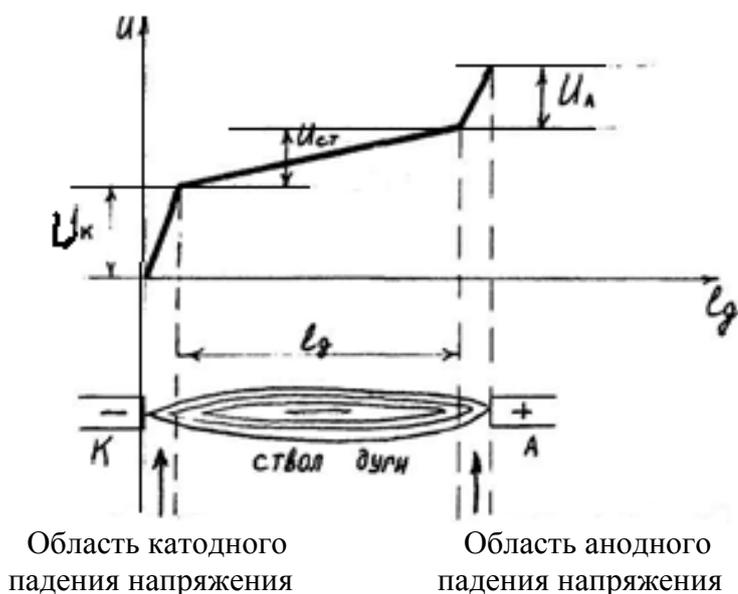


Рис. 2.14. Распределение падения напряжения в дуговом промежутке

Падение напряжения в дуговом створе $U_{ст}$ представляет собой произведение напряжённости электрического поля $E_{ст} = E_д$ на длину створа дуги $l_д$, см: $U_{ст} \approx E_д \cdot l_д$, причём $E_д \approx 10 \dots 200$ В/см.

Величина напряженности электрического поля в дуговом створе существенно зависит от условий, в которых горит дуга, и свойств дугогасящей среды. Меньшее значение относится к открытым дугам в воздухе при относительно больших токах, а большее – к дугам, находящимся в потоке газов или паров жидкости, когда отток теплоты от дугового створа делается особенно интенсивным.

Вопросы для самоконтроля и задание

1. Назовите три области падения напряжения в контакте, при которых это падение имеет разный характер.
2. Влияет ли величина анодного падения напряжения на условие образования электрической дуги?
3. От чего зависит напряженность электрического поля в дуговом створе?
4. Какой будет длина участка падения катодного напряжения при напряженности электрического поля $E_K = 10^5$ В/см и падении напряжения $U_K = 10$?

2.8. Условия горения и гашения дуги постоянного тока

Чтобы погасить дугу постоянного тока, необходимо создать такие условия, при которых в дуговом промежутке при всех возможных значениях тока процессы деионизации превосходили бы процессы ионизации. Для определения этих условий построим электрическую схему замещения, соответствующую работе контактной системы (рис. 2.15).

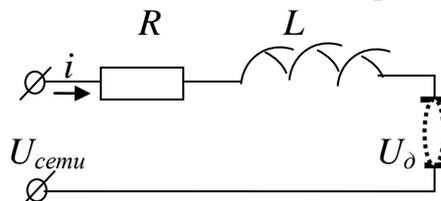


Рис. 2.15. Цепь замещения электрического контакта

Для такой схемы, содержащей активное сопротивление R , индуктивность L и дуговой промежуток с падением напряжения U_d , к которой приложено напряжение источника питания U , будет справедливо, согласно второму правилу Кирхгофа, уравнение

$$U_{cemu} = U_d + iR + L \frac{di}{dt}, \quad (2.4)$$

где $L \frac{di}{dt}$ – падение напряжения на индуктивности при изменении тока.

При устойчиво горящей дуге ток установится и будет иметь некоторое постоянное значение, поэтому

$$\frac{di}{dt} = 0 \text{ и } U_{cemu} = U_d + iR.$$

Для погашения дуги необходимо, чтобы ток в ней всё время уменьшался. Это обстоятельство приводит к необходимости выполнения следующих условий:

$$\frac{di}{dt} < 0, \text{ а } U_{\delta} > U_{\text{сети}} - iR. \quad (2.5)$$

Рассмотрим зависимости падений напряжений от тока на всех участках нашей цепи (рис.2.16).

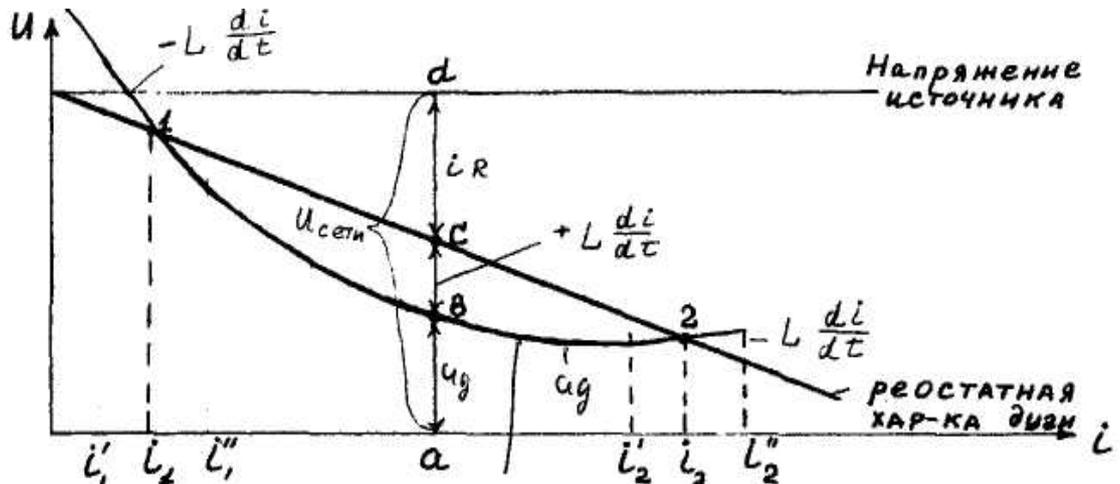


Рис. 2.16. Вольт-амперная характеристика дуги постоянного тока

Здесь длина отрезка ad пропорциональна напряжению сети $U = U_{\text{сети}}$, ab — пропорциональна падению напряжения на дуге ($U = U_{\delta}$), cd — пропорциональна падению напряжения на активном сопротивлении ($U = iR$), пропорциональна падению напряжения на индуктивности ($U = L \frac{di}{dt}$).

В точках 1 и 2 выполняются условия

$$L \frac{di}{dt} = 0 \text{ и } U = U_{\delta} + iR.$$

В этих точках имеет место равновесное состояние. Однако в точке 1 это равновесие неустойчивое, а в точке 2 — устойчивое. ВАХ, соответствующая прямой $U = U_{\delta} + iR$, называется *реостатной характеристикой дуги*.

Точка 1. При небольшом увеличении тока от i_1 до i_1'' будет иметь место уже неравенство $U_{\delta} < U - iR$. Между точками 1 и 2 величина $L \frac{di}{dt}$ (см. рис. 2.16) будет положительной. Поэтому будет происходить рост тока от значения i_1 до значения i_2 в цепи, который будет сопровождаться накоплением электромагнитной энергии.

При небольшом уменьшении тока от i_1 до i_1' будет иметь место уже неравенство $U_\partial > U - iR$. Между точками 1 и 2 величина $L \frac{di}{dt} < 0$. То есть будут выполнены условия гашения дуги (2.5). Поэтому ток будет убывать и дуга погаснет. Таким образом, в точке 1 при небольшом увеличении тока относительно точки равновесия он и дальше увеличивается, а при уменьшении – уменьшается, то есть это равновесное состояние не будет устойчивым.

Точка 2. При небольшом увеличении тока от i_2 до i_2'' будет вновь иметь место неравенство $U_\partial > U - iR$, а $L \frac{di}{dt} < 0$ (см. рис. 2.16). Поэтому значение тока будет уменьшаться до значения i_2 , а дуга в этой точке будет гореть устойчиво.

При небольшом уменьшении тока от i_2 до i_2' будет иметь место уже неравенство $U_\partial < U - iR$. При этом (см. рис. 2.16) $L \frac{di}{dt} > 0$. Поэтому ток будет возрастать до i_2 , а дуга в этой точке будет гореть устойчиво.

Если при любом значении тока будет иметь место условие

$$U_\partial > U - iR, \quad (2.6)$$

то дуги не будет.

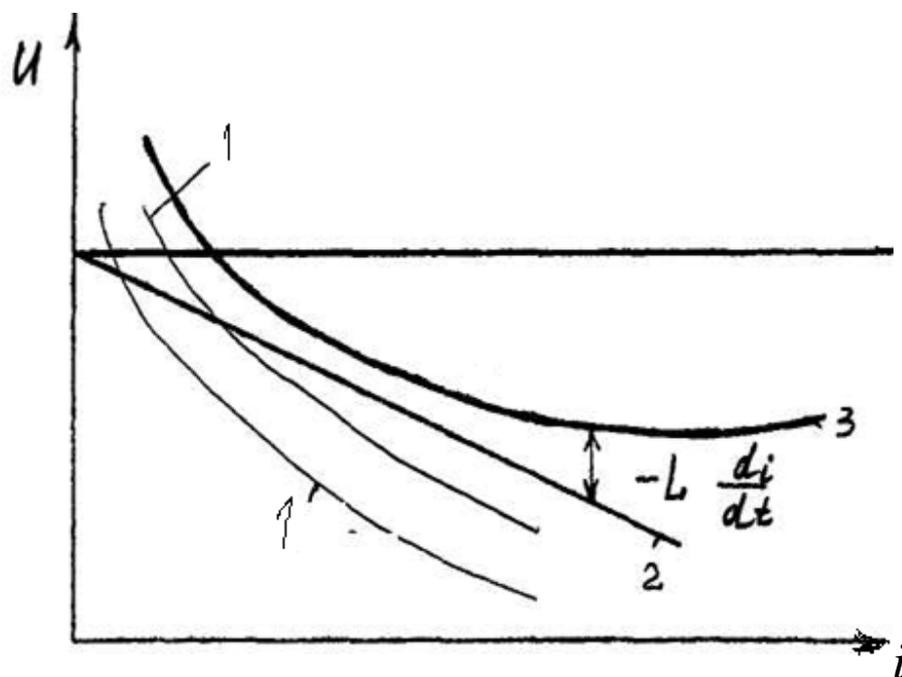


Рис. 2.17. ВАХ: 1 – динамические ВАХ, для которых условия гашения дуги не выполнены; 2 – реостатная характеристика дуги; 3 – ВАХ, для которой условие гашения дуги выполнено на всём её протяжении

При этом динамическая вольтамперная характеристика дуги $U_d = U(i)$ (кривая 3, рис. 2.17) должна на всём своём протяжении лежать выше прямой $U = U_{сети} - iR$ (прямая 2, рис. 2.17) и не иметь с этой характеристикой ни одной точки соприкосновения.

Кривые 1 (см. рис. 2.17) соответствуют динамическим ВАХ, для которых условие (2.6) гашения дуги не выполняется.

Вопросы для самоконтроля и задания

1. Напишите условия гашения дуги.
2. Напишите уравнение реостатной характеристики дуги.
3. Почему в точке 1 (см. рис. 2.16) равновесное состояние не устойчиво, а в точке 2 устойчиво?

2.9. Горение и гашение дуги переменного тока

Дуга переменного тока обычно гасится легче, чем дуга постоянного тока. Чтобы погасить дугу постоянного тока, надо свести к нулю ток цепи путём непрерывного увеличения сопротивления дугового столба. При переменном токе этого делать не требуется. Здесь через каждый полупериод ток естественным образом проходит через нулевое значение, и надо лишь воспользоваться этим обстоятельством и создать вблизи перехода через нуль такие условия в межконтактном промежутке, чтобы протекание тока цепи вслед за этим переходом не возобновлялось. Рассмотрим три случая гашения дуги переменного тока.

1. Открытая дуга переменного тока при высоком напряжении источника. Такая дуга в моменты перехода тока через нуль сохраняет высокую проводимость. Поэтому в установках высокого напряжения гашение открытой дуги происходит не вследствие перехода через нуль и образования прочности промежутка, а главным образом вследствие растяжения дугового столба и образования на нём высокого напряжения горения (на всём протяжении полупериода). При таком режиме ток в цепи начинает заметно падать по причине возрастания сопротивления канала дуги. При определённой длине дуги напряжение сети оказывается недостаточным для поддержания горения дуги (критическая длина дуги), наступает нарушение баланса мощностей (подводимой и отдаваемой) и ток в цепи довольно быстро уменьшается, пока совсем не прекратится.

Таким образом, если в основу анализа процесса гашения открытой дуги переменного тока положить условие нарушения баланса напряжений при горении дуги (но не нулевые переходы тока), то задача по существу сведётся к задаче гашения дуги постоянного тока.

2. Дуга переменного тока в условиях активной деионизации. Если столб дуги подвергается активной деионизации, то механизм гашения дуги существенно меняется по сравнению с вышерассмотренным случаем открытой дуги в цепи высокого напряжения. За счёт активного воздействия газовой или жидкой среды диаметр дугового канала будет меняться почти синхронно с током.

При подходе переменного тока к нулевому значению дуговой столб приобретает весьма малые размеры и, благодаря этому, быстро распадается, теряет свою проводимость и приобретает заметную *электрическую прочность* (минимальная напряжённость электрического поля, при которой наступает пробой, называется электрической прочностью диэлектрика). Поэтому в следующий полупериод может возникнуть пробой межконтактного промежутка. Такая ситуация характерна для отключающих аппаратов высокого напряжения.

Таким образом, здесь при каждом переходе тока через нуль возникает соревнование процесса восстановления электрической прочности промежутка с процессом восстановления напряжения на промежутке. А для угасания дуги в такой ситуации необходимо обеспечить такой режим, при котором электрическая прочность промежутка после достижения током его нулевого значения нарастала бы быстрее напряжения на промежутке.

Условие гашения такой дуги: $E_{в.н} > \frac{U_в}{\Delta l}$, то есть при своём восстановлении электрическая прочность $E_{в.н}$ должна опережать восстановление напряжения $U_в$ на дуговом промежутке длиной Δl .

3. Дуга переменного тока в условиях отключения цепей низкого напряжения. Для напряжения ниже 1 кВ электрическое сопротивление столба дуги обычно бывает соизмеримым с сопротивлением отключения цепи, а напряжение на дуге – с напряжением источника питания. В данном случае уже нельзя пренебрегать влиянием напряжения (и сопротивления) дуги и в то же время нельзя не учитывать влияния восстановления электрической прочности при переходе тока через нуль.

Вопросы для самоконтроля и задания

1. Что такое электрическая прочность диэлектрика?
2. Вследствие чего осуществляется гашение открытой дуги в установках высокого напряжения?
3. Напишите условие гашения дуги при активной деионизации.

2.10. Способы гашения электрических дуг

Для дуг постоянного и переменного тока существуют следующие способы гашения дуги.

1. Механическое растягивание (применяется только для постоянного тока). Это простейший способ гашения, но малоэффективен. Применим только в слаботочной аппаратуре.

2. Деление дуги на ряд коротких дуг (применяется как для постоянного, так и для переменного тока). Для гашения дуги здесь применяется дугогасительная решётка (рис.2.18). Способ предложен в начале XX века русским учёным М.О. Доливо-Добровольским и до сих пор широко применяется. При расхождении контактов возникающая между ними дуга под воздействием магнитного поля движется на пластины решётки и разбивается на ряд коротких дуг.

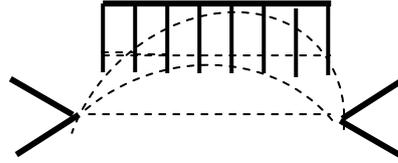


Рис. 2.18. Схема гашения дуги дугогасительной решёткой

На переменном токе деионная решётка будет работать эффективнее, чем на постоянном токе. Тогда, если создаваемые аппараты рассчитаны на использование как постоянного, так и переменного тока, число пластин можно рассчитать из условия гашения дуги постоянного тока.

3. Гашение дуги высоким давлением (применяется как на постоянном, так и на переменном токе). С ростом давления возрастает плотность газа. При этом увеличивается теплопроводность и отвод тепла от дуги. На этом принципе основано гашение дуги в предохранителях и других аппаратах низкого напряжения. В некоторых аппаратах стенки дугогасящей камеры делаются из газогенераторных материалов (фибры). Благодаря высокой температуре дуги такие стенки выделяют газ и давление в объёме поднимается до 10 – 15 МПа.

4. Гашение дуги в потоке сжатого воздуха. В электрических аппаратах высокого напряжения коммутируются токи в десятки килоампер при напряжении 10^6 В. Сжатый воздух обладает высокой плотностью и теплопроводностью. Омывая дугу с большой скоростью, он охлаждает её. А при прохождении тока через нуль он обеспечивает деионизацию дугового столба. При высоком давлении воздух имеет высокую электрическую прочность, что создаёт высокую электрическую прочность промежутка.

5. Гашение дуги в трансформаторном масле. Этот способ гашения нашёл применение в выключателях переменного тока на высокое напряжение. Контакты выключателя погружаются в масло. Возникающая при выключении дуга имеет температуру 5000...6000 °С и приводит к интенсивному испарению окружающего масла. Вокруг дуги образуется газовый пузырь, почти на 80% состоящий из водорода. Водород обладает наивысшими среди газов дугогасящими свойствами. Проникая непосредственно в зону ствола дуги, он вызывает перемешивание холодного и горячего газа, способствуя деионизации дугового промежутка. Быстрое разложение масла приводит к повышению давления внутри пузыря, что также способствует гашению дуги.

6. Гашение дуги в вакуумной среде (применяется как на постоянном, так и на переменном токе). В вакуумном дугогасительном устройстве контакты расходятся при давлении среды 10^{-4} Па. Длина свободного пробега молекул достигает 50 м, а электронов – 300 м. За счёт большой разности плотностей в дуге и окружающем вакууме возникает очень высокая скорость диффузии. Практически через 10 мкс после нуля тока между контактами

восстанавливается электрическая прочность вакуума. Быстрая диффузия частиц, высокие электрическая прочность вакуума и скорость её восстановления обеспечивают гашение дуги при первом прохождении тока через нуль. Вакуумные дугогасительные устройства являются в настоящее время наиболее эффективными и долговечными. Их срок службы достигает 25 лет.

7. Гашение дуги под воздействием магнитного поля (применяется как на постоянном, так и на переменном токе). Электрическая дуга является своеобразным проводником с током, который может взаимодействовать с магнитным полем. Дугогасительные устройства с магнитным дутьём могут использовать либо последовательное, либо параллельное подключение катушки, создающей магнитный поток Φ (рис. 2.19, 2.20).

Дугогасительное устройство (ДУ) с последовательным подключением катушки (см. рис. 2.19) имеет следующие достоинства и недостатки.

Достоинства:

- 1) При токах выше 100 А магнитное поле быстро сдвигает дугу с рабочих поверхностей контактов, чем обеспечивается их малый износ. Система хорошо работает в области больших токов;
- 2) при изменении направления тока меняет направление и магнитное поле. Сила, действующая на дугу, не изменяет своего направления. Система работает одинаково при любом направлении тока (неполярность);
- 3) поскольку через катушку проходит номинальный ток, она выполняется из провода большого сечения, её активное сопротивление мало, а падение напряжения на такой катушке составляет доли вольта.

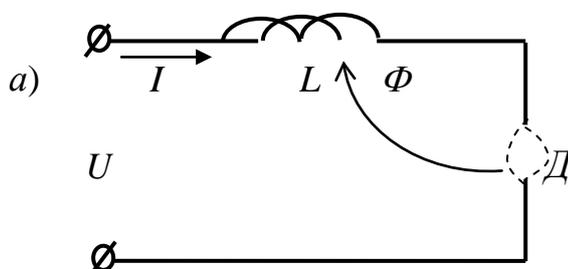


Рис. 2.19. ДУ с последовательной катушкой

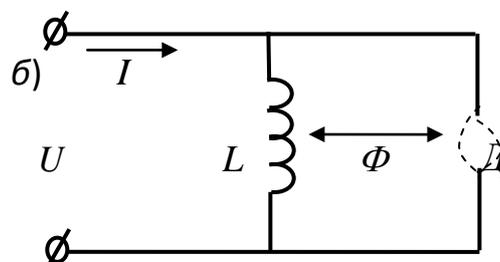


Рис. 2.20. ДУ с параллельной катушкой

Недостатки:

- 1) сила, действующая на дугу, пропорциональна квадрату тока. Следовательно, при малых токах сила мала и время гашения дуги велико;
- 2) большое сечение катушки требует большой расход меди – до трети от массы контактов приходится на катушку.

Дугогасительное устройство с параллельным подключением катушки (рис. 2.20) имеет следующие достоинства и недостатки.

Достоинства: при токах выше 100 А магнитное поле быстро сдвигает дугу с рабочих поверхностей контактов, чем обеспечивается их малый износ. Система хорошо работает в области больших токов.

Недостатки:

- 1) направление электродинамической силы, действующей на дугу, зависит от полярности тока. При изменении направления тока меняется направление дуги (контактор становится неработоспособным);
- 2) при коротком замыкании возможно снижение напряжения на источнике, питающем катушку индуктивности. В результате процесс горения идёт неэффективно;
- 3) в случае обрыва катушки дугогашение будет отсутствовать.

Воздействовать на дугу можно и постоянным магнитом. При этом отсутствуют затраты энергии на создание магнитного поля, сокращается расход меди.

Вопросы для самоконтроля и задания

1. Перечислите все способы гашения электрических дуг.
2. Для каких электрических дуг применим способ механического растягивания дуги?
3. Что обеспечивает применение дугогасительной решётки?
4. Зачем в закрытых дугах создаётся высокое давление газа?
5. Какие процессы протекают при обдувании дуги потоком сжатого воздуха?
6. В каких контактных системах целесообразно применять гашение дуги в трансформаторном масле?
7. За счёт каких явлений происходит гашение дуги в вакуумной среде?
8. Как влияет магнитное поле на электрическую дугу?
9. Перечислите достоинства и недостатки дугогасительного устройства с последовательным подключением катушки.
10. Перечислите достоинства и недостатки дугогасительного устройства с последовательным подключением катушки.
11. Какие преимущества даёт использование вместо катушки индуктивности постоянного магнита?

2.11. Коммутационные аппараты. Коммутация тока при низких постоянных напряжениях источника

Коммутационный аппарат – это электрический аппарат, который предназначен для коммутации электрической цепи и снятия напряжения с части электрической установки. Он представляет собой сложную схему соединений с ключами для отключения или включения тока в одной или нескольких электрических цепях.

При включении тока в цепях низкого напряжения (до 1 кВ) даже в случае источника постоянного напряжения сила тока не сразу достигнет постоянного (установившегося) значения. При наличии высокой

индуктивности включаемой и выключаемой нагрузки время достижения установившегося значения тока при включении и время падение этого тока до нуля после момента отключения будет тем больше, чем больше эта индуктивность.

Рассмотрим подробнее процесс подключения к постоянному напряжению U_0 активно-индуктивной нагрузки. Такая цепь будет иметь следующий вид.

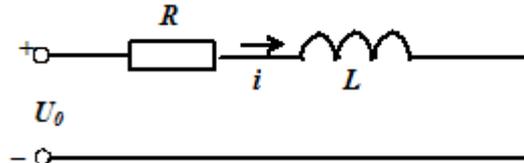


Рис. 2.21. Схема активно-индуктивной цепи

Для данного контура (рис. 2.21), согласно второму правилу Кирхгофа, нарастающий в данной цепи ток i после момента включения будет описываться следующим дифференциальным уравнением:

$$iR + L \frac{di}{d\tau} = U_0 \text{ или } \frac{di}{d\tau} + \frac{1}{\tau_9} i = \frac{U_0}{L}, \quad (2.7)$$

где $\tau_9 = \frac{L}{R}$ – электромагнитная постоянная времени активно-индуктивной цепи; R – активное сопротивление цепи; L – индуктивность цепи; τ – время; $e = -L \frac{di}{d\tau}$ – ЭДС самоиндукции от нарастающего тока i (противо-ЭДС).

Решим это уравнение. Оно является неоднородным линейным уравнением первого порядка. Найдём сначала общее решение \bar{i} линейного однородного уравнения:

$$\frac{d\bar{i}}{d\tau} + \frac{1}{\tau_9} \bar{i} = 0. \quad (2.8)$$

Откуда $\frac{d\bar{i}}{\bar{i}} = -\frac{d\tau}{\tau_9}$ и после интегрирования $\ln \bar{i} = -\frac{\tau}{\tau_9} + \ln c_0$ или

$$\bar{i} = c_0 \cdot \exp\left(-\frac{\tau}{\tau_9}\right), \quad (2.9)$$

получили общее решение уравнения (2.8). Тогда решение уравнения (2.7) найдём методом вариации произвольной постоянной c_0 . Частное решение этого уравнения будем искать в виде

$$\hat{i} = C(\tau) \cdot \exp\left(-\frac{\tau}{\tau_9}\right), \quad (2.10)$$

где $C(\tau)$ – неизвестная функция. Эту функцию найдём в результате подстановки данного частного решения (2.10) в уравнение (2.7).

$\frac{d}{dt} \left[C(\tau) \cdot \exp\left(-\frac{\tau}{\tau_3}\right) \right] + \frac{1}{\tau_3} C(\tau) \cdot \exp\left(-\frac{\tau}{\tau_3}\right) = \exp\left(-\frac{\tau}{\tau_3}\right) \frac{dC}{d\tau} = \frac{U_0}{L}$, т.е. получили дифференциальное уравнение

$$\frac{dC}{d\tau} = \frac{U_0}{L} \exp\left(\frac{\tau}{\tau_3}\right),$$

интегрируя которое, найдём функцию

$$C(\tau) = \frac{U_0}{L} \tau_3 \exp\left(\frac{\tau}{\tau_3}\right) = \frac{U_0}{R} \cdot e^{\tau/\tau_3}. \text{ Откуда } \hat{i} = C(\tau) \cdot \exp\left(-\frac{\tau}{\tau_3}\right) = \frac{U_0}{R}. \text{ Тогда}$$

общим решением уравнения (2.7) будет

$$i = \bar{i} + \hat{i} = c_0 \cdot e^{-\tau/\tau_3} + \frac{U_0}{R}. \quad (2.11)$$

Очевидно, при $\tau = 0$ тока нет ($i = 0$). Из этого условия следует, что $c_0 = -\frac{U_0}{R}$ и, следовательно, ток в нашем случае будет нарастать по закону

$$i = \frac{U_0}{R} \left(1 - e^{-\tau/\tau_3}\right). \quad (2.12)$$

В сетях низкого напряжения электромагнитная постоянная времени τ_3 находится в пределах от одной до десяти миллисекунд, поэтому установившееся значение тока $I_{уст} = \frac{U_0}{R}$ достигается сравнительно быстро.

Также быстро будет падать величина тока в цепи от $I_{уст} = \frac{U_0}{R}$ до нуля после отключения нагрузки от источника питания. Закон этого падения выводится из того же дифференциального уравнения (2.7), в котором напряжение источника питания U_0 следует взять равным нулю. Но в этом случае получится линейное однородное уравнение (2.8), решение которого уже ранее получено. Это уравнение (2.9), из которого следует закон изменения тока в активно-индуктивной цепи (рис. 2.21) после отключения от источника питания

$$i = \frac{U_0}{R} \exp\left(-\frac{\tau}{\tau_3}\right).$$

Вопросы для самоконтроля и задания

1. Что собой представляет коммутационный аппарат?
2. Что такое электромагнитная постоянная времени активно-индуктивной цепи?
3. Напишите закон нарастания тока в цепи при включении питания.
4. Напишите закон убывания тока в цепи при выключении питания.

2.12. Коммутация тока при низких переменных напряжениях источника

Теперь включим нашу активно-индуктивную цепь (см. рис. 2.21) на переменное напряжение $u(\tau) = U_m \sin(\omega\tau + \psi)$. В этом случае уравнение (2.7) примет вид

$$\frac{di}{d\tau} + \frac{1}{\tau_3} i = \frac{U_m}{L} \sin(\omega\tau + \psi), \quad (2.13)$$

где ψ – начальная фаза напряжения в момент включения цепи, т.е.

$$u_0 = u(0) = U_m \sin \psi. \quad (2.14)$$

Решением линейного неоднородного уравнения (2.13) будет

$$i(\tau) = \frac{U_m}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} [\sin(\omega\tau + \psi - \varphi) - e^{-\tau/\tau_3} \sin(\psi - \varphi)], \quad (2.15)$$

где $\varphi = \arccos \frac{R}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}}$. Величина $\cos \varphi$ определяет ту часть энергии

электрического тока, которую можно превратить в другой вид энергии (в данном случае в джоулеву теплоту).

Таким образом, изменение тока в процессе включения зависит от изменения двух составляющих: периодической $\sin(\omega\tau + \psi - \varphi)$ и аperiodической $e^{-\tau/\tau_3} \sin(\psi - \varphi)$.

Из (2.15) также следует, что при $\tau \gg \tau_3$, величина $e^{-\tau/\tau_3} \approx 0$ и установившееся значение переменного тока (установившийся режим) будет определяться только периодической составляющей

$$i_{уст}(\tau) = \frac{U_m}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} \sin(\omega\tau + \psi - \varphi). \quad (2.16)$$

При $\tau \approx 0$ (время, близкое к моменту включения) ток будет изменяться в основном за счёт аperiodической составляющей

$$i_{анер}(\tau) = \frac{U_m}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} e^{-\tau/\tau_3} \sin(\psi - \varphi). \quad (2.17)$$

График кривой результирующего тока будет при этом определяться наложением кривых (2.16) и (2.17). На диаграмме (рис. 2.22) представлены кривые изменения напряжения $u(\tau) = U_m \sin(\omega\tau + \psi)$, результирующего тока согласно (2.15), установившегося тока $i_{уст}(\tau)$, изменяющегося согласно (2.16), и аperiodической составляющей $i_{анер}$, убывающей по экспоненциальному закону (2.17).

Из данных кривых видно, что в начале включения, когда величина $i_{анер}$ ещё велика, амплитуда результирующего тока будет заметно

превышать амплитуду установившегося тока. Такую амплитуду результирующего тока называют ударным током $I_{y\partial}$ (см. рис. 2.22).

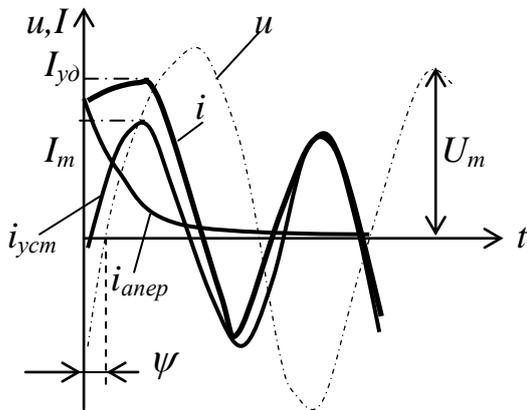


Рис. 2.22. Кривые токов

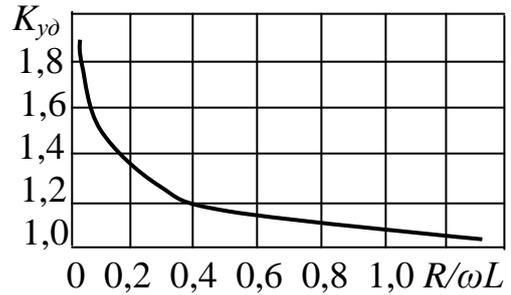


Рис. 2.23. Ударный коэффициент $K_{y\partial}$

Из анализа (2.15) видно, что наибольшие значения ударного тока $I_{y\partial}$ будут достигаться, когда момент включения совпадёт с амплитудным значением I_m установившегося тока. При $\omega L \gg R$ (т.е. цепь индуктивная) это условие достигается, когда начальная фаза напряжения $\psi = 0$. При активной цепи ($\omega L \ll R$) будет равен единице $\cos \varphi$, т.е. $\varphi = 0$, а максимальное значение $I_{y\partial}$ будет при включении, когда напряжение будет иметь амплитудное значение ($\psi = \frac{\pi}{2}$). Ударным коэффициентом называют отношение ударного тока к амплитудному значению установившегося тока: $K_{y\partial} = I_{y\partial} / I_m$. Ударный коэффициент зависит от отношения активного сопротивления цепи R к индуктивному ωL (рис. 2.23).

Ударный ток наступает в момент времени $\tau \approx \frac{\pi}{\omega}$, а величина ударного коэффициента вычисляется по следующей формуле:

$$K_{y\partial} = \sin\left(\omega \frac{\pi}{\omega} + \psi - \varphi\right) - e^{-\pi/(\omega\tau_3)} \sin(\psi - \varphi). \quad (2.18)$$

Когда $\varphi = 0$ и $\psi = \frac{\pi}{2}$ или $\psi = 0$ и $\varphi = \frac{\pi}{2}$, из (2.18) следует

$$K_{y\partial} = 1 - e^{-\pi/(\omega\tau_3)}. \quad (2.18)$$

Для цепей низкого (высокого) напряжения $K_{y\partial} = 1,3$ ($K_{y\partial} = 1,8$).

Вопросы для самоконтроля

1. Что называют ударным током?
2. При каком моменте включения ударный ток будет наибольшим?
3. Что такое ударный коэффициент?

Глава 3. ПЛАВКИЕ ПРЕДОХРАНИТЕЛИ

Плавкие предохранители относятся к первым в истории развития электрических аппаратов наиболее дешевым устройствам для защиты электрических цепей от токовых перегрузок и токов короткого замыкания.

Предохранитель – это коммутационный электрический аппарат, предназначенный для отключения защищаемой цепи посредством разрушения специально предусмотренных токоведущих частей под действием тока, превышающего допустимое значение.

Предохранители нашли широкое применение ввиду простоты устройства и обслуживания, малых размеров, высокой отключающей способности, небольшой стоимости. Предохранители низкого напряжения рассчитаны на токи от миллиампер до тысячи ампер и на напряжение до 660 В, а предохранители высокого напряжения – до 35 кВ и выше.

Несмотря на всё своё разнообразие, предохранители имеют следующие общие элементы: корпус, плавкую вставку, контактное присоединительное устройство, дугогасительное устройство или дугогасящую среду.

Процесс срабатывания предохранителя делится на несколько стадий: нагревание вставки до температуры плавления, плавление и испарение вставки, возникновение и гашение электрической дуги с восстановлением изоляционных свойств образующегося изоляционного промежутка.

3.1. Основные требования, предъявляемые к предохранителям

Зависимость времени перегорания плавкой вставки от тока называется *времятоковой характеристикой* предохранителя. Она должна проходить ниже времятоковой характеристики защищаемого объекта (рис. 3.1).

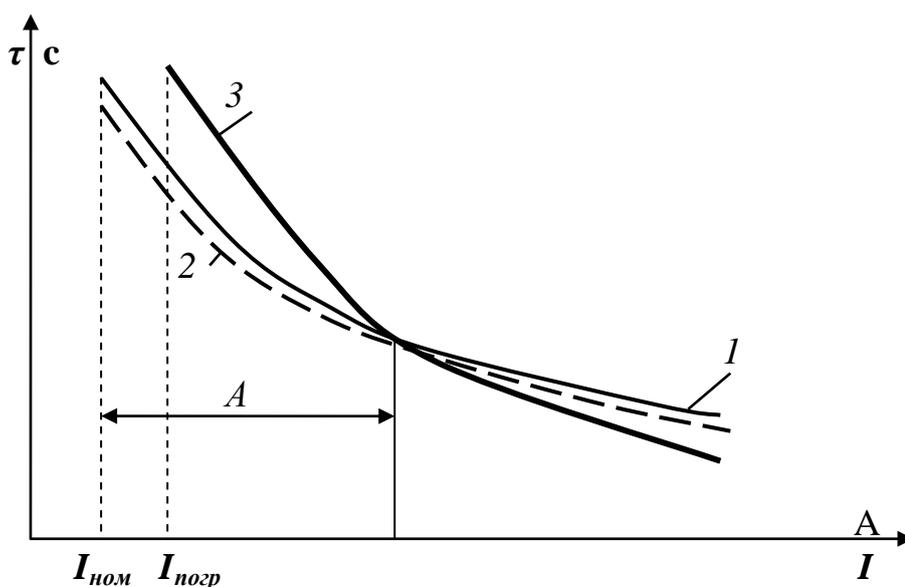


Рис. 3.1. Времятоковые характеристики: 1, 3 – объектов; 2 – предохранителя

Время срабатывания предохранителя при коротком замыкании должно быть минимально возможным (особенно при защите полупроводниковых приборов).

При коротком замыкании в защищаемой цепи предохранители должны обеспечивать селективность (избирательность) защиты.

Характеристики предохранителя должны быть стабильными, а технологический разброс их параметров не должен нарушать надёжность защиты.

Конструкция предохранителя должна обеспечивать возможность быстрой и удобной замены плавкой вставки при ее перегорании.

Работа предохранителя протекает в двух разных режимах: в нормальных условиях и в условиях перегрузок и коротких замыканий. В первом режиме нагрев вставки имеет характер установившегося процесса, при котором вся выделяемая в ней теплота отдаётся в окружающую среду. До установившейся температуры нагреваются и все другие детали предохранителя. Эта температура не должна превышать допустимых значений.

Номинальным током плавкой вставки $I_{ном}$ называется ток, на который рассчитана её длительная работа. Он может отличаться от номинального тока самого предохранителя. Обычно в один и тот же предохранитель можно вставлять плавкие вставки с различными номинальными токами. А номинальный ток предохранителя равен наибольшему из номинальных токов плавких вставок, предназначенных для данной конструкции предохранителя.

Ток, при котором плавкая вставка сгорает при достижении установившейся температуры, называется *пограничным (пороговым) током $I_{погр}$* . Очевидно $I_{погр} > I_{ном}$. С другой стороны, для лучшей защиты значение $I_{погр}$ должно быть как можно ближе к номинальному. При токах, близких к пограничному, температура плавкой вставки должна приближаться к температуре плавления. Однако такие высокие температуры, до которых нагреваются все детали предохранителя, вызывают «тепловое старение» плавкой вставки.

Для сокращения времени срабатывания предохранителя используют:

- 1) легкоплавкие металлы (олово, свинец и т.д.) в качестве материала плавкой вставки;
- 2) металлургический эффект, который состоит в способности некоторых легкоплавких металлов растворять некоторые тугоплавкие металлы, а полученный, таким образом, раствор будет обладать уже меньшей температурой плавления и большим удельным сопротивлением. Например, на плавкую медную вставку, для которой $t_{пл} = 1100$ °С, наносится шарик олова с $t_{пл} = 232$ °С, и температура плавления такой плавкой вставки значительно снизится, т.к. оловянный шарик, расплавившись, начнёт растворять медь. Этот способ применим только для

тонких вставок. При возрастании диаметра влияние этого явления резко снижается;

- 3) придают плавкой вставке специальную форму. Вставки выполняют в виде пластинки с вырезами, уменьшающие её сечение на отдельных участках. На этих суженых участках выделяется больше теплоты, чем на широких. При номинальном токе избыточная теплота вследствие теплопроводности распространяется к более широким частям, и вся вставка имеет практически одну температуру. При перегрузке нагрев узких участков идёт быстрее, т.к. только часть теплоты успевает отводиться к широким участкам. Плавкая вставка будет плавиться в одном самом узком (горячем) месте. При коротком замыкании нагрев узких участков идёт настолько интенсивно, что отводом теплоты практически можно пренебречь.

Вопросы для самоконтроля

1. Что называют плавким предохранителем?
2. Что такое времятоковая характеристика плавкого предохранителя?
3. Что такое номинальный ток плавкой вставки?
4. Что такое пограничный (пороговый) ток плавкой вставки?
5. Как должны соотноситься между собой номинальный и пограничный токи?
6. Какие существуют решения для ускорения времени срабатывания плавкого предохранителя?

3.2. Нагрев плавкой вставки при коротком замыкании

При условии, что ток, проходящий через вставку при коротком замыкании много больше номинального, процесс нагрева можно считать адиабатическим, т.е. вся джоулева теплота, выделяемая в плавкой вставке, идёт на нагрев.

Время нагрева вставки до температуры плавления определяется по формуле

$$\tau_{пл} = \frac{A'}{j^2}, \quad (3.1)$$

где A' – постоянная, определяемая только свойствами материала и не зависящая от формы и размеров вставки, $A \cdot \text{Кл}/\text{м}^2$; j – плотность тока во вставке, $\text{А}/\text{м}^2$.

После того, когда часть материала плавкой вставки из твёрдого состояния перейдёт в жидкое, его удельное сопротивление увеличится в десятки раз и начнётся процесс плавления всей вставки.

Время перехода материала вставки из твёрдого состояния в жидкое

$$\tau_{пер} = \frac{A''}{j^2}, \quad (3.2)$$

где A'' – постоянная, зависящая от свойств материала (температуры плавления), $A \cdot \text{Кл}/\text{м}^2$.

Постоянные A' и A'' можно определить из справочных таблиц.

Основным параметром предохранителя при коротком замыкании является **предельный ток отключения** – ток при наибольшем рабочем напряжении, при котором предохранитель срабатывает.

Полное время отключения цепи предохранителем равно

$$\tau_{np} = \tau_{nl} + \tau_{nep} + \tau_{\partial}. \quad (3.3)$$

Здесь τ_{∂} – время существования дуги, оно зависит от конструкции предохранителя.

Для предохранителей со вставкой, находящейся в воздухе,

$$\tau_{np} = \left(A' + \frac{A''}{3} \right) \frac{k_0}{j^2}, \quad (3.4)$$

где $k_0 = 1, 2 \dots 1, 3$ – коэффициент, учитывающий время горения дуги в воздухе.

В предохранителях с наполнителем

$$\tau_{np} = \left(A' + \frac{A''}{3} \right) \frac{k_{\partial}}{j^2}, \quad (3.5)$$

где $k_{\partial} = 1, 7 \dots 2$ – коэффициент, учитывающий время горения дуги предохранителя с наполнителем.

За счёт использования в предохранителях металлургического эффекта, вставки с перешейками, легкоплавких материалов можно добиться того, что предохранитель будет отключать ток короткого замыкания ещё до достижения им установившегося значения (средства дугогашения могут гасить дугу за миллисекунды).

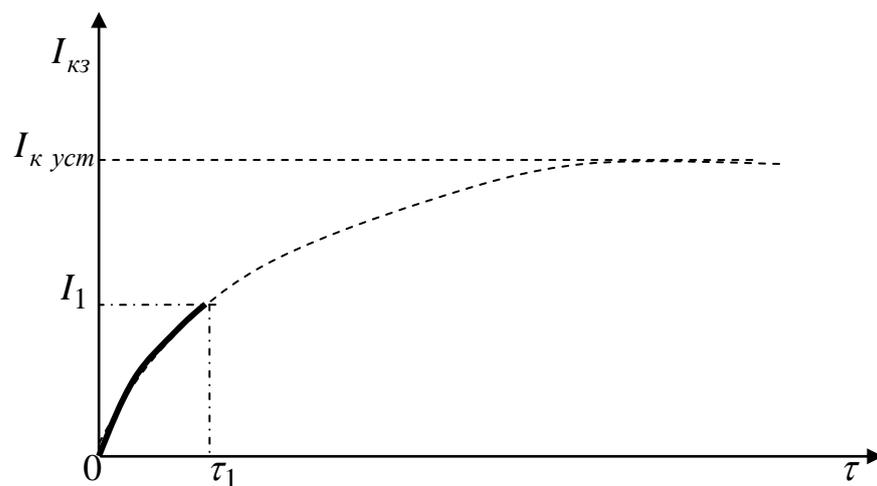


Рис. 3.2. Временная диаграмма тока короткого замыкания

Дуга образуется через время τ_1 после начала короткого замыкания, когда ток в цепи I_1 значительно меньше установившегося значения тока короткого замыкания.

Предохранители по принципу устройства делятся на следующие типы: а) с открытой плавкой вставкой в воздухе, б) закрытые предохранители, в) предохранители с наполнителем (засыпные), г) инерционные, д) быстродействующие предохранители для защиты полупроводниковых приборов, е) жидкометаллические, ж) блоки «предохранитель-выключатель».

Вопросы для самоконтроля и задания

1. Из чего складывается полное время отключения цепи плавким предохранителем?
2. От чего зависит время нагрева вставки до температуры плавления?
3. От чего зависит время перехода плавкой вставки из твёрдого состояния в жидкое?
4. Напишите закон убывания тока в цепи при выключении питания.
5. Как вычислить полное время отключения цепи предохранителем с плавкой вставкой, находящейся в воздухе?
6. Как вычислить полное время отключения цепи плавким предохранителем с наполнителем?

3.3. Физико-химические свойства основных элементов конструкции предохранителей

Наиболее подходящим материалом для плавкой вставки является серебро, поскольку серебро имеет высокую и стабильную электропроводность. Серебряные плавкие элементы хорошо работают в непрерывном режиме, при циклических нагрузках и перегрузках, на воздухе и в песчаном наполнителе. Плавкие элементы из серебра по сравнению со всеми другими имеют максимальный срок службы.

Серебро обладает хорошими технологическими свойствами: легко поддаётся точной штамповке, сварке и пайке, не требует при этом предварительной обработки.

При воздействии высоких температур серебро может окисляться, но окислы серебра неустойчивы, и при температуре выше 180 °С они восстанавливаются до чистого серебра. Однако при всех этих достоинствах у серебра есть недостаток – оно дороже всех других материалов, применяемых для плавких элементов.

По своим свойствам медь ближе всего к серебру, поэтому она также широко используется для изготовления плавких вставок. Однако медь легко окисляется, а её окись стабильна вплоть до температуры плавления меди. Эта плёнка имеет высокое удельное сопротивление, но из-за напряжений, возникающих на ней в результате адгезии (прилипания инородных частиц), медная плёнка растрескивается, отслаивается, облегчая тем самым развитие коррозионных процессов.

Срок службы плавких вставок из меди намного короче, чем из серебра (рис. 3.3,*а*). Особенно чувствительны плавкие элементы из меди к циклическим нагрузкам (рис. 3.3,*б*).

На рис. 3.3,*а* приведены графики изменения электрического сопротивления серебряной (сплошная кривая) и медной (пунктирная кривая) проволоки диаметром 0,13 мм при непрерывной нагрузке током на воздухе в зависимости от времени, а на рис. 3.3,*б* приведены те же графики, но при циклической нагрузке током $I = 1,1I_{ном} = 2,6$ А (один час включения, один час выключения) в зависимости от числа n циклов.

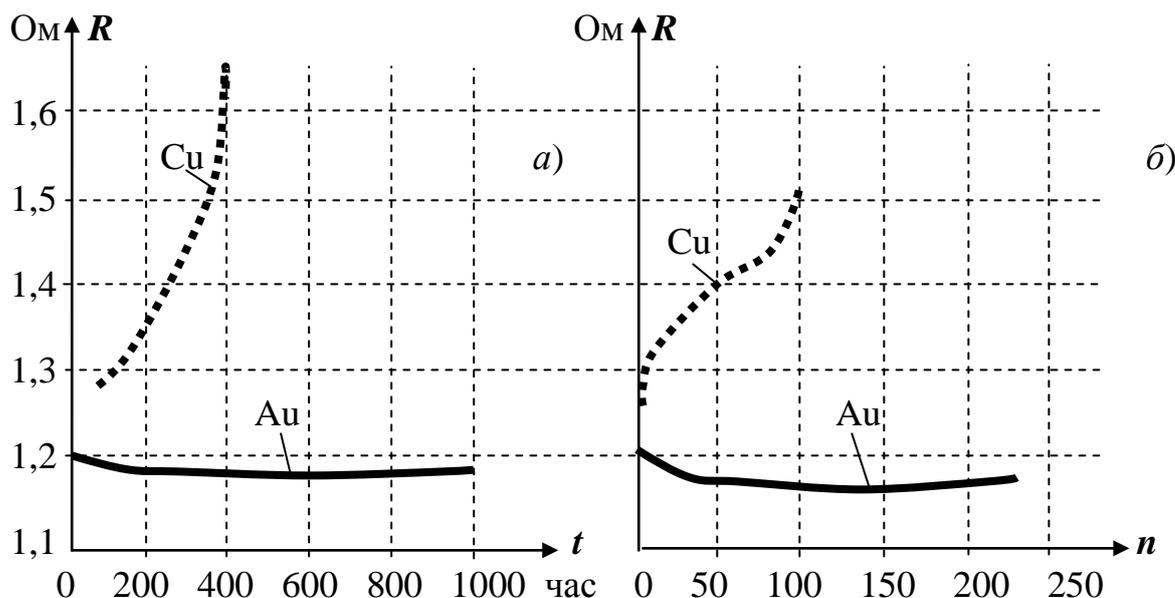


Рис. 3.3 Графики изменения сопротивления: *а* – при непрерывной нагрузке; *б* – при циклической нагрузке (n -цикл: 1 час включения, 1 час выключения)

Размещение плавкой вставки из меди в кварцевом песке несколько изменяет кривую её зависимости от числа n циклов, хотя её срок службы почти такой же, как и на воздухе.

Иногда применяется гальваническое серебрение медной плавкой вставки, однако это в общем случае не даёт надёжной защиты от окисления поверхности такой вставки.

В связи с тем, что во всём мире запасы серебра и меди быстро истощаются и уже в настоящее время ощущается недостаток этих материалов, в ближайшем будущем, вероятно, получит широкое распространение использование в качестве материала для плавких вставок алюминия. Его удельное электрическое сопротивление $\rho_0 = 2,8 \cdot 10^{-8}$ Ом·м несколько выше, чем у меди и серебра, но зато алюминий имеет низкую и стоимость и большие запасы его содержания в земной коре. Электрическое сопротивление алюминиевых плавких вставок стабильно при длительном протекании номинального тока, что обусловлено наличием тонкой окисной плёнки, защищающей металл от дальнейшего окисления.

Из других металлов, применяющихся при изготовлении плавких элементов предохранителей, следует отметить цинк. Цинк имеет низкую температуру плавления, а для плавких предохранителей низкая температура плавления плавкой вставки предпочтительна, поскольку значительно снижаются требования термоустойчивости к другим элементам электрического аппарата.

Вопросы для самоконтроля

1. Какие материалы используются для плавких вставок?
2. Какими достоинствами и недостатками обладают плавкие вставки из серебра?
3. Какими достоинствами и недостатками обладают плавкие вставки из меди?
4. Чем вызвано использование плавких вставок из алюминия и цинка?
5. Какое свойство алюминия обеспечивает хорошую стабильность работы изготовленных из него плавких вставок?

3.4. Дугогасящие среды

В настоящее время созданы дуговые предохранители, у которых гашение дуги происходит в специальной камере, снабжённой дугогасительной решёткой. Сюда же следует отнести и взрывчатые предохранители, у которых процесс разрушения плавкой вставки осуществляется с помощью взрывчатого вещества, но гашение дуги происходит в воздушном пространстве камеры. Оба эти вида предохранителей обычно используют для больших номинальных токов.

В качестве дугогасящей среды может использоваться вакуум. Но вакуумные предохранители применимы лишь в цепях переменного тока либо импульсного тока. В последнем случае между униполярными импульсами тока должна быть пауза, длительность которой обязана быть достаточной для полной деионизации вакуума в межконтактном промежутке и исключать возможность его последующего пробоя. В цепях постоянного или выпрямленного токов в таких предохранителях будет иметь место устойчивое горение дуги, поэтому они не смогут отключить ток короткого замыкания.

В некоторых предохранителях в качестве дугогасящей среды используется *изоляционная жидкость*. При токах короткого замыкания вокруг плавкой вставки появляется пузырь из паров изоляционной жидкости. Пары жидкости теплоизолируют плавкий элемент или его узкий перешеек, и процесс его расплавления ускоряется. Однако при малых токовых перегрузках, когда теплота успевает отводиться от перешейка, такие предохранители применять нельзя. Это связано с тем, что температура кипения применяемой жидкости обычно ниже температуры плавления плавкого элемента. Поэтому пока вся жидкость не испарится, температура плавкой вставки не будет превышать температуры кипения жидкости и,

следовательно, плавкий элемент не сможет расплавиться. Когда же вся жидкость испарится, предохранитель тем более не сработает.

Наиболее широкое распространение и более универсальное применение получили предохранители, у которых дугогасящей средой служит сыпучий накопитель, чаще всего кварцевый песок. Гашение дуги в таких предохранителях происходит за счёт интенсивной деионизации в узких щелях между песчинками наполнителя. Слой сыпучего накопителя обеспечивает защиту деталей предохранителя от термического воздействия дуги. Достоинствами кварцевого песка (при его использовании в качестве дугогасящей среды) являются его химическая инертность, термическая стойкость до температуры плавления, которая у него достаточно высока, высокий коэффициент теплопроводности по сравнению с другими сыпучими материалами, низкая стоимость.

Габариты предохранителей с кварцевым наполнителем намного меньше габаритов иных предохранителей.

Вопросы для самоконтроля

1. Какие существуют дугогасящие среды?
2. В каких цепях применяют вакуумные предохранители?
3. Почему в цепях переменного тока вакуумные предохранители не применяются?
4. Что даёт использование изоляционных жидкостей в качестве дугогасящей среды?
5. Какими достоинствами обладает кварцевый песок по сравнению с другими сыпучими материалами, используемыми в качестве дугогасящих сред?

3.5. Конструкции корпуса и вставок плавких предохранителей

Корпус плавких вставок предохранителей изготавливают из высокопрочных сортов специальной керамики (фарфор, стеатит или корундомуллитовая керамика) для обеспечения прочности на разрыв. Некоторые зарубежные фирмы (США, Япония) делают корпуса предохранителей из стеклоткани, пропитанной кремнийорганической смолой.

Фирма «Фриц Дришер» (ФРГ) производит предохранители с шарообразным корпусом из эпоксидной смолы, что значительно упрощает технологию изготовления при массовом производстве предохранителей. Для повышения механической прочности в эпоксидную смолу добавляют волокнистый материал. В таком предохранителе отсутствуют резьбовые соединения, и он поэтому достаточно влагонепроницаем. Однако такие предохранители предназначены только для отключения в цепях больших токов короткого замыкания, поскольку при малых токовых перегрузках процесс плавления замедляется и возникают недопустимые перегревы корпуса из смолы.

Корпуса предохранителей для цепей с малыми номинальными токами обычно делаются из специальных стёкол.

По конструктивному признаку все разновидности плавких элементов можно разделить на две группы: вставки с постоянным поперечным сечением по их длине и переменным сечением. Плавкие элементы постоянного сечения обычно изготавливают из проволоки, а переменного сечения – из металлической фольги или тонкой металлической плёнки.

Отношение поперечного сечения широкой части плавкого элемента к поперечному сечению узкого перешейка определяет вид защитной характеристики. Например, если это отношение больше пяти, то такой предохранитель относится к быстродействующим предохранителям. Для нормально действующих и инерционных предохранителей это отношение менее пяти.

Создание нескольких относительно узких параллельных каналов горения электрической дуги улучшает условия её гашения за счёт использования большего количества материала наполнителя и уменьшения тока в каждой из параллельных ветвей. Число параллельных ветвей ограничивается технологическими трудностями изготовления узких перешейков малых размеров.

Предохранители в цепях с большими номинальными токами присоединяются к контактным выводам сваркой, обеспечивающей хорошее качество контактного соединения. Предохранители в цепях с малыми номинальными токами присоединяются к контактным выводам пайкой с мягким припоем, но чаще всего с помощью механического обжатия. Для присоединения в цепь разборных предохранителей используются болтовые зажимы.

Вопросы для самоконтроля

1. Из каких материалов делают корпуса плавких предохранителей в цепях больших токов короткого замыкания?
2. Какие сорта керамики используются для изготовления корпусов плавких вставок?
3. Из каких материалов делают корпуса плавких предохранителей для цепей с малыми номинальными токами?
4. Из чего изготавливаются плавкие элементы с постоянным поперечным сечением по их длине?
5. Из чего изготавливаются плавкие элементы с переменным поперечным сечением по их длине?
6. Что определяет отношение поперечного сечения широкой части плавкого элемента к поперечному сечению узкого перешейка?

3.6. Конструкции указателей срабатывания плавких вставок

Плавкие вставки большинства предохранителей находятся внутри непрозрачного корпуса. Поэтому визуально состояние такой вставки определить невозможно. Особенно важно иметь представление о состоянии

плавкого элемента в предохранителях цепи с большими номинальными токами, поскольку процесс установки и снятия предохранителей здесь связан с большими трудностями. В связи с этим возникает необходимость применения указателей, которые показывают – перегорел ли плавкий элемент предохранителя или нет.

Патентов на конструкции таких указателей уже предостаточно. Наиболее широкое применение получил указатель, использующий тот же принцип, что и сам плавкий элемент, – расплавление под действием сверхтока.

Для создания такого указателя используется тонкая металлическая проволока с достаточной механической прочностью на растяжение. Её электрически присоединяют параллельно плавкой вставке. При перегорании плавкой вставки перегорит и эта проволочка-указатель. Проволочка-указатель закрепляется с одной стороны наглухо, а с другой – подсоединяется к штифту, который подтягивается с помощью пружины в специальное отверстие.

Указатели срабатывания предохранителя такого типа изготавливаются двух видов: автономные (в виде небольшой плавкой вставки с высокоомным плавким элементом и наполнителем), устанавливаемые (в собственном корпусе вне плавкой вставки) и встроенные (в корпус плавкой вставки). Автономные указатели срабатывания иногда крепятся непосредственно на плавкой вставке, а иногда устанавливаются в стороне от предохранителя, представляя параллельную вставке электрическую ветвь. Последнее характерно для предохранителей фирмы «Инглиш электрик» (Великобритания).

После перегорания проволочки-указателя освобождается пружина, которая выталкивает штифт, окрашенный в яркий цвет. Это и будет указателем того, что предохранитель перегорел. Иногда штифт служит и бойком, воздействующим на вспомогательные контакты предохранителя. В результате этого сигнал о срабатывании предохранителя будет передан на соответствующие органы управления.

В зависимости от соотношения электрических сопротивлений и тепловых параметров основного плавкого элемента и указателя при срабатывании предохранителя могут наблюдаться три различных случая:

- 1) первоначальное расплавление плавкого элемента, горение дуги на нём. Активное сопротивление указателя шунтирует дугу основного плавкого элемента, способствуя снижению скорости нарастания напряжения на промежутке и снижению пика напряжения;
- 2) первоначальное расплавление проволоки указателя, а затем расплавление основного плавкого элемента. В связи с тем, что основной плавкий элемент имеет малое активное сопротивление, он будет шунтировать промежуток, образовавшийся после расплавления проволоки указателя, и препятствовать сколько-нибудь длительному горению дуги на указателе;

- 3) почти одновременно расплавление основного плавкого элемента и проволоки указателя. Горение дуги на указателе может происходить до конца горения дуги на основном плавком элементе в одних случаях, а в других – горение дуги на указателе прекратится намного раньше, чем в основном плавком элементе.

К сожалению, указатели рассмотренного типа обладают нестабильностью срабатывания. При малых напряжениях и при малых токовых перегрузках проволока перегорает на небольшом участке. Если этот участок находится на большом расстоянии от пружины и если плотность упаковки песчаного накопителя в корпусе указателя большая, силы трения проволоки о накопитель могут превысить силу упругости пружины и указатель срабатывания может не сработать. Недостатком таких указателей является также то, что при случайном механическом обрыве плавкого элемента в процессе сборки или по какой-либо другой причине указатель срабатывания не покажет действительное состояние предохранителя без включения его в сеть.

В качестве визуальных указателей срабатывания используют также газоразрядные лампы и светодиоды, включённые параллельно плавкой вставке. Но стоимость таких указателей срабатывания выше, а надёжность их в работе ниже, чем у описанных выше указателей срабатывания.

Предохранители подразделяют на закрытые и засыпные.

Закрытые предохранители обычно выполняются в виде фибровой трубки, закрытой с концов латунными колпаками. Внутри трубки плавкие вставки. Образующаяся при сгорании вставки электрическая дуга горит в закрытом объёме, стенки выделяют газ, давление повышается, и дуга гаснет.

Закрытые предохранители серии ПР-2 (разборные) имеют номинальные токи от 100 до 1000 А, предельные отключаемые токи при напряжении 380 В и $\cos\varphi > 0,4$ составляют от 6 до 20 кА. Вставки обычно с перешейками.

Предохранители с накопителем (засыпные) представляют собой фарфоровые или пластмассовые корпуса, заполненные мелом или кварцевым песком. Возникающая при плавлении вставки электрическая дуга тесно соприкасается с мелкими зёрнами накопителя, интенсивно охлаждается, деионизируется и поэтому быстро гасится.

Вопросы для самоконтроля

1. Что представляет собой указатель срабатывания, использующий тот же принцип, что и сам плавкий элемент, – расплавление под действием сверхтока?
2. Какие ещё существуют визуальные указатели срабатывания плавких предохранителей?
3. Что представляют собой закрытые предохранители и засыпные?
4. При каких условиях используются предохранители серии ПР-2?

3.7. Выбор предохранителей

Предохранители выбирают: 1) по условию пуска и длительности эксплуатации; 2) по условию селективности.

1) В процессе длительной эксплуатации температура нагрева предохранителя не должна превышать допустимых значений. Для выполнения этого требования необходимо, чтобы патрон и плавкая вставка выбирались на номинальный ток, равный или несколько больший номинального тока защищаемой установки.

Предохранитель не должен отключать установку при перегрузках, которые являются эксплуатационными. Например, пусковой ток асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором может достигать семикратного превышения номинального тока (по мере разгона пусковой ток будет падать до номинального тока двигателя, а длительность пуска зависит от характера нагрузки).

Для двигателей с лёгкими условиями пуска (двигатели вентиляторов, насосов, станков) номинальный ток вставки выбирается по пусковому току нагрузки $I_{ном.в} = 0,4I_{пуск}$.

Для тяжёлых условий пуска, когда двигатель медленно разворачивается (привод центрифуги, краны, стартеры автомобилей) или в повторно-кратковременном режиме, когда пуски проходят с большой частотой, вставки выбирают с ещё большим запасом $I_{ном.в} = (0,5 \div 0,6)I_{пуск}$.

Если предохранитель стоит в линии, питающей несколько двигателей, плавкая вставка выбирается по формуле

$$I_{ном.в} = 0,4[I_{р.лин} + \max(I_{пуск} - I_{ном.дв})],$$

где $I_{р.лин}$ – расчётный номинальный ток линии, равный сумме номинальных токов двигателей $I_{ном.дв}$; разность $I_{пуск} - I_{ном.дв}$ берётся для двигателя, у которых она наибольшая.

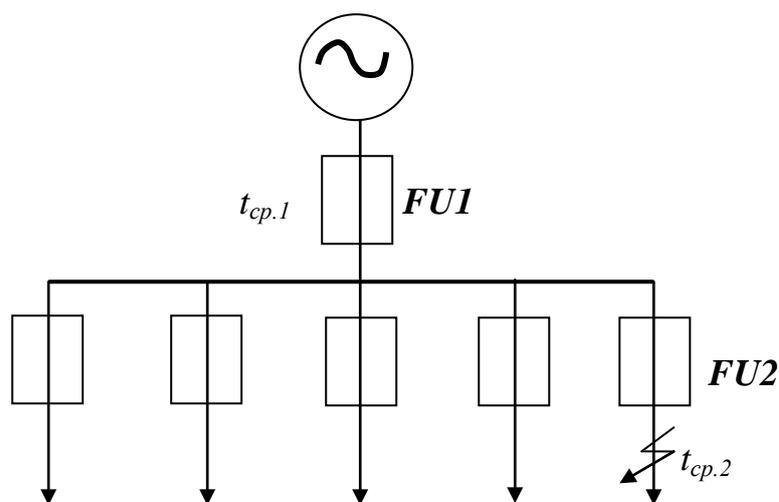


Рис. 3.4 Схема селективного подключения предохранителей разветвлённой сети

Для сварочных трансформаторов предохранитель подбирается из условия $I_{ном.в} = 1,2I_{ном} \sqrt{ПВ}$, где $ПВ$ – продолжительность включения.

2) Условие селективности обеспечивается следующим образом. Между источником энергии и потребителем обычно устанавливается несколько предохранителей (рис. 3.4), которые должны отключать повреждённые участки по возможности селективно.

Предохранитель $FU1$, пропускающий большой номинальный ток, имеет вставку большего сечения, чем предохранитель $FU2$, установленный у одного из потребителей.

При коротком замыкании необходимо, чтобы повреждение отключалось предохранителем, расположенным у места повреждения. Все другие предохранители, расположенные ближе к источнику, должны остаться работоспособными. Такая согласованность предохранителей называется избирательностью или селективностью.

Для обеспечения селективности полное время работы предохранителя $FU2$ должно быть меньше времени нагрева предохранителя $FU1$ до температуры плавления его вставки $t_{p.2} < t_{пл.1}$.

Кроме того, наименьшее фактическое время срабатывания предохранителя $FU1$ (на больший ток) должно быть больше наибольшего времени срабатывания предохранителя $FU2$ (на меньший номинальный ток): $t_{ср.1} > t_{ср.2}$.

Время срабатывания предохранителя из-за производственных допусков может отклоняться от номинального на $\pm 50\%$. Тогда в последнем неравенстве левую часть следует умножить на коэффициент 0,5, учтя, что предохранитель $FU1$ взят с отрицательным допуском по времени срабатывания, а правую часть – на 1,5, учтя, что предохранитель $FU2$ взят с положительным допуском. В результате необходимым условием селективности будет неравенство $t_{ср.1} > 3t_{ср.2}$.

В случае однотипных предохранителей для проверки условия селективности достаточно проверить при наибольшем токе вставку с меньшим номинальным током.

В случае разнотипных предохранителей проверка условия селективности производится по всему диапазону токов: от трёхфазного короткого замыкания в конце защищаемого участка до номинального тока плавкой вставки.

Вопросы для самоконтроля

1. Каким требованиям должны удовлетворять предохранители для асинхронных электродвигателей?
2. Каким должен быть номинальный ток плавкой вставки предохранителя для вентиляторов, насосов, станков?
3. Каким должен быть номинальный ток плавкой вставки предохранителя, защищающего от перегорания стартеры автомобилей?
4. В чём суть условия селективности при выборе предохранителей?

Глава 4. ТЕПЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АППАРАТАХ

В процессе своей работы электрические аппараты нагреваются. Часть электрической энергии они преобразуют в теплоту, которая в результате теплообмена с внешней средой рассеивается в пространстве.

4.1. Источники теплоты и виды теплообмена в электрических аппаратах

В токоведущих частях и контактах электрических аппаратов в зависимости от величины протекающего тока выделяется джоулева теплота. Количество выделенной теплоты Q током I в проводнике по закону Джоуля¹ – Ленца² [9, с. 125] равно

$$Q = I^2 R \tau, \quad (4.1)$$

где R – активное сопротивление проводника; τ – время работы аппарата под напряжением $U = IR$.

Мощность выделяемой тепловой энергии при постоянном токе I будет равна производной по времени от этой величины

$$P = \frac{dQ}{d\tau} = I^2 R, \quad (4.2)$$

а при переменном токе i –

$$P = k_n k_\delta I_\Delta^2 R = k_n k_\delta \frac{1}{\sqrt{2}} I_m^2 R, \quad (4.3)$$

где $I_\Delta = \frac{1}{\sqrt{2}} I_m$ – действующее значение и I_m – амплитуда переменного тока i ; k_n – коэффициент поверхностного эффекта, учитывающий неравномерное распределение плотности тока по поперечному сечению проводника вследствие вытеснения электронов от центра к поверхности проводника; k_δ – коэффициент близости, учитывающий неравномерное распределение плотности тока по поперечному сечению проводника, обусловленное влиянием друг на друга близко расположенных проводников с токами.

Таким образом, наиболее мощными источниками теплоты в электрических аппаратах являются те его токопроводящие участки, где активное сопротивление максимально. Это резисторы, полупроводники, плавкие элементы предохранителей и электрические контакты.

Активное электрическое сопротивление R зависит от длины l проводника и площади поперечного сечения S :

$$R = \rho \frac{l}{S}, \quad (4.4)$$

¹ Джеймс Прескотт Джоуль (*James Prescott Joule*; 1818 – 1889) — английский физик.

² Эмилий Христианович Ленц (1804 – 1865) — русский физик, профессор Петербургского университета, член Петербургской АН с 1834 г.

где ρ – удельное электрическое сопротивление материала проводника. Оно зависит от температуры t . В интервале температур от 0 до 150...300 °С данная зависимость линейная, т.е.

$$\frac{\rho - \rho_0}{\rho_0} = \alpha t \text{ или } \rho = \rho_0(1 + \alpha t), \quad (4.5)$$

где ρ_0 – удельное электрическое сопротивление материала проводника при температуре 0 °С; α – температурный коэффициент электрического сопротивления материала.

Из соотношений (4.3), (4.4) и (4.5) следует, что мощность источника теплоты зависит и от температуры токопроводящих частей электрического аппарата. Различают три способа распространения этой теплоты в пространстве: теплопроводностью, конвекцией и тепловым (инфракрасным) излучением.

Теплота распространяется вследствие процессов релаксации – самопроизвольного выравнивания температур во всех точках пространства. Для твёрдых тел механизм распространения теплоты связан с выравниванием интенсивности колебаний узлов кристаллической решётки. При этом центры колебания узлов остаются неподвижными, а распространяется лишь кинетическая (колебательная) энергия узлов решётки. Такой механизм распространения теплоты называется *теплопроводностью*. Для случая, когда имеется однородное твердое тело, микроскопические частицы которого неподвижны друг относительно друга, физические параметры тела постоянны, а внутренние источники теплоты распределены равномерно, закон теплопроводности будет описываться следующим уравнением Био¹ – Фурье²:

$$q = \frac{\Delta Q}{S \Delta \tau} = -\lambda \cdot \text{grad}t, \quad (4.6)$$

т.е. количество теплоты ΔQ , переносимое за время Δt через площадку S , пропорционально градиенту температур. Здесь $q = \frac{\Delta Q}{S \Delta \tau}$ – тепловой поток, представляющий собой векторную величину, направленную в сторону распространения теплоты и измеряемую в $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$. Напомним, что градиент температур $\text{grad}t$ – это вектор, направленный в сторону возрастания температуры.

Коэффициент пропорциональности λ имеет размерность $\frac{\text{Вт}}{\text{мК}}$ и называется *коэффициентом теплопроводности*. Знак « – » говорит о том, что

¹ Жан-Батист Био (*Jean-Baptiste Biot*; 1774 – 1862) – учёный, физик, геодезист и астроном.

² Жан Батист Жозеф Фурье (*Jean Baptiste Joseph Fourier*; 1768-1830) – французский математик и физик.

перенос теплоты направлен в сторону уменьшения температуры – от более горячего участка к более холодному.

Конвекция – это распространение теплоты при перемещении объёмов жидкостей (или газов) в занимаемом этими жидкостями (или газами) пространстве. Конвекция подразделяется на естественную и вынужденную. Естественная конвекция осуществляется в результате выталкивания под действием архимедовой силы более горячих слоёв жидкости (газа) в более холодные верхние области, поскольку горячие слои легче холодных.

Искусственная конвекция происходит под действием внешних сил, вызывающих перемещение этих слоёв. Например, под действием вентиляторов. Интенсивность искусственной конвекции существенно выше естественной.

При перемешивании слоёв жидкости (или газа) неизбежно соприкосновение частиц с разной температурой, что повлечёт теплообмен в виде теплопроводности. Это существенно усложняет аналитическое описание процесса конвекции. Такое описание будет представлять систему дифференциальных уравнений, куда войдут уравнения теплопроводности с учётом массообмена, уравнение движения жидкости (уравнение Навье – Стокса), уравнение неразрывности жидкости (газа), а также начальные и граничные условия.

Поскольку решение такой системы дифференциальных уравнений вызывает серьёзные проблемы, в инженерной практике чаще используется упрощенное уравнение теплоотдачи Ньютона

$$P = k_T S_{охл} (t - t_0), \quad (4.7)$$

которое означает, что мощность P отводимой от нагретого тела теплоты пропорциональна произведению его поверхности (поверхности охлаждения $S_{охл}$) на разность температур между поверхностью тела и окружающей средой $(t - t_0)$.

Здесь коэффициент пропорциональности k_T имеет размерность $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{К}}$ и называется *коэффициентом теплоотдачи*. На величину данного коэффициента влияет температура, характер конвекции (для вынужденной конвекции он на порядок выше, чем для естественной) и другие внешние факторы. Коэффициент теплоотдачи определяется экспериментально для каждого конкретного случая с использованием методов, разработанных на основе теории подобия.

Тепловое излучение – это механизм распространения теплоты посредством электромагнитного излучения. Нагретое тело испускает электромагнитные волны инфракрасного диапазона, а холодное тело (приёмник) под действием этого излучения нагревается. Окружающая среда между этими телами в механизме такого теплообмена участия не принимает и может служить лишь помехой ему.

Согласно закону Стефана¹ – Больцмана² плотность энергии излучения q (тепловой поток) пропорциональна четвёртой степени абсолютной температуры T :

$$q = \sigma T^4, \quad (4.7a)$$

где коэффициент пропорциональности $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{К}^4}$ – постоянная Стефана – Больцмана.

Если в электрическом аппарате одно тело находится внутри другого тела и имеет температуру T_1 , коэффициент излучения ε_1 и площадь поверхности охлаждения $S_{охл1}$, второе тело – соответственно T_2 , ε_2 и $S_{охл2}$, причём $T_1 > T_2$, $S_{охл1} < S_{охл2}$, то удельный результирующий световой поток теплового излучения [10, с. 12]

$$q_{12} = \frac{5,67 \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right]}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{S_{охл1}}{S_{охл2}} \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)}. \quad (4.8)$$

Вопросы для самоконтроля и задания

1. Чему равна мощность выделяемой тепловой энергии при постоянном токе?
2. Чему равна мощность выделяемой тепловой энергии при переменном токе?
3. Как на электрическое сопротивление влияет температура проводника?
4. Каков механизм теплообмена посредством теплопроводности?
5. Сформулируйте закон теплопроводности Био – Фурье.
6. Каков механизм теплообмена посредством конвекции?
7. Сформулируйте закон теплоотдачи Ньютона.
8. При какой из конвекций (естественной или вынужденной) происходит более интенсивный теплообмен?
9. Каков механизм теплообмена посредством теплового излучения?
10. Сформулируйте закон Стефана – Больцмана для теплового излучения.

4.2. Теплопроводность плоской стенки без внутреннего источника теплоты

Рассмотрим часть электрического аппарата без внутренних источников теплоты. И пусть эта часть состоит из однородного материала в виде прямоугольного параллелепипеда с боковыми плоскостями, одна из которых

¹ Стефан (Stefan) Йозеф (1835 – 1893) – австрийский физик.

² Людвиг Больцман (*Ludwig Eduard Boltzmann*, 1844 – 1906) – австрийский физик-теоретик, член-корреспондент Петербургской академии наук (1899) и ряда других.

с координатой $x=0$ имеет во всех своих точках температуру t_1 , а ей противоположная с координатой $x=\delta$ – температуру t_2 (рис. 4.1).

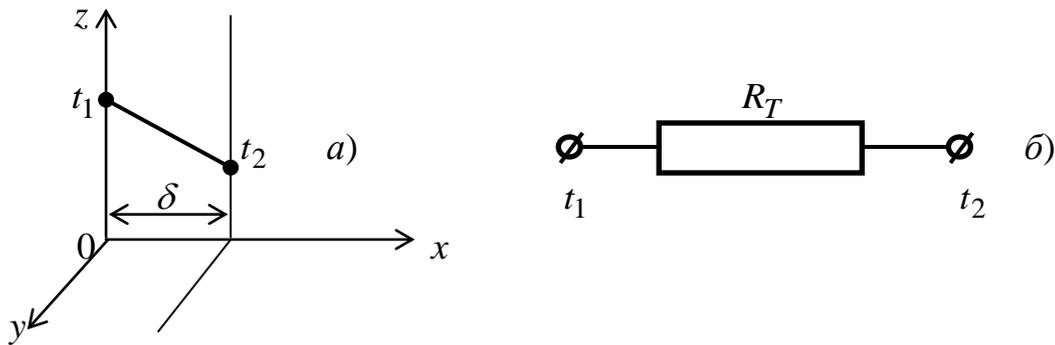


Рис. 4.1 Диаграмма теплопроводности плоской стенки (а) и её электрическая схема замещения (б)

Пусть имеет место установившийся тепловой поток. Тогда согласно закону Био – Фурье (4.6) с учётом, что для нашего частного случая $gradt = \frac{dt}{dx}$, получим уравнение

$$\frac{dt}{dx} = -\frac{q}{\lambda} = \text{const.}$$

При граничных условиях $t(0) = t_1$ и $t(\delta) = t_2$ после его интегрирования получим

$$t_2 - t_1 = -\frac{q}{\lambda} \delta.$$

Из последнего равенства следует, что тепловой поток

$$q = -\frac{t_2 - t_1}{\delta / \lambda}. \quad (4.9)$$

Величина, обратная теплопроводности, по смыслу является удельным сопротивлением распространению теплоты.

Мощность теплового потока в этом случае есть скалярное произведение

$$P = [q, n] S \cos \alpha,$$

где n – нормаль к площади поверхности, через которую проходит тепловой поток; α – угол между этой нормалью и направлением теплового потока q . Если нас интересует мощность теплового потока в заданном направлении, то в качестве S принимается площадь поперечного сечения данного потока. В этом случае $\alpha = 0$ и $P = qS$.

Умножим левую и правую части уравнения (4.9) на площадь S и, используя равенство $P = qS$, получим

$$P = -\frac{t_2 - t_1}{R_T} S, \quad (4.10)$$

где R_T – тепловое сопротивление плоской стенки, которым обозначена следующая величина:

$$R_T = \frac{1}{\lambda} \frac{\delta}{S}, \quad (4.11)$$

где $\frac{1}{\lambda}$ – удельное тепловое сопротивление материала.

Из сравнения формул (4.4) и (4.11) видна полная аналогия между активным электрическим сопротивлением R и введённым здесь тепловым сопротивлением R_T . При этом выражение (4.10) имеет полную аналогию с законом Ома, где роль тока выполняет мощность теплового потока, роль разности потенциалов – разность температур, а роль электрического сопротивления – тепловое сопротивление. На этом основании рассмотренному процессу теплопроводности можно сопоставить электрическую схему замещения (рис. 4.1,б).

Если плоская стенка состоит из нескольких слоёв с нулевыми зазорами между ними, то схема замещения будет представлена следующей цепочкой сопротивлений:

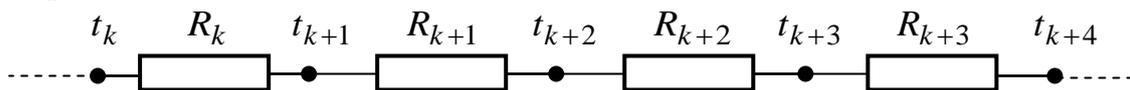


Рис. 4.2. Электрическая схема замещения для многослойной стенки

Для такой схемы общее сопротивление R_T будет равно сумме всех последовательно включённых сопротивлений, а распределение температуры в данном случае будет иметь вид ломаной линии.

Если плоская стенка разделяет две среды с разными температурами t_{01} , t_{02} и соответственно разными коэффициентами теплоотдачи k_{T1} , k_{T2} , то температура будет изменяться по некоторой кривой (рис. 4.3, а).

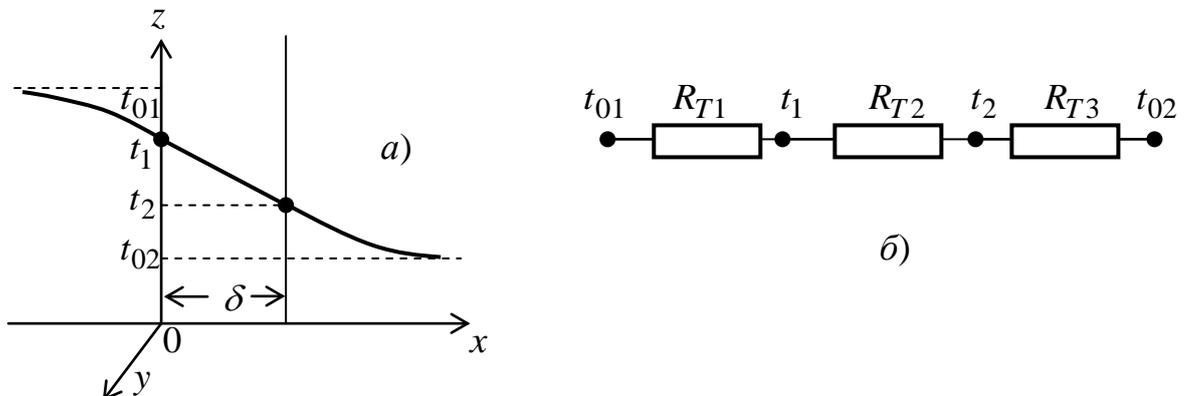


Рис. 4.3. Диаграмма теплопроводности плоской стенки, разделяющей две среды (а) и её электрическая схема замещения (б)

Здесь $R_{T2} = \frac{1}{\lambda} \frac{\delta}{S}$ – тепловое сопротивление плоской стенки, R_{T1} и R_{T3} –

тепловые сопротивления теплоотдачи конвекцией, которые находятся из уравнения Ньютона (4.7):

$$R_{T1} = \frac{1}{k_{T1} S_{охл}} \quad \text{и} \quad R_{T3} = \frac{1}{k_{T2} S_{охл}}.$$

Вопросы для самоконтроля и задания

1. Как выглядит запись закона теплопроводности Био – Фурье при применении его к прямоугольному параллелепипеду из однородного материала, одна из стенок которого нагревается, а противоположная ей стенка охлаждается внешней средой?
2. Решите это уравнение при условии, что нагреваемая стенка имеет во всех своих точках температуру t_1 , а ей противоположная с координатой $x = \delta$ – температуру t_2 .
3. Используя это решение, получите зависимость мощности теплового потока от разности температур между нагреваемой и охлаждаемой стенками параллелепипеда.
4. Что представляет собой сопротивление тепловому потоку в рассматриваемом параллелепипеде? От каких величин оно зависит?
5. Установите аналогию между формулой (4.10) и законом Ома.
6. Постройте электрическую схему замещения данному тепловому процессу, используя эту аналогию.
7. Постройте электрическую схему замещения для теплового потока, проходящего через плоскую стенку из нескольких слоёв без зазоров между ними.
8. Напишите формулы для тепловых сопротивлений конвективной теплоотдачи и построьте схему замещения теплообмена двух сред через разделяющую их плоскую стенку.

4.3. Теплопроводность плоской стенки с внутренним источником теплоты

Довольно часто электрические аппараты можно описывать в виде модели, имеющей плоские стенки с источниками теплоты, у которых по бокам имеются плоские стенки толщиной Δ_1 и Δ_2 без источников теплоты, а их наружные плоскости обеспечивают теплоотдачу в окружающую среду при температуре t_0 в обе стороны (рис. 4.4,а).

Здесь рассмотрена плоская стенка с равномерным распределением источников теплоты по плоскости, имеющей координату $x = x_m$. Во всех точках этой плоскости температура одинаковая, равная максимальной температуре t_m . Материал этой стенки имеет теплопроводность λ . Теплота от плоского источника распространяется по данному материалу в обе

стороны так, что с её левого боку устанавливается температура t_1 , а с правого – t_3 .

Далее теплота распространяется по плоским стенкам без источников теплоты. Теплопроводность левой стенки (толщиной Δ_1) равна λ_1 , правой – λ_2 . Наружные поверхности боковых стенок имеют температуры t_2 и t_4 соответственно. Через эти поверхности охлаждения происходит теплоотдача в окружающую среду с температурой t_0 – процесс конвективного теплообмена (см. рис. 4.4,а).

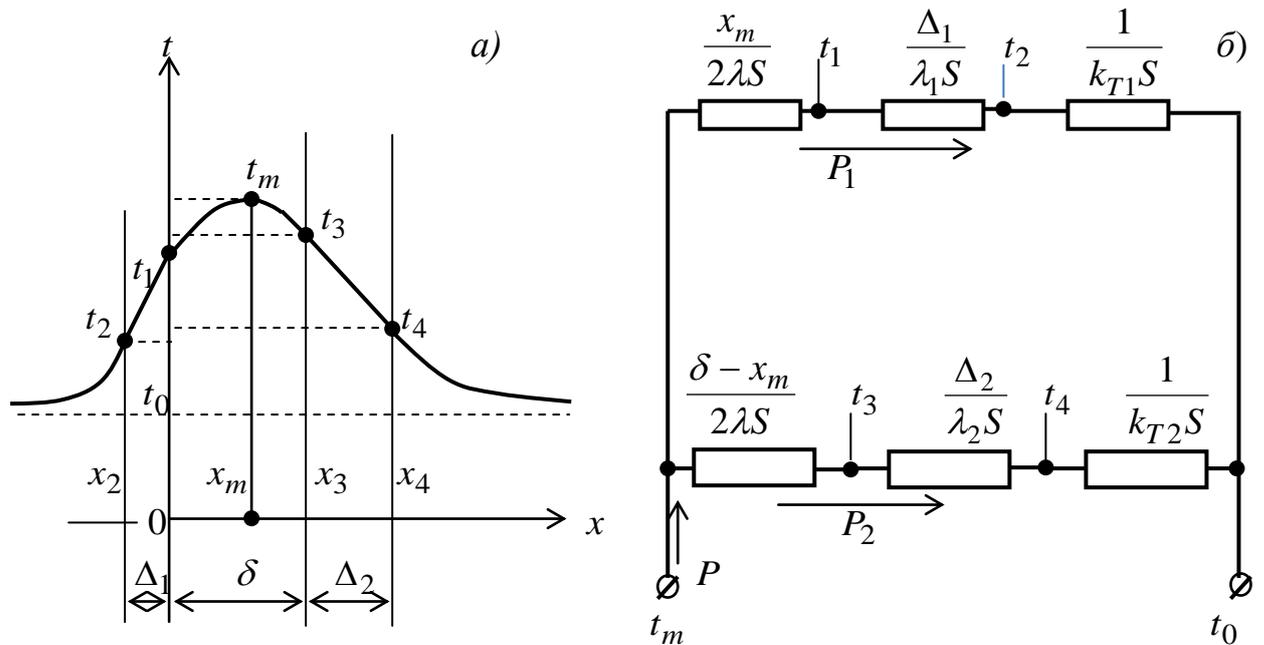


Рис. 4.4. Плоская стенка с внутренними источниками теплоты: а) – распределение температуры; б) – электрическая схема замещения

Для данного процесса теплообмена будет уже разветвлённая схема замещения (рис. 4.4,б). Здесь левая охлаждающая поверхность имеет коэффициент теплоотдачи k_{T1} , а правая – k_{T2} .

С использованием электрической схемы замещения можно производить тепловой расчёт процесса теплообмена с применением правил Кирхгофа и закона Ома. Например, для данной схемы (см. рис. 4.4,б) получается следующая система уравнений.

$$\text{1-е правило Кирхгофа: } P = P_1 + P_2. \quad (4.12)$$

$$\text{2-е правило Кирхгофа: } \frac{x_m}{2\lambda S} P_1 + \frac{\Delta_1}{\lambda_1 S} P_1 + \frac{P_1}{k_{T1} S} = t_m - t_0; \quad (4.13)$$

$$\frac{\delta - x_m}{2\lambda S} P_2 + \frac{\Delta_2}{\lambda_2 S} P_2 + \frac{P_2}{k_{T2} S} = t_m - t_0. \quad (4.14)$$

$$\text{Закон Ома для шести участков цепи: } \frac{x_m}{2\lambda S} P_1 = t_m - t_1; \quad \frac{\Delta_1}{\lambda_1 S} P_1 = t_1 - t_2; \quad (4.15)$$

$$\frac{P_1}{k_{T1}S} = t_2 - t_0; \quad \frac{\delta - x_m}{2\lambda S} P_2 = t_m - t_3; \quad \frac{\Delta_2}{\lambda_2 S} P_2 = t_3 - t_4; \quad \frac{P_2}{k_{T2}S} = t_4 - t_0. \quad (4.16)$$

Используя эту систему из девяти уравнений, можно определить девять неизвестных при расчёте теплообмена для данного примера электрического аппарата.

Для цилиндрических стенок с источниками теплоты схема замещения будет такой же, как и для случая плоских стенок, а тепловое сопротивление, тепловые потоки и радиус наиболее горячего слоя определяются из справочной литературы.

Катушки электромагнитных аппаратов без магнитопроводов при расчётах можно рассматривать как стенки с равномерно распределёнными источниками теплоты. Если катушка плоская, то следует использовать метод расчёта плоской стенки, а если цилиндрическая, то метод расчёта цилиндрической стенки.

Удельную мощность источника теплоты в катушке рассчитывают по формуле

$$P = \rho(Iw)^2 / (k_3 S_{ок}^2), \quad (4.17)$$

где Iw – МДС катушки, А; I – ток, А; w – число витков катушки; ρ – удельное сопротивление провода, Ом·м; k_3 – коэффициент заполнения обмотки; $S_{ок}$ – площадь обмоточного окна, м².

Вопросы для самоконтроля

1. Чему равно сопротивление участка $[-\infty, x_2]$ (см. рис. 4.4,а)?
2. Чему равно сопротивление участка $[x_2, 0]$ (см. рис. 4.4,а)?
3. Чему равно сопротивление участка $[0, x_m]$ (см. рис. 4.4,а)?
4. Чему равно сопротивление участка $[x_m, x_3]$ (см. рис. 4.4,а)?
5. Чему равно сопротивление участка $[x_3, x_4]$ (см. рис. 4.4,а)?
6. Чему равно сопротивление участка $[x_4, \infty]$ (см. рис. 4.4,а)?
7. Какие возможности для теплового расчёта обеспечивает электрическая схема замещения?
8. Сколько неизвестных позволяет определить система уравнений (4.12 – 4.16)?

4.4. Режимы нагрева электрических аппаратов

Электрические аппараты при эксплуатации могут находиться в следующих режимах работы:

– *продолжительный режим*, когда электрический аппарат достигает установившейся температуры нагрева, при которой работает под нагрузкой сколь угодно долго;

– *кратковременный режим*, когда температура частей электрического аппарата достигает установившейся температуры нагрева, а в период отсутствия нагрузки достигает температуры окружающей среды;

– *прерывисто-продолжительный режим*, когда электрический аппарат достигает установившейся температуры нагрева, при которой работает под нагрузкой ограниченное техническими условиями время;

– *повторно-кратковременный режим*, когда электрический аппарат не достигает установившейся температуры нагрева за время работы под нагрузкой, а за время паузы не достигает температуры окружающей среды;

– *режим короткого замыкания*, когда электрический аппарат находится непродолжительное время под нагрузкой при токе короткого замыкания.

При включении электрического аппарата под нагрузку по его токопроводящим частям потечёт возрастающий по величине ток I , нагревая аппарат. Процесс этого нагрева для бесконечно малого интервала времени $d\tau$ можно описать следующим уравнением баланса энергии:

$$I^2 R d\tau = c\gamma V dt + k_T S_{\text{охл}}(t - t_c) d\tau, \quad (4.18)$$

где $I^2 R d\tau = dQ$ – джоулева теплота, Дж, выделенная в результате протекания тока I , А, за время $d\tau$, с; R – суммарное активное сопротивление токоведущих частей, Ом; $c\gamma V dt$ – часть джоулевой теплоты, которая ушла на нагрев на dt градусов материала, занимающего объём V , м³, плотностью γ , $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$, и массовой теплоёмкостью c , $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$;

$k_T S_{\text{охл}}(t - t_c) d\tau$ – часть теплоты, которая была отдана за интервал времени $d\tau$ в окружающую среду с температурой t_c , °С, с учётом всех трёх видов теплообмена; k_T – коэффициент такой теплоотдачи, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$; t – температура

охлаждающей поверхности аппарата, °С; $S_{\text{охл}}$ – площадь охлаждающей поверхности аппарата, м².

Вопросы для самоконтроля и задания

1. Какой режим работы электрического аппарата называется продолжительным?
2. Какой режим работы электрического аппарата называется кратковременным?
3. Какой режим работы электрического аппарата называется прерывисто-продолжительным?
4. Какой режим работы электрического аппарата называется повторно-кратковременным?
5. Что представляет собой режим короткого замыкания?
6. Составьте уравнение теплового баланса для продолжительного режима работы электрического аппарата.

4.5. Продолжительный режим работы электрического аппарата

В уравнении (4.18) перейдём к новой переменной $\theta = t - t_c$ – температура перегрева (превышение температуры охлаждающей

поверхности аппарата над температурой окружающей среды). Тогда $d\theta = dt$ и

$$\frac{d\theta}{d\tau} + \frac{k_T S_{охл}}{c\gamma\mathcal{V}} \theta = \frac{I^2 R}{c\gamma\mathcal{V}}$$

или

$$\frac{d\theta}{d\tau} + \alpha\theta = \beta, \quad (4.19)$$

где $\alpha = \frac{k_T S_{охл}}{c\gamma\mathcal{V}}$, $\beta = \frac{I^2 R}{c\gamma\mathcal{V}}$ – не меняющиеся во времени величины.

Найдём решение линейного неоднородного уравнения первого порядка (4.19) методом вариации произвольной постоянной. Сначала найдём общее

решение однородного линейного уравнения: $\frac{d\bar{\theta}}{d\tau} + \alpha\bar{\theta} = 0 \Rightarrow \int \frac{d\bar{\theta}}{\bar{\theta}} = \int \alpha d\tau$

или $\ln \bar{\theta} - \ln c_0 = \ln \frac{\bar{\theta}}{c_0} = -\alpha\tau$, откуда

$$\bar{\theta} = c_0 e^{-\alpha\tau}. \quad (4.19a)$$

Это общее решение однородного линейного уравнения. Частное решение уравнения (4.19) ищем в виде $\hat{\theta} = \varphi(\tau)e^{-\alpha\tau}$. Подставим это решение в (4.19). Получим

$$\frac{d\hat{\theta}}{d\tau} + \alpha\hat{\theta} = \frac{d\varphi}{d\tau} e^{-\alpha\tau} + \varphi e^{-\alpha\tau} (-\alpha) + \alpha\varphi e^{-\alpha\tau} = \frac{d\varphi}{d\tau} e^{-\alpha\tau} = \beta.$$

Откуда

$$d\varphi = \beta e^{\alpha\tau} d\tau \Rightarrow \varphi = \frac{\beta}{\alpha} e^{\alpha\tau}.$$

Следовательно, частным решением уравнения (4.19) будет

$$\hat{\theta} = \varphi(\tau)e^{-\alpha\tau} = \frac{\beta}{\alpha}.$$

А искомое общее решение уравнения (4.19)

$$\theta = \bar{\theta} + \hat{\theta} = c_0 e^{-\alpha\tau} + \frac{\beta}{\alpha}.$$

Заменим в этом уравнении величины α и β их исходными значениями. Получим

$$\theta = c_0 e^{-\frac{k_T S_{\text{охл}}}{c\gamma W} \tau} + \frac{I^2 R}{k_T S_{\text{охл}}}. \quad (4.20)$$

Из (4.20) следует, что при $\tau \rightarrow \infty$ температура перегрева стремится к некоторой постоянной величине:

$$\theta_y = \frac{I^2 R}{k_T S_{\text{охл}}}. \quad (4.21)$$

Её называют установившейся температурой перегрева. Величина, обратная $\alpha = \frac{k_T S_{\text{охл}}}{c\gamma W}$, имеет размерность времени, с, и называется *постоянной времени нагрева*:

$$T = \frac{1}{\alpha} = \frac{c\gamma W}{k_T S_{\text{охл}}}. \quad (4.22)$$

С использованием введённых выше новых параметров по формулам (4.21) и (4.22) уравнение (4.20) приведём к виду

$$\theta = \theta_y + c_0 e^{-\frac{\tau}{T}}. \quad (4.23)$$

Значение произвольной постоянной c_0 найдём из условия, что начальная температура перегрева электрического аппарата известна, т.е. $\theta(0) = \theta_n$. Тогда из (4.23) имеем $\theta_n = \theta_y + c_0 e^{-\frac{0}{T}} = \theta_y + c_0$, т.е. $\theta - \theta_y = c_0$. Найденное значение c_0 подставим в (4.23). Зависимость температуры перегрева в продолжительном режиме примет окончательный вид

$$\theta = \theta_y \left(1 - e^{-\frac{\tau}{T}} \right) + \theta_n e^{-\frac{\tau}{T}}. \quad (4.24)$$

Если теперь вернуться к исходным переменным (от перегрева к температуре), то из (4.24) можно получить

$$t(\tau) = t_y \left(1 - e^{-\frac{\tau}{T}} \right) + t_n e^{-\frac{\tau}{T}}. \quad (4.25)$$

На рис. 4.5,а представлен график кривой (4.24). Он описывает процесс нагрева.

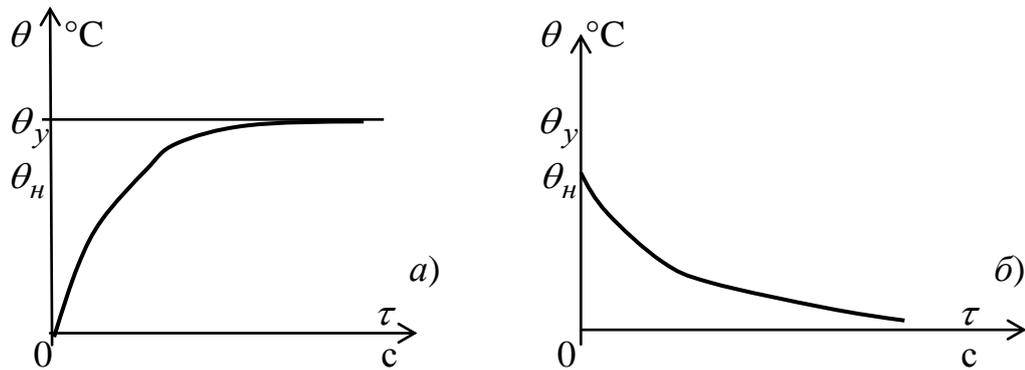


Рис.4.5. Графики температуры перегрева $\theta(\tau) = t - t_c$ при продолжительном режиме:
 а) – нагрев и б) – остывание

Процесс охлаждения проводника согласно (4.18) будет описываться дифференциальным уравнением

$$c\gamma V dt + k_T S_{\text{охл}}(t - t_c) d\tau = 0,$$

что соответствует уравнению $\frac{d\theta}{d\tau} + \alpha\theta = 0$, общее решение которого (4.19а),

то есть $\theta(\tau) = c_0 e^{-\alpha\tau} = c_0 e^{-\tau/T}$. Используя начальное условие $\theta(0) = \theta_n$, получим, что $\theta_n = c_0$. Поэтому при остывании проводника температура перегрева будет изменяться по закону

$$\theta(\tau) = \theta_n e^{-\tau/T},$$

график которого представлен на рис. 4.5,б.

Вопросы для самоконтроля и задания

1. Что такое установившаяся температура перегрева? Как она вычисляется?
2. Что такое постоянная времени нагрева? Как она вычисляется?
3. Напишите окончательную формулу изменения температуры перегрева по времени в продолжительном режиме работы электрического аппарата.
4. Напишите дифференциальное уравнение энергетического баланса для процесса охлаждения электрического аппарата, когда он отключён от источника питания.
5. Каким законом описывается этот процесс охлаждения?

4.6. Повторно-кратковременный режим работы электрического аппарата

Рассмотрим нагрев электрического аппарата при повторно-кратковременном режиме работы. Пусть он нагружается джоулевой теплотой от источника электрической энергии постоянной мощности в течение времени τ_p (рабочий период) и охлаждается за время τ_{II} (время паузы в работе). Допустим, что эти периоды постоянно повторяются (рис. 4.6,а).

При одних и тех же мощностях для продолжительного и повторно-кратковременного режима ($P_{ПР} = P_{ПК}$) максимальная температура аппарата при повторно-кратковременном режиме $t_{ПК} = \theta_{ПК} + t_n$ меньше, чем при продолжительном – $t_y = \theta_y + t_n < t_{ПК}$ (рис. 4.6,б).

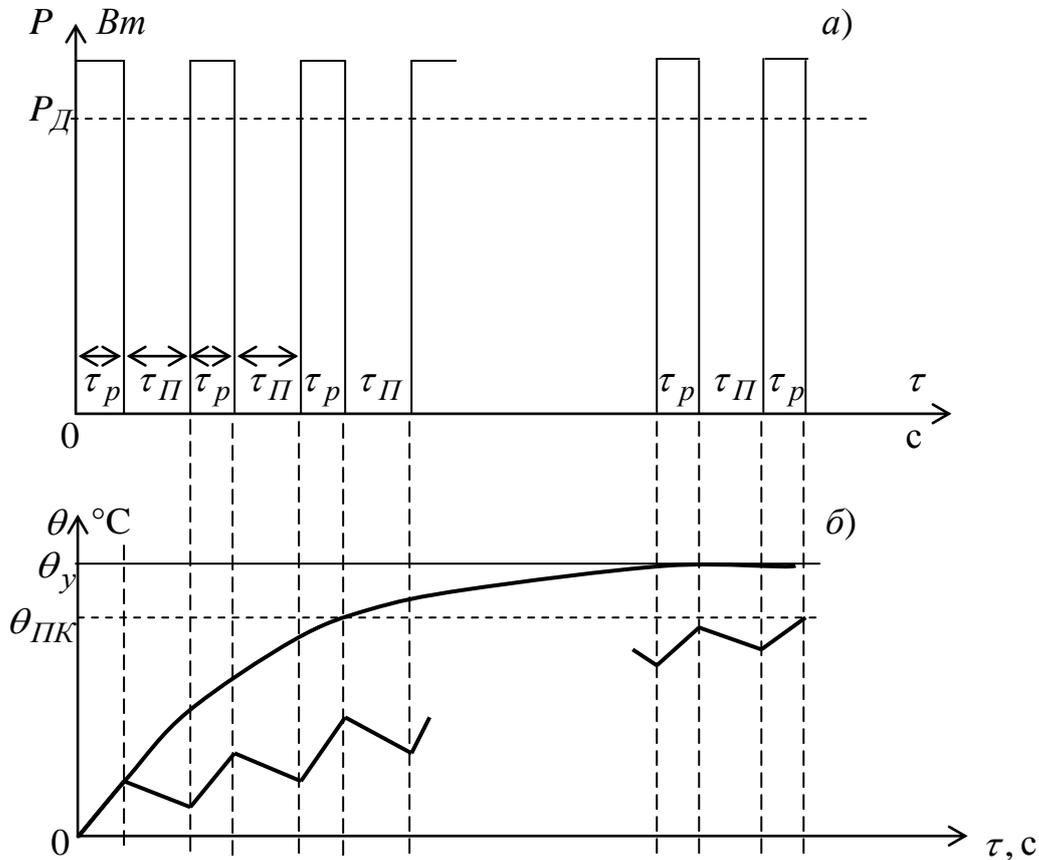


Рис. 4.6. График нагрузки (а); кривые нагрева (б)

Для установившегося и квазистационарного режима справедлива формула Ньютона

$$P = k_T S_{охл} \theta.$$

Поэтому при равенстве коэффициентов теплоотдачи и охлаждающих поверхностей для продолжительного и повторно-кратковременного режимов с учётом (4.24) при условии, что начальный перегрев $\theta(0) = \theta_n = 0$, будет иметь место соотношение

$$k_p = \frac{P_{ПР}}{P_{ПК}} = \frac{\theta_{ПР}}{\theta_{ПК}} = \frac{1 - e^{-\frac{\tau_p + \tau_{П}}{T}}}{1 - e^{-\frac{\tau_p}{T}}}. \quad (4.26)$$

Здесь отношение k_p называется коэффициентом перегрузки по мощности. Он показывает, во сколько раз можно увеличить мощность источников теплоты электрического аппарата, если перейти от продолжительного режима его работы к повторно-кратковременному.

Поскольку при прочих равных условиях мощность источников теплоты пропорциональна квадрату тока ($P \sim I^2 R$), то можно ввести коэффициент перегрузки по току $k_I = \sqrt{k_p}$.

Если $\frac{\tau_p + \tau_{II}}{T} \leq 0,1$, то тем более $\tau_p < 0,1T$. Воспользовавшись

формулой разложения экспоненты в степенной ряд ($e^x = 1 + x + \frac{x^2}{2!} + \frac{x^3}{3!} + \dots$), ограничившись только первыми двумя членами разложения, числитель и знаменатель дроби в правой части уравнения (4.26) можно заменить на

$$1 - e^{-\frac{\tau_p + \tau_{II}}{T}} \approx 1 - \left(1 - \frac{\tau_p + \tau_{II}}{T}\right) = \frac{\tau_p + \tau_{II}}{T},$$

$$1 - e^{-\frac{\tau_p}{T}} \approx 1 - \left(1 - \frac{\tau_p}{T}\right) = \frac{\tau_p}{T}.$$

Тогда выражение коэффициента перегрузки по мощности примет более простой вид

$$k_p = \frac{\tau_p + \tau_{II}}{\tau_p}. \quad (4.27)$$

Погрешность этой формулы не превысит 5 %.

Часто в расчётах используется понятие «относительная продолжительность включения». Эту величину определяют как

$$ПВ\% = \frac{\tau_p}{\tau_p + \tau_{II}} \cdot 100\%. \quad (4.27a)$$

Тогда выражение коэффициента перегрузки по мощности можно представить через $ПВ\%$ как

$$k_p = \frac{100}{ПВ\%}. \quad (4.27б)$$

Вопросы для самоконтроля и задания

1. Что такое коэффициент перегрузки по мощности?
2. Что такое коэффициент перегрузки по току?
3. Вычислите коэффициент перегрузки по току в повторно-кратковременном режиме работы электрического аппарата с интервалом включения 300 с и паузой 500 с.
4. Напишите формулу Ньютона для установившегося и квазистационарного режима.
5. Что такое относительная продолжительность включения?
6. Как связаны между собой относительная продолжительность включения и коэффициент перегрузки по мощности?

4.7. Термическая стойкость электрических аппаратов

Способность электрического аппарата выдерживать (без повреждений) термическое воздействие протекающих по токоведущим частям токов заданной длительности называется его термической стойкостью.

При коротком замыкании токи в токоведущих частях аппарата могут возрастать в десятки раз, а мощность – в сотни раз. При этом в сотни раз возрастёт и теплота, выделяемая в этих частях в единицу времени.

Однако для большинства электрических аппаратов время короткого замыкания сравнительно не велико

$$\tau_{кз} = 0,1\tau_0,$$

где τ_0 – время нагрева при адиабатном процессе.

Поэтому в режиме короткого замыкания температура короткого замыкания может в несколько раз превышать температуру, допустимую для продолжительного режима.

Однако для токоведущих частей из разных материалов существуют и разные ограничения допустимым температурам их нагрева:

- в неизолированных токовых частях из меди эта температура не должна превышать 300 °С;
- в неизолированных алюминиевых токовых частях – 200 °С;
- в токоведущих частях (не из алюминия), которые соприкасаются с органической изоляцией или маслом, – 250 °С.

Превышение этих температур может вызвать рекристаллизацию материала.

При коротком замыкании режим нагрева будет адиабатным, так как материал за столь короткое время успеет отдать в окружающую среду лишь незначительное количество теплоты, которым в расчётах можно пренебречь. Тогда из уравнения энергетического баланса (4.18) получим

$$I^2 R d\tau = c m dt \quad \text{или} \quad J^2 \rho = c \gamma \frac{dt}{d\tau}, \quad (4.28)$$

где $J = \frac{I}{S}$ – плотность тока, $\frac{А}{м^2}$; ρ – удельное сопротивление материала,

Ом·м; $R = \rho \frac{l}{S}$ – электрическое сопротивление токоведущей части, Ом;

$\gamma = \frac{m}{V}$ – плотность материала, $\frac{кг}{м^3}$; c – теплоёмкость материала, $\frac{Дж}{кг \cdot К}$; t –

температура токоведущей части, °С; l, S, m, V – длина, м; площадь поперечного сечения, м²; масса (кг) и объём, м³, токоведущей части аппарата соответственно.

Удельное сопротивление материала изменяется в зависимости от его температуры $\rho(t) = \rho_0(1 + \alpha t)$, где α – термический коэффициент сопротивления, $\frac{1}{К}$; ρ_0 – удельное электрическое сопротивление при температуре 0 °С.

При высоких температурах, которые имеют место при коротком замыкании, следует учитывать также зависимость теплоёмкости от температуры

$$c(t) = c_0(1 + \beta t),$$

где c_0 – теплоёмкость материала при температуре $t=0$ °С ; β – термический коэффициент теплоёмкости, $\frac{1}{K}$.

Тогда из (4.28) получим уравнение

$$\frac{dt}{d\tau} = \frac{J^2 \rho_0 (1 + \alpha t)}{\gamma c_0 (1 + \beta t)}. \quad (4.29)$$

Полагая $J = \text{const}$, проинтегрируем уравнение (4.29) при начальном условии $t(0) = 0$ °С. Получим

$$J^2 \tau = \int_0^t \frac{\gamma c_0 (1 + \beta t)}{\rho_0 (1 + \alpha t)} dt = \frac{\gamma c_0}{\rho_0} \left[\int_0^t \frac{dt}{1 + \alpha t} + \frac{\beta}{\alpha} \int_0^t \frac{\alpha t}{1 + \alpha t} \right] = \frac{\gamma c_0}{\rho_0} \left[\left(\frac{1}{\alpha} - \frac{\beta}{\alpha^2} \right) \ln(1 + \alpha t) + \frac{\beta t}{\alpha} \right].$$

Откуда

$$J^2 \tau = \frac{\gamma c_0}{\rho_0} \left[\left(\frac{\alpha - \beta}{\alpha^2} \right) \ln(1 + \alpha t) + \frac{\beta t}{\alpha} \right]. \quad (4.30)$$

Уравнение (4.30) задаёт трансцендентную функцию температуры от переменной $J^2 \tau$ в неявном виде. График этой функции $t = t(J^2 \tau)$ представлен на рис. 4.7.

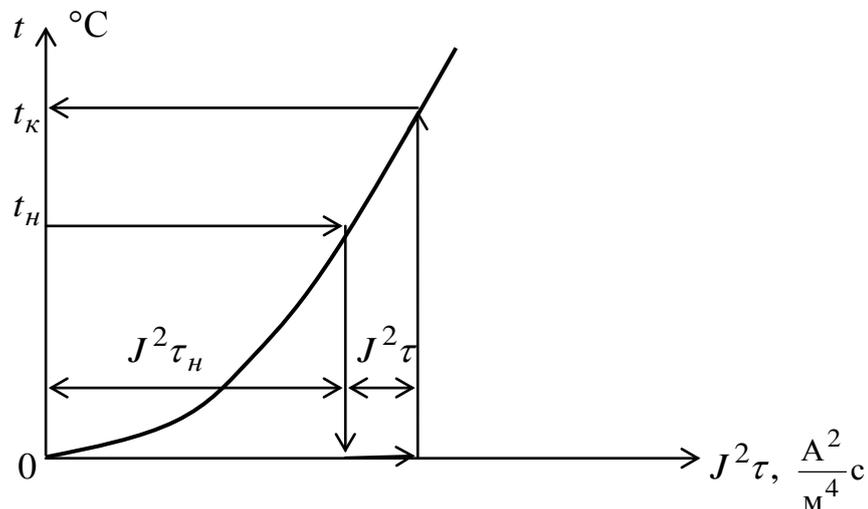


Рис.4.7. Кривая адиабатного нагрева

Величина $J^2 \tau$, измеряемая в единицах $\frac{A^2}{M^4} c$, называется *квадратичным импульсом плотности тока*. По справочнику для каждого материала можно определить $c_0, \alpha, \beta, \gamma, \rho_0$ и кривые $t = t(J^2 \tau)$, которые называют *кривыми адиабатного нагрева*. По ним можно найти конечную

температуру t_k в конце времени короткого замыкания τ_k , если начальная температура была $t_n = 0$ °С. Если же $t_n \neq 0$ °С, то для данной температуры по кривой адиабатного нагрева находят значение $J^2\tau_n$ (рис. 4.7). Затем по оси абсцисс от значения $J^2\tau_n$ откладывают отрезок $J^2\tau$ и по кривой адиабатного нагрева находят конечную температуру t_k .

Уравнение (4.30) было получено при условии $J = \text{const}$, что имеет место при коротком замыкании только в системах большой мощности. Если же короткое замыкание происходит вблизи генератора, то плотность тока будет изменяться во времени, и это изменение должно быть учтено.

В общем случае такой ток состоит из апериодической и периодических составляющих, причём амплитуда периодической составляющей меняется в течение времени короткого замыкания. Наибольшее значение этой амплитуды и наибольшее значение апериодической составляющей зависят от момента короткого замыкания. На практике часто пользуются понятием *фиктивное время короткого замыкания* τ_ϕ , которое определяется выражением

$$\int_0^{\tau} J^2 d\tau = J_y^2 \tau_\phi, \quad (4.31)$$

где J_y – установившееся значение плотности тока короткого замыкания.

Таким образом, фиктивное время короткого замыкания τ_ϕ – это время, в течение которого установившийся ток короткого замыкания J_y оказывает такое же термическое воздействие на проводник, как и действительный ток J короткого замыкания за действительное время τ короткого замыкания.

Фиктивное время короткого замыкания может быть как больше, так и меньше действительного. Его можно определить из справочной литературы по кривым

$$\tau_\phi = f(\beta''),$$

где $\beta'' = \frac{i_{II}}{\sqrt{2}I_D}$; i_{II} – пиковое значение тока короткого замыкания; I_D – действующее значение установившегося тока короткого замыкания. Для случаев, когда $J \neq \text{const}$, квадратичный импульс плотности тока можно заменить величиной $J_y^2\tau_\phi$ и по кривым адиабатного режима нагрева (см. рис.4.7) найти конечную температуру короткого замыкания.

Термическая стойкость электрического аппарата характеризуется *током термической стойкости*. Если знать допустимую температуру кратковременного нагрева проводника, его материал и время короткого замыкания, можно по кривым адиабатного нагрева определить квадратичный импульс плотности тока. Из последнего можно определить плотность тока термической стойкости электрического аппарата. Далее могут быть решены две задачи: по известному поперечному сечению проводника определить ток

термической стойкости или, наоборот, по заданному току термической стойкости подобрать проводник с нужным поперечным сечением.

Расчётные времена термической стойкости стандартизованы следующими значениями: 1, 5 и 10 с, а токи термической стойкости индексируются этими значениями, например, I_5^2 – это пятисекундный ток термической стойкости. При этом $I_1^2 = 5I_5^2 = 10I_{10}^2$.

При расчётной продолжительности короткого замыкания до одной секунды процесс нагрева можно считать адиабатным, но при продолжительностях больших одной секунды необходимо учитывать и теплоотдачу.

Вопросы для самоконтроля и задания

1. Что называется термической стойкостью электрических аппаратов?
2. Напишите дифференциальное уравнение энергетического баланса для режима короткого замыкания.
3. Что называется квадратичным импульсом плотности тока?
4. Каков характер зависимости температуры электрического аппарата при работе в режиме короткого замыкания от квадратичного импульса плотности тока?
5. Что представляют собой кривые адиабатного нагрева?
6. Где используется уравнение $J^2 \tau = \frac{\gamma c_0}{\rho_0} \left[\left(\frac{\alpha - \beta}{\alpha^2} \right) \ln(1 + \alpha t) + \frac{\beta t}{\alpha} \right]$?
7. Как по кривым адиабатного нагрева можно определить конечную температуру электрического аппарата t_k в конце времени короткого замыкания, если начальная температура этого аппарата не равнялась нулю ($t_n \neq 0$ °C)?
8. Что такое фиктивное время короткого замыкания?
9. Каким параметром характеризуется термическая стойкость электрического аппарата?
10. Как соотносятся между собой секундней I_1 , пятисекундней I_5 и десятисекундней I_{10} – токи термической стойкости?

4.8. Эквивалентные длительные токи. Перемежающийся режим работы электрических аппаратов

Рассмотренные выше режимы (подразд. 4.4) не покрывают все случаи работы электрических аппаратов. Часто их работа может осуществляться при разных напряжениях в разные моменты времени, а следовательно, и протекающие по ним токи в разные моменты времени также будут разными.

Рассмотрим отдельно случай, когда во временные интервалы τ_1 по электрическому аппарату протекает ток I_1 , а в интервалы длительностью τ_2 – ток I_2 . Такая работа аппарата будет соответствовать так называемому *перемежающемуся режиму* (рис. 4.8).

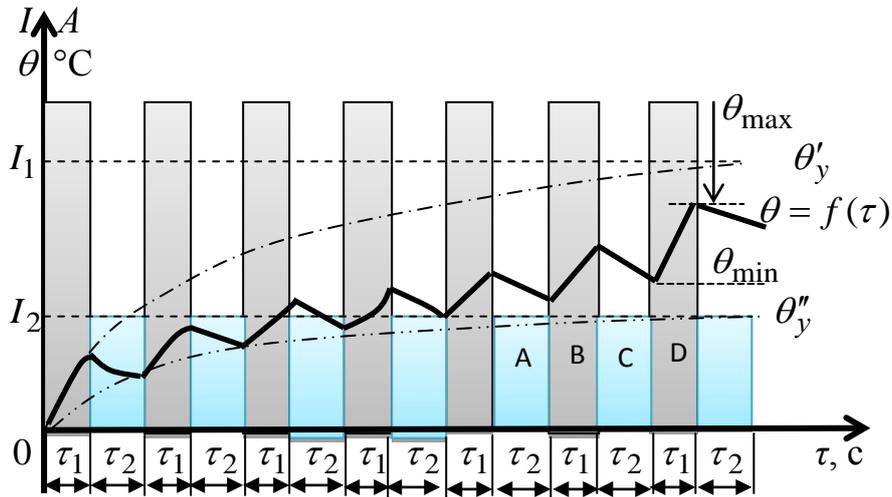


Рис. 4.8. Перемежающийся режим

В установившемся режиме температура перегрева θ будет иметь максимум θ_{\max} и минимум θ_{\min} . Если по аппарату продолжительно пропускать ток I_1 , то установившаяся температура перегрева будет равна θ'_y , а при длительном пропускании тока I_2 установится температура перегрева θ''_y . В таком установившемся режиме температура перегрева будет меняться по некоторой ломаной кривой $\theta = f(\tau)$ (см. рис. 4.8).

На участке D в течение времени τ_1 по проводнику проходит ток I_1 , а начальная температура перегрева здесь $\theta_{\min} = \theta_{\min}$. Тогда согласно (4.24) можно записать

$$\theta_{\max} = \theta'_y \left(1 - e^{-\frac{\tau_1}{T}} \right) + \theta_{\min} e^{-\frac{\tau_1}{T}}. \quad (4.32)$$

Величину θ_{\min} можно вычислить по той же формуле (4.24), применив её к участку C, на котором в течение времени τ_2 по проводнику проходит ток I_2

$$\theta_{\min} = \theta''_y \left(1 - e^{-\frac{\tau_2}{T}} \right) + \theta_{\max} e^{-\frac{\tau_2}{T}}. \quad (4.33)$$

Температура перегрева θ_{\max} не должна превышать допустимую температуру перегрева, поэтому только она представляет практический интерес. Исключая величину θ_{\min} из уравнений (4.32) и (4.33), получим

$$\theta_{\max} = \frac{\theta'_y \left(1 - e^{-\frac{\tau_1}{T}} \right) + \theta''_y \left(e^{-\frac{\tau_1}{T}} - e^{-\frac{\tau_1 + \tau_2}{T}} \right)}{1 - e^{-\frac{\tau_1 + \tau_2}{T}}}. \quad (4.34)$$

Из (4.21) следует, что $\theta'_y = \frac{I_1^2 R}{k_T S_{охл}}$ и $\theta''_y = \frac{I_2^2 R}{k_T S_{охл}}$. Тогда

$$\theta_{\max} = \frac{R}{k_T S_{охл}} \times \frac{I_1^2 \left(1 - e^{-\frac{\tau_1}{T}}\right) + I_2^2 \left(e^{-\frac{\tau_1}{T}} - e^{-\frac{\tau_1 + \tau_2}{T}}\right)}{1 - e^{-\frac{\tau_1 + \tau_2}{T}}}. \quad (4.35)$$

Эквивалентным током $I_{эkv}$ называют такой постоянный ток (или действующее значение переменного тока), при котором в результате нагрева достигается та же температура перегрева, что и при реальном токе, т.е. в нашем случае $\theta_{\max} = \frac{I_{эkv}^2 R}{k_T S_{охл}}$. Для перемежающегося режима эквивалентный ток будет вычисляться по формуле

$$I_{эkv} = \sqrt{\frac{I_1^2 \left(1 - e^{-\frac{\tau_1}{T}}\right) + I_2^2 \left(e^{-\frac{\tau_1}{T}} - e^{-\frac{\tau_1 + \tau_2}{T}}\right)}{1 - e^{-\frac{\tau_1 + \tau_2}{T}}}}. \quad (4.36)$$

Для повторно-кратковременного режима следует принять $I_2 = 0$, $I_1 = I_0$, $\tau_1 = \tau_p$, $\tau_2 = \tau_{II}$. Тогда

$$I_{эkv} = I_0 \sqrt{\frac{\left(1 - e^{-\frac{\tau_p}{T}}\right)}{\left(1 - e^{-\frac{\tau_p + \tau_{II}}{T}}\right)}}. \quad (4.37)$$

С использованием (4.28) можно эквивалентный ток выразить через относительную продолжительность включения, выполнив в (4.37) подстановку $\frac{\tau_p + \tau_{II}}{T} = \frac{\tau_p + \tau_{II}}{\tau_p} \cdot \frac{\tau_p}{T} = \frac{\tau_p \cdot 100}{T \cdot ПВ\%}$. Получим

$$I_{эkvПК} = I_0 \sqrt{\frac{\left(1 - e^{-\frac{\tau_p}{T}}\right)}{\left(1 - e^{-\frac{\tau_p \cdot 100}{T \cdot ПВ\%}}\right)}}. \quad (4.37)$$

Отсюда находится и максимально допустимая температура для повторно-кратковременного режима

$$\theta_{\max PK} = \frac{I_{\text{эквПК}}^2 R}{k_T S_{\text{охл}}} = \frac{I_0^2 R}{k_T S_{\text{охл}}} \left(1 - e^{-\frac{\tau_p}{T}} \right) / \left(1 - e^{-\frac{\tau_p \cdot 100}{T \cdot \text{ПВ}\%}} \right). \quad (4.38)$$

При кратковременном режиме $\tau_p \ll \tau_p + \tau_{II}$, т.е. $\text{ПВ}\% \ll 1$. Поэтому эквивалентный ток в этом случае будет

$$I_{\text{эквК}} = I_0 \sqrt{1 - e^{-\frac{\tau_p}{T}}}, \quad (4.39)$$

а максимально допустимая температура для кратковременного режима

$$\theta_{\max PK} = \frac{I_{\text{эквК}}^2 R}{k_T S_{\text{охл}}} = \frac{I_0^2 R}{k_T S_{\text{охл}}} \left(1 - e^{-\frac{\tau_p}{T}} \right). \quad (4.40)$$

Для длительного режима $I_{\text{экв}} = I_0$ и $\theta_{\max} = \theta_y = \frac{I_0^2 R}{k_T S_{\text{охл}}}$.

Полученные выше зависимости могут быть использованы для элементарных токоведущих частей, таких как провода и шины круглого и прямоугольного сечений. Для более сложных комплектных аппаратов следует учитывать и теплообмен между их частями.

Вопросы для самоконтроля и задания

1. В чём отличие перемежающегося режима от повторно-кратковременного?
2. Что называется эквивалентным током режима работы электрического аппарата?
3. Напишите формулы эквивалентных токов для различных режимов работы электрического аппарата.

4.9. Определение значений поверхностного эффекта и эффекта близости

При протекании переменных токов по токоведущим частям электрического аппарата их электрическое сопротивление будет возрастать за счет поверхностного эффекта и эффекта близости. Поэтому удельное сопротивление материала этих частей требует поправки:

$$\rho_{\text{экв}} = \rho k_{\text{ПЭ}} k_{\text{бл}}, \quad (4.41)$$

где ρ – удельное электрическое сопротивление при постоянном токе, Ом·м; $k_{\text{ПЭ}}$ – коэффициент поверхностного эффекта; $k_{\text{бл}}$ – коэффициент близости.

Поверхностный эффект связан с вытеснением линий тока при его изменении к поверхности проводника. Это приводит к неравномерности распределения плотности тока по сечению проводника. Ближе к его поверхности плотность тока больше. Площадь проводящего ток сечения уменьшается, и, следовательно, электрическое сопротивление увеличивается.

Это увеличение сопротивления учитывает коэффициент поверхностного эффекта $k_{ПЭ}$, который для проводников круглого и прямого сечения можно найти по графикам [7, с.26], представленным на рис. 4.9.

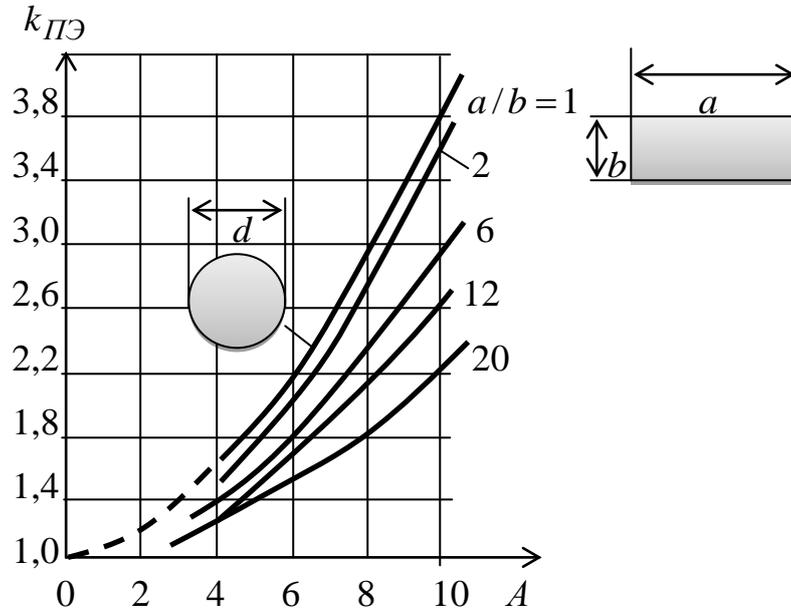


Рис. 4.9. Коэффициент поверхностного эффекта

Здесь представлены кривые зависимости коэффициента $k_{ПЭ}$ поверхностного эффекта от безразмерного параметра

$$A = \sqrt{2\mu_0 f \frac{S}{\rho}}, \quad (4.42)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Гн}}{\text{м}}$ – магнитная постоянная (магнитная проницаемость вакуума); f – частота тока, Гц; S – площадь поперечного сечения проводника, м^2 .

Эффект близости проявляется при изменении токов и взаимодействия их изменяющихся магнитных полей между соседними проводниками. Это также ведёт к неравномерному распределению плотности тока по поперечному сечению проводников. Коэффициент, учитывающий данный эффект, зависит от формы, размеров проводников и от условного коэффициента k_x , измеряемого в $\text{Гн}^{-1/2}$ и вычисляемого по формуле

$$k_x = \sqrt{\frac{f}{R_{100}}}, \quad (4.42)$$

где f – частота тока, Гц; R_{100} – сопротивление проводника длиной 100 м, Ом.

Коэффициент близости $k_{\text{бл}}$ для круглых проводников различных соотношений l/d длины проводника l к диаметру его поперечного сечения d определяется по табл. 4.1 [7, с. 26].

Таблица 4.1

Коэффициент близости для проводников разных размеров

$k_x,$ $\Gamma\text{H}^{-1/2}$	$k_{\text{бл}}$ для различных значений l/d				
	1,03	1,27	1,68	2,0	6,5
100	1,15	1,06	1,03	1,02	1,005
200	1,46	1,38	1,13	1,08	1,010
300	1,70	1,55	1,16	1,09	1,020
400	1,93	-	1,18	1,10	1,030
500	2,10	-	1,20	1,12	1,040
600	2,23	-	1,21	1,13	1,050

Из данной зависимости следует, что коэффициент близости $k_{\text{бл}}$ увеличивается с ростом k_x и уменьшается при увеличении относительной длины проводника l/d .

Вопросы для самоконтроля

1. Возникает ли поверхностный эффект в электрических цепях постоянного тока?
2. В чём причина возникновения поверхностного эффекта?
3. Как определить коэффициент поверхностного эффекта?
4. В чём причина возникновения эффекта близости?
5. Как найти коэффициент поверхностного эффекта?

4.10. Расчёт токоведущих частей в установившемся режиме

На тепловой расчёт проводника влияет и конструкция его крепления в электрическом аппарате. В качестве примера рассмотрим расчёт различных креплений проводника с круглым сечением и прямоугольным сечением токопроводящей шины.

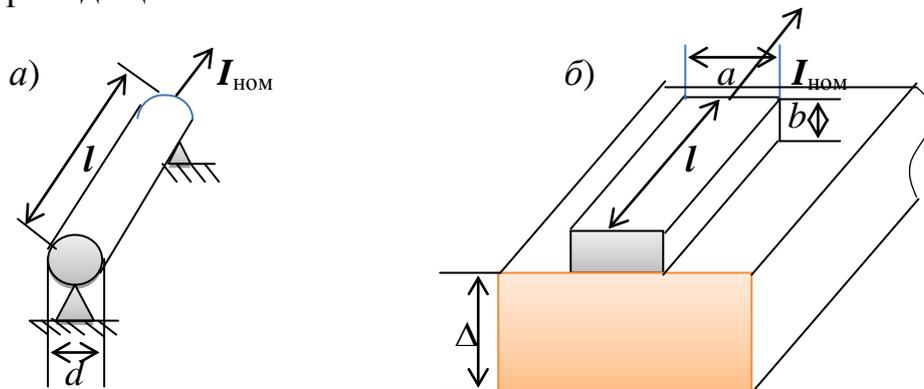


Рис. 4.10. Варианты размещения токоведущих частей

В виду малого сечения соприкосновения крепления с проводником круглого сечения (рис. 4.10,а) отводом теплоты в область крепления можно пренебречь. А в варианте крепления шины отводом теплоты в основание, на котором крепится эта шина, можно пренебречь ввиду толстого слоя теплоизоляции Δ (рис. 4.10,б).

Для установившегося режима при тепловом расчёте токоведущих частей можно использовать ранее полученную формулу (4.21)

$$\theta_y = t - t_c = \frac{I^2 R}{k_T S_{охл}} = \frac{I^2 \rho_{экр} \frac{l}{S} (1 + \alpha t)}{k_T S_{охл}},$$

где I – ток в проводнике, А; k_T – коэффициент теплопередачи, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{К}}$;

$R = \rho_{экр} \frac{l}{S} (1 + \alpha t)$ – электрическое сопротивление проводника, Ом; $\rho_{экр}$ – удельное сопротивление материала проводника, определяемое по формуле (4.41), Ом·м; l – длина проводника, м; $S = \frac{\pi d^2}{4}$ – площадь поперечного сечения проводника, м²; $S_{охл} = \pi d \cdot l$ – площадь боковой поверхности проводника (охлаждающей поверхности), м²; d – диаметр поперечного сечения проводника; α – температурный коэффициент электрического сопротивления, 1/°С; t – температура проводника, °С; t_c – температура окружающей среды, °С.

В правой части последней формулы дробь сокращается на l и получается в итоге

$$t - t_c = \frac{I^2 \rho_{экр} (1 + \alpha t)}{k_T \Pi S} \quad (4.43)$$

или

$$\Pi S = \frac{I^2 \rho_{экр} (1 + \alpha t)}{k_T (t - t_c)}, \quad (4.44)$$

где $\Pi = \pi d$ – периметр поперечного сечения проводника.

Последнее выражение позволяет определять при заданном номинальном токе $I_{ном}$ и допустимой температуре $t_{дон}$ нужный диаметр проволоки. Так как $\Pi S = \pi d \cdot \frac{\pi d^2}{4} = (\frac{\pi^2}{4}) d^3$, из (4.44) следует

$$d = \sqrt[3]{\frac{4 I_{ном}^2 \rho_{экр} (1 + \alpha t_{дон})}{\pi^2 k_T (t_{дон} - t_c)}}. \quad (4.45)$$

В качестве одного из параметров шин прямоугольного сечения используют отношение $m = b/a$. Обычно эта величина находится в пределах от 0,25 до 0,5. Тогда $PI S = 2(a+b)ab = a^3 2(1+m)m$ и из (4.44) будем иметь

$$a = \sqrt[3]{\frac{I_{НОМ}^2 \rho_{ЭКВ} (1 + \alpha t_{\partial ON})}{2m(m+1)k_T (t_{\partial ON} - t_c)}}. \quad (4.46)$$

Если прямоугольная шина расположена на толстой изоляционной основе (рис. 4.10,б), то $PI S = (a+2b)ab = a^3 (1+2m)m$ и из (4.44) будем иметь

$$a = \sqrt[3]{\frac{I_{НОМ}^2 \rho_{ЭКВ} (1 + \alpha t_{\partial ON})}{m(2m+1)k_T (t_{\partial ON} - t_c)}}. \quad (4.46)$$

По формуле (4.44) можно вычислить при заданном проводнике и допустимой для него температуре $t_{\partial ON}$ номинальный ток, приведя его к виду

$$I_{НОМ} = \sqrt{\frac{k_T PI S (t_{\partial ON} - t_c)}{\rho_{ЭКВ} (1 + \alpha t_{\partial ON})}}. \quad (4.47)$$

Если, наоборот, номинальный ток задан, а надо найти температуру нагрева токоведущей части, это можно сделать, используя (4.43)

$$t = t_c + \frac{I_{НОМ}^2 \rho_{ЭКВ} (1 + \alpha t_{\partial ON})}{k_T PI S}. \quad (4.48)$$

Вопросы для самоконтроля

1. Будет ли зависеть нагрев токоведущей части от конструкции её изоляционного крепления?
2. Как определить диаметр проводника с круглым сечением по заданной допустимой температуре его нагрева?
3. Как определить номинальный ток для заданного проводника?
4. Как определить температуру нагрева для выбранного проводника и заданного для него номинального тока?

4.11. Определение коэффициента теплопередачи токоведущих частей

В полученные выше расчётные формулы входит коэффициент теплопередачи k_T . Согласно [7, с. 28] для горизонтальных плоских медных шин $k_T = (6 \div 9) \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{К}}$, для стальных поверхностей $k_T = (10 \div 14) \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{К}}$, для круглых

медных проводников $k_T = (9 \div 13) \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{К}}$.

Коэффициент теплопередачи зависит от температуры проводника и окружающей среды. На основе теории теплового подобия была получена следующая формула этой зависимости:

Коэффициент теплопередачи зависит от температуры проводника и окружающей среды. На основе теории теплового подобия была получена следующая формула этой зависимости:

$$k_T = 1,33 \cdot 4 \sqrt{\frac{t - t_c}{l}} + 2,04 \cdot 10^{-7} t_c^3 \varepsilon \left(2,08 \frac{t + 273}{t_c + 273} \right), \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{К}}.$$

Здесь ε – степень черноты; l – характерный размер, м.

Степень черноты для разных материалов и более частых случаев имеет интервалы значений, приведённые в табл. 4.2.

Таблица 4.2

Степень черноты для наиболее часто используемых материалов в электрических аппаратах

Вид токоведущих частей	ε
Алюминиевые проводники	0,5 – 0,7
Медь окисленная	0,5 – 0,78
Латунь	0,6 – 0,22
Сталь окисленная	0,7 – 0,82
Сталь оцинкованная	0,22 – 0,276
Чугун	0,25 – 0,81

Характерный размер l берётся в направлении распространения наиболее интенсивных тепловых потоков. Для плоских горизонтальных шин за размер l берётся высота шины, а для горизонтальных проводников с круглым поперечным сечением за характерный размер следует брать их диаметр.

В круглых медных и алюминиевых проводниках допустимая плотность тока $j_{дон}$ будет зависеть от площади поперечного сечения S . С увеличением сечения будет иметь место уменьшение допустимой плотности тока, поскольку интенсивность отвода теплоты от внутренних зон проводников будет ослабевать с ростом их толщины.

Вопросы для самоконтроля и задания

1. От чего зависит коэффициент теплопередачи, учитывающий все виды теплообмена?
2. Напишите эту зависимость, полученную на основании теории подобия.
3. Что берётся за характерный размер l для горизонтальных проводников круглого сечения?
4. Что берётся за характерный размер l для плоских горизонтальных шин?

4.12. Расчёт токоведущих частей в режиме короткого замыкания

Ранее для режима короткого замыкания было получено дифференциальное уравнение (4.29), из которого следует

$$\frac{\gamma c_0 (1 + \beta t)}{\rho_{экр} (1 + \alpha t)} dt = J^2 d\tau. \quad (4.49)$$

Полагая $J = J_{кз} = \text{const}$, $t(0) = t_H$ и $t(\tau_K) = t_K$, проинтегрируем уравнение (4.49). Получим

$$J_{кз}^2 \tau_{кз} = \int_{t_H}^{t_K} \frac{\gamma c_0 (1 + \beta t)}{\rho_{экр} (1 + \alpha t)} dt = \frac{\gamma c_0}{\rho_{экр}} \left[\left(\frac{1}{\alpha} - \frac{\beta}{\alpha^2} \right) \ln \left(\frac{1 + \alpha t_K}{1 + \alpha t_H} \right) + \frac{\beta (t_K - t_H)}{\alpha} \right]$$

или

$$J_{кз}^2 \tau_{кз} = \frac{\gamma c_0}{\rho_{экр}} \left[\left(\frac{\alpha - \beta}{\alpha^2} \right) \ln \left(\frac{1 + \alpha t_k}{1 + \alpha t_n} \right) + \frac{\beta(t_k - t_n)}{\alpha} \right], \quad (4.50)$$

где t_n и t_k – начальная и конечная температуры нагрева, °С. Отсюда может быть определена плотность тока термической стойкости $J_{ТС} = J_{кз}$.

$$J_{ТС} = \sqrt{\frac{\gamma c_0}{\rho \cdot k_{ПЭ} k_{бл}} \left(\frac{\alpha - \beta}{\alpha^2} \right) \left[\ln \left(\frac{1 + \alpha t_k}{1 + \alpha t_n} \right) + \frac{\beta(t_k - t_n)}{\alpha} \right]}, \quad (4.51)$$

где $\rho \cdot k_{ПЭ} k_{бл} = \rho_{экр}$ – удельное электрическое сопротивление материала при температуре 0 °С с учётом поверхностного эффекта и эффекта близости, Ом·м; ρ – удельное электрическое сопротивление при температуре 0 °С и при постоянном токе, Ом·м; $k_{ПЭ}$ – коэффициент поверхностного эффекта; $k_{бл}$ – коэффициент близости; c_0 – теплоёмкость материала при температуре $t=0$ °С; γ – плотность материала, $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$; $\tau_{ТС}$ – время термической стойкости, с; α – термический коэффициент сопротивления, $\frac{1}{\text{К}}$; β – термический коэффициент теплоёмкости, $\frac{1}{\text{К}}$.

Допустимая плотность тока для наиболее употребляемых материалов в токоведущих частях в режиме короткого замыкания даётся в справочной литературе. В частности, для меди односекундный ток термической стойкости равен 152 А/мм², пятисекундный – 67 А/мм², десятисекундный – 48 А/мм²; для алюминия односекундный ток термической стойкости равен 89 А/мм², пятисекундный – 40 А/мм², десятисекундный – 28 А/мм²; для латуни односекундный ток термической стойкости равен 73 А/мм², пятисекундный – 38 А/мм², десятисекундный – 27 А/мм² [7, с. 32].

Допустимые температуры нагрева t_k токоведущих частей в режиме тока короткого замыкания приведены в табл. 4.3.

Таблица 4.3

Допустимые температуры нагрева проводников

Проводниковые материалы	Допустимые температуры t_k , 0 °С			
	Медь	Латунь	Алюминий	Сталь
Неизолированные токоведущие части	300	300	200	400
Изолированные токоведущие части с изоляцией:				
класса У	200	200	200	200
класса А	250	250	200	250
класса В и С	300	300	200	400

Если заданы $t_k, \tau_{ТС}$ и ток термической стойкости $I_{ТС} = j_{ТС} \cdot S$, то из (4.51) можно вычислить требуемое сечение проводника

$$S = \sqrt{\frac{I_{TC}^2 \rho \cdot k_{ПЭ} k_{\delta l} \tau_{TC}}{\gamma c_0} \left(\frac{\alpha^2}{\alpha - \beta} \right) / \left[\ln \left(\frac{1 + \alpha t_K}{1 + \alpha t_H} \right) + \frac{\beta(t_K - t_H)}{\alpha} \right]}. \quad (4.52)$$

Если, наоборот, известно сечение S и требуется определить ток термической стойкости, то

$$I_{TC} = \sqrt{\frac{S^2 \gamma c_0}{\rho \cdot k_{ПЭ} k_{\delta l} \tau_{TC}} \left(\frac{\alpha - \beta}{\alpha^2} \right) \left[\ln \left(\frac{1 + \alpha t_K}{1 + \alpha t_H} \right) + \frac{\beta(t_K - t_H)}{\alpha} \right]}. \quad (4.53)$$

Формула для вычисления времени термической стойкости получается из (4.50)

$$\tau_{кз} = \frac{S^2 \gamma c_0}{I_{кз}^2 \rho \cdot k_{ПЭ} k_{\delta l}} \left[\left(\frac{\alpha - \beta}{\alpha^2} \right) \ln \left(\frac{1 + \alpha t_K}{1 + \alpha t_H} \right) + \frac{\beta(t_K - t_H)}{\alpha} \right]. \quad (4.54)$$

Вопросы для самоконтроля

1. Как определяется плотность тока термической стойкости?
2. Каким образом можно определить допустимые температуры нагрева проводников при коротком замыкании?
3. Как определить ток термической стойкости для проводника с заданным сечением?
4. Как вычисляется время термической стойкости?

4.13. Зона стягивания в контактах. Сопротивление стягивания

Наличие **переходного сопротивления** (см. подразд. 2.2) ведёт к появлению в зоне контакта теплоты. Поэтому всякий контакт является источником теплоты. Рассмотрим явления, происходящие вблизи этого источника.

Как уже отмечалось (см. подразд.2.2), существование переходного сопротивления контактов связано с наличием окисных плёнок на поверхности контактов и с тем, что при соприкосновении контактов контактирование происходит не по всей контактной поверхности, а в некоторых отдельных точках (рис. 2.4). Квасиметаллические участки поверхности контакта, через которые, и только через которые течёт ток, принято называть *α -пятнами*.

Рассмотрим протекание тока через *α -пятно* (рис. 4.11).

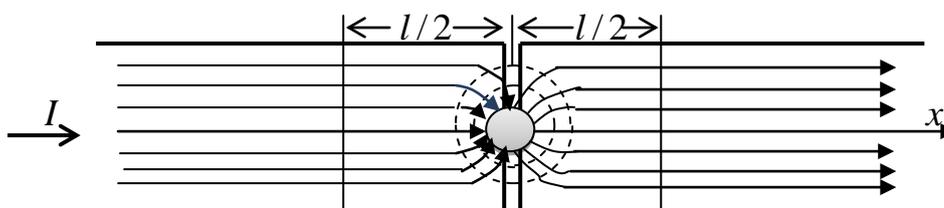


Рис. 4.11. Зона стягивания

На удалённом расстоянии от *α -пятна* линии тока прямолинейны и параллельны друг другу, но при приближении к нему изгибаются. Область, в которой линии тока изогнуты, называется *зоной стягивания*.

Поскольку в зоне стягивания поперечное сечение проводника используется для протекания тока не полностью, то возникает дополнительное активное сопротивление, которое называется *сопротивлением стягивания*.

Согласно формуле Р. Хольма [8] сопротивление стягивания

$$R_c = \frac{\rho}{2a}, \quad (4.55)$$

где ρ – удельное электрическое сопротивление материала контакт-детали, Ом·м; a – радиус α -пятна, м.

При упругих деформациях радиус α -пятна находят по формуле

$$a = m \cdot \sqrt[3]{\left(\frac{rP}{E}\right)}, \quad (4.56)$$

где r – радиус кривизны поверхности контакт-детали, м; P – усилие сжатия тел, Н; E – модуль упругости материала контакт-детали, Па; m – безразмерный коэффициент, который вычисляется по формуле

$$m = \begin{cases} 1,1 & \text{при соприкосновении шарообразной и плоской поверхности;} \\ 0,9 & \text{при соприкосновении двух шарообразных поверхностей.} \end{cases}$$

Если деформации пластические (не упругие), радиус α -пятна находят по формуле

$$a = \sqrt{\frac{P}{\pi \cdot \sigma_{см}}}, \quad (4.57)$$

где $\sigma_{см}$ – сопротивление смятию материала контакт-детали, Па.

Также на практике для определения сопротивления контактов используют эмпирическую формулу

$$R_k = \frac{K_0}{(0,102P)^n}, \quad (4.58)$$

где $n = 0,3 \dots 0,8$ – показатель степени; K_0 – коэффициент, зависящий от свойств материала, мкОм·Нⁿ. Его значения для материалов, наиболее часто используемых в контактах, приведены в табл. 4.4.

Таблица 4.4

Коэффициент K_0 для различных материалов

Материал	Медь	Серебро	Латунь	Алюминий
$K_0, \text{ мкОм} \cdot \text{Н}^n$	400	60	670	4000

Вопросы для самоконтроля и задания

1. Что представляют собой α -пятна в контактных соединениях?
2. Что называется зоной стягивания в контактных соединениях?
3. Напишите формулу Хольма для сопротивления стягивания.
4. Как вычисляется радиус α -пятна при упругих и пластических деформациях?

4.14. Влияние переходного сопротивления контактов на нагрев проводников

Для цилиндрических проводников с контактными пятнами, расположенными на оси проводника, зона стягивания практически ограничена плоскостями, отстоящими на три четверти диаметра проводника от плоскости контакта. Охлаждающая поверхность в зоне стягивания невелика, и можно считать, что в этой зоне теплота распространяется лишь за счёт теплопроводности материала симметрично по обе стороны от плоскости контакта с интенсивностью $p_1 = p_2 = \frac{1}{2} I^2 R_k$. А на достаточном удалении от зоны стягивания, наоборот, можно будет пренебречь теплообменом за счёт теплопроводности и рассматривать только процесс теплоотдачи теплоты с поверхности проводника, по которой распределено статическое температурное поле.

Дифференциальное уравнение, описывающее превышение температуры (перегрев) поверхности проводника, в данном случае будет иметь вид

$$j^2 \rho = -\lambda \frac{d^2 \theta}{dx^2} + k_T \frac{\Pi}{S} \theta, \quad (4.59)$$

где ρ – удельное электрическое сопротивление материала контакт-детали, Ом·м; j – плотность тока, А/м²; λ – коэффициент теплопроводности материала контакт-детали, $\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$; $\theta = t - t_c$ – превышение температуры t поверхности проводника над температурой окружающей среды t_c , °С; $S = \frac{\pi d^2}{4}$ – площадь поперечного сечения проводника, м²; x – координата, по которой отсчитывается расстояние от контактной плоскости, м; $\Pi = \pi d$ – периметр поперечного сечения проводника, м; d – диаметр поперечного сечения проводника, м; k_T – коэффициент такой теплоотдачи, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{К}}$.

Это линейное неоднородное уравнение второго порядка с постоянными коэффициентами, которое преобразуется к виду

$$\frac{d^2 \theta}{dx^2} - p^2 \theta + \frac{j^2 \rho}{\lambda} = 0, \quad (4.60)$$

где $p = \sqrt{\frac{k_T \Pi}{\lambda S}}$ – коэффициент, который можно принять постоянным, м⁻¹.

При $x \rightarrow \infty$ величина $\frac{d^2 \theta}{dx^2} \rightarrow 0$, и из (4.60) следует, что перегрев поверхности проводника на достаточно большом расстоянии от контактной плоскости будет равен

$$\theta_n = \frac{j^2 \rho}{p^2 \lambda} = \frac{j^2 \rho \cdot S}{k_T \Pi}. \quad (4.61)$$

Интегрируя уравнение (4.60), получим распределение перегрева по длине проводника

$$\theta(x) = e^{-px} \frac{I^2 R_k}{2p\lambda S} + \theta_n. \quad (4.62)$$

Из (4.62) следует, что влиянием переходного сопротивления контактов R_k можно пренебречь лишь на достаточном удалении от контактной площадки. Это удаление должно соответствовать $x \geq 5/p$. При этом $e^{-5} < 0,007 \approx 0$, и $\theta(5/x) \approx \theta_n$.

В зоне контакта ($x=0$) перегрев будет наибольшим и его значение согласно (4.62) составит

$$\theta_{\max} = \theta(0) = \frac{I^2 R_k}{2p\lambda S} + \theta_n. \quad (4.63)$$

Вопросы для самоконтроля и задания

1. В каких границах от контактной плоскости заключена зона стягивания для проводника круглого сечения с α -пятном, расположенным на оси проводника?
2. Напишите дифференциальное уравнение теплового баланса и определите, какие величины в нём не зависят от координаты x .
3. Напишите функцию распределения температуры перегрева по длине проводника.
4. Чему равен перегрев поверхности проводника на достаточно большом расстоянии от контактной плоскости?
5. Чему равна температура контактной плоскости?

4.15. Температура площадки касания электрических контактов

В 1900 году Кольрауш¹ доказал теорему о том, что в симметричной области стягивания все эквипотенциальные поверхности являются изотермическими.

Рассмотрим трубку тока в зоне стягивания и некоторый элемент этой трубки между двумя эквипотенциальными поверхностями. Пусть одна из этих поверхностей имеет потенциал φ . Тепловой поток, проходящий через элементарный участок ds такой поверхности, есть вся мощность, выделяемая в трубке в пределах от контактной площадки с потенциалом φ_a до эквипотенциали φ . Тогда согласно закону Джоуля – Ленца эта мощность

$$dp = (\varphi - \varphi_a) j ds, \quad (4.64)$$

где j – плотность тока, А/м². Она определится из закона Ома:

¹ Фридрих Вильгельм Георг Кольрауш (*Friedrich Wilhelm Georg Kohlrausch* 1840 – 1910) — немецкий физик и электротехник.

$$j = \frac{1}{\rho} \frac{d\varphi}{dn}, \quad (4.65)$$

где ρ – удельное электрическое сопротивление материала контакт-детали, Ом·м; $\frac{d\varphi}{dn} = \text{grad}\varphi$ – градиент потенциала φ , В/м; n – вектор нормали к поверхности ds , м.

По закону Био – Фурье для той же площадки тепловой поток dp будет пропорционален градиенту температурного поля t :

$$dp = -\lambda \frac{dt}{dn} ds, \quad (4.66)$$

где λ – коэффициент теплопроводности материала контакт-детали, $\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$; $\frac{dt}{dn} = \text{grad}t$ – градиент температуры t , К/м.

Тогда из (4.64), (4.65) и (4.66) получается уравнение

$$dp = (\varphi - \varphi_a) \frac{1}{\rho} \frac{d\varphi}{dn} ds = -\lambda \frac{dt}{dn} ds$$

или

$$\frac{1}{\rho} (\varphi - \varphi_a) d\varphi = -\lambda dt.$$

Потенциал контактной площадки можно выбрать произвольно. При $\varphi = 0$ получим уравнение Хольма – Кольрауша

$$\frac{1}{\rho} \varphi d\varphi = -\lambda dt. \quad (4.67)$$

Если U_k – падение напряжения на контакте, то потенциалы на эквипотенциалах, принимаемых за границу зоны стягивания, будут по обе стороны отличаться от потенциала φ_a на величину $\frac{1}{2}U_k$. С учётом сказанного проинтегрируем (4.67) при условиях $t(0) = t_a; t\left(\frac{1}{2}U_k\right) = t_k$

$$\int_0^{\frac{1}{2}U_k} \varphi d\varphi = \int_{t_k}^{t_a} \lambda \rho dt \Rightarrow \frac{U_k^2}{8} = \int_{t_k}^{t_a} \lambda \rho dt.$$

Величины λ и ρ зависят от температуры. Чтобы проинтегрировать правую часть последнего уравнения, воспользуемся теоремой о среднем. Получим

$$\frac{U_k^2}{8} = (\lambda \rho)_{cp} (t_a - t_k). \quad (4.68)$$

Из (4.68) следует, что превышение температуры контактной плоскости над температурой границы зоны стягивания $\theta_{ак} = t_a - t_k$ пропорционально квадрату падения напряжения на контакте.

Для каждого материала существуют свои падения напряжения на контактах, при которых температура контактного α -пятна достигает значений рекристаллизации t_p (размягчения), плавления $t_{пл}$ и кипения $t_{кип}$. В табл. 4.5 приведены падения напряжений для разных материалов, которым соответствуют эти температуры.

Таблица 4.5

Падения напряжений на контактах

Металл	$U_p, В$	$U_{пл}, В$	$U_{кип}, В$
Сu – медь	0,12	0,43	0,79
Ag – серебро	0,09	0,37	0,67
Pt – платина	0,25	0,65	1,50
W – вольфрам	0,40	1,10	2,10
Au – золото	0,08	0,43	0,90

На температурном интервале, где упругие свойства материала изменяются не сильно, переходное сопротивление контакта R_k этого материала при заданной силе сжатия зависит только от температуры. Приближённо такая зависимость задаётся следующей формулой:

$$R_k(t_a) \approx R_k(t_k) \left[1 + \frac{2}{3} \alpha \theta_{ак} \right].$$

Эта функция монотонно возрастает.

При достижении напряжения размягчения U_p упругие свойства металла в зоне α -пятна резко изменяются (металл размягчается), и под действием силы нажатия площадь α -пятна увеличивается, резко снижая сопротивление R_k (рис.4.12).

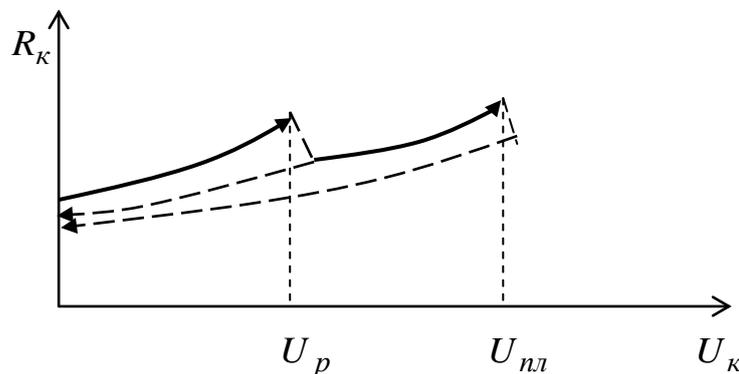


Рис. 4.12. Зависимость переходного сопротивления от падения напряжения на контакте

Напряжение размягчения учитывается для нормирования контактов малой мощности. Для них допустимое падение напряжения не должно превосходить $(0,5 \dots 0,8)U_p$.

Вопросы для самоконтроля и задания

1. Сформулируйте теорему Кольрауша.
2. Из каких законов выводится уравнение Хольма – Кольрауша?
3. Как связаны между собой превышение температуры контактной плоскости над температурой границы зоны стягивания и падение напряжения на контакте?
4. Почему при достижении напряжения рекристаллизации на контакте его переходное сопротивление уменьшается?

4.16. Сваривание электрических контактов

Использование контактов в режиме, когда падение напряжения на контакте U_k не превосходит напряжения рекристаллизации U_p , возможно лишь в слаботочных аппаратах. В аппаратах, рассчитанных на режим короткого замыкания, где токи могут возрастать в десятки раз, условие $U_k < U_p$ уже выполняться не будет. При коротком замыкании даже условие $U_k < U_{нл}$ может не выполняться. Ведь чтобы эти условия выполнить, необходимо значительно увеличить силу сжатия контактов, что значительно ускорит их износ. Поэтому в таких аппаратах не исключается расплавление α -пятна и явление сваривания контактов.

Минимальным током плавления $I_{нл\infty}$ называют ток, при котором в установившемся режиме нагрева происходит оплавление контактной площадки. Из (4.55) и (4.68) следует, что

$$U_{нл} = I_{нл\infty} R_c = I_{нл} \frac{\rho}{2a_{нл}} = \sqrt{8(\lambda\rho)_{cp}(t_a - t_k)},$$

откуда

$$I_{нл} = a_{нл} \sqrt{32 \frac{\lambda}{\rho} (t_a - t_k)}, \quad (4.69)$$

где удельное электрическое сопротивление ρ и теплоёмкость λ соответствуют температуре плавления материала, а радиус контактной площадки с учётом размягчения α -пятна обычно считается равным $a_{нл} = 1,5a$, где a – радиус α -пятна при температуре ниже температуры рекристаллизации.

При больших значениях тока радиус a можно определять по формуле (4.57). Тогда из (4.69) следует, что ток сваривания

$$I_{св} = \hat{K} \sqrt{p}, \quad (4.70)$$

где p – сила сжатия контактов, Н; \hat{K} – эмпирический коэффициент, для медных и латунных контактов он лежит в интервале $(1000 \div 2000) \frac{A}{\sqrt{H}}$.

Однако в действительности сваривание может происходить при значительно меньших токах по сравнению с токами, вычисленными по (4.70). Это связано с появлением площадок *схватывания* и явлением *холодной*

сварки. В связи с этим привод контактов рассчитывается так, чтобы при схватывании он обеспечил разрыв контактов.

Кроме всего прочего на проблему сваривания контактов влияют электродинамические силы – контурные силы и силы Двайта. Контурные силы p_k – это силы взаимодействия элементов контура тока контактной системы. А силы Двайта p_D обусловлены явлением стягивания линий тока к α -пятну, и они всегда отталкивают один контакт от другого. На контакт радиуса r , мм, действует сила Двайта

$$p_D = \frac{\mu_0 i^2}{4\pi} \ln \frac{r}{a}, \quad (4.71)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\Gamma_H}{M}$ – магнитная проницаемость вакуума; i – ток, А, протекающий через контакт; a – радиус α -пятна, мм.

Таким образом, на контакты, имеющие неодинаковые радиусы, будет действовать согласно (4.71) неодинаковая сила Двайта.

Обычно контакты конструируются с тем расчётом, чтобы контурные силы компенсировали силы Двайта.

Радикальным решением проблемы сваривания контактов является переход на жидкометаллические контакты. Некоторые из них приведены ниже.

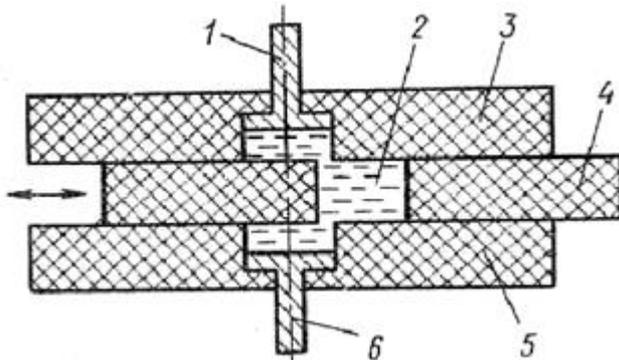


Рис.4.13. Коммутационное устройство режущего типа

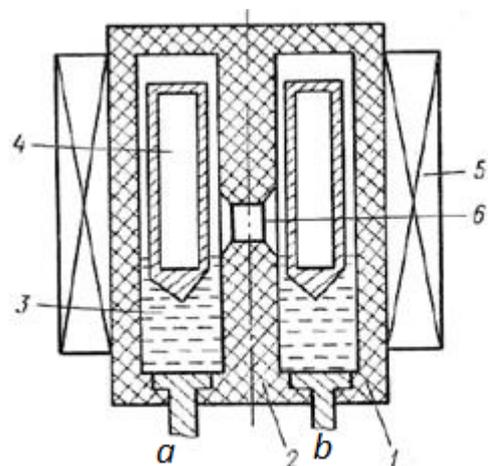


Рис. 4.14. Электромагнитный ртутный контактор

Коммутационное устройство режущего типа (рис. 4.13) работает следующим образом. Электроды 1 и 6 размещены в углублениях изоляционных пластин 3 и 5, между которыми расположена изоляционная пластина 4 с отверстием 2. Жидкий металл заполняет углубления в пластинах 3 и 5 и отверстие 2. Когда отверстие 2 расположено между углублениями пластин 3 и 5, цепь электродов замкнута. При перемещении пластины 4 в крайнее правое (левое) положение отверстие с заполняющим его металлом

находится между изоляционными пластинами, электрическая цепь разрывается.

Электромагнитный ртутный контактор (рис. 4.13) имеет корпус 1, разделенный изоляционной перегородкой 2. В него заливается жидкий металл 3, на поверхности которого плавают полые ферромагнитные плунжеры 4. При подаче напряжения на катушку 5 плунжеры 4 погружаются в жидкий металл, который поднимается вверх и через отверстие 6 замыкает электрическую цепь между точками *a* и *b*. Разрыв цепи происходит при снятии напряжения с катушки.

Жидкометаллический коммутационный аппарат «пережимного» типа (рис. 4.15) состоит из: 1 и 4 – электроды; 2 – эластичная оболочка; 3 – подвижный пережимной элемент; 5 – упор; 6 – жидкий металл. Коммутация осуществляется путем пережима оболочки с жидким металлом.

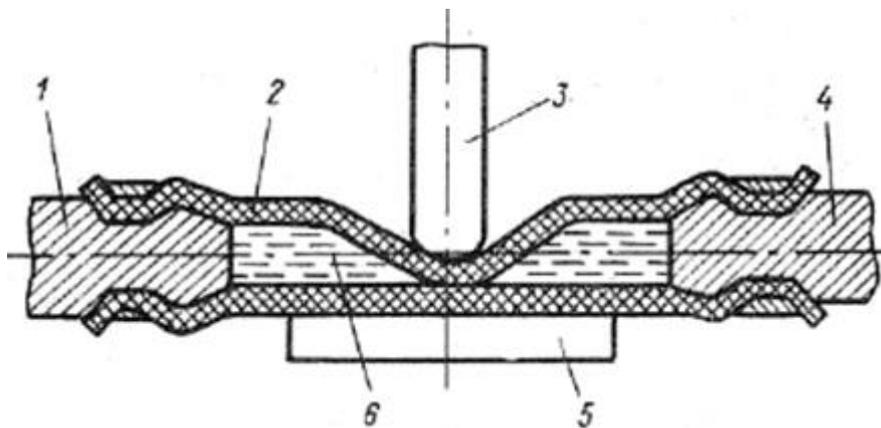


Рис. 4.15. Жидкометаллический коммутационный аппарат «пережимного» типа

Применение жидких металлов (галлий, его сплав с индием и оловом) в качестве контактных элементов позволяет устранить их электрический износ и не требует создания обычной для контактных аппаратов силы нажатия. Однако работа по созданию подвижного жидкометаллического элемента с меньшей химической активностью при контакте с металлом и воздухом ещё достаточно актуальна. Также существует серьёзная проблема борьбы с электродинамическим отбросом при токах короткого замыкания в жидкометаллических контактах.

Вопросы для самоконтроля и задания

1. Как вычислить минимальный ток плавления и ток сваривания?
2. Какие силы следует учитывать при конструировании контактов?
3. Напишите формулу для определения силы Двайта.
4. В чём главное преимущество жидкометаллических контактов?
5. Как работает электромагнитный ртутный контактор?
6. Объясните принцип работы коммутатора режущего типа.
7. Объясните принцип работы коммутатора пережимного типа.

Глава 5. ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЕ УСИЛИЯ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АППАРАТАХ

При коротком замыкании токи в электрических цепях возрастают в десятки раз, а силы магнитного взаимодействия между отдельными токоведущими частями электрических аппаратов – в сотни раз. Эти силы стремятся деформировать (или даже разорвать) как проводники, так и изоляторы, на которых они крепятся.

При конструировании электрических аппаратов следует учитывать эти силы. Их называют электродинамическими усилиями (ЭДУ) [3, с. 4]. Свойство электрического аппарата противостоять ЭДУ, возникающим при коротком замыкании, называется его *электродинамической стойкостью*. Ниже рассмотрим основные методы расчёта ЭДУ и их практическое применение для различных конструкций электрических аппаратов.

5.1. Методы расчёта электродинамических усилий

Данные методы разработаны на основе следующих законов классической физики: закон Ампера, закон Био¹ – Савара² – Лапласа³ и уравнения баланса магнитной энергии.

Сила, с которой магнитное поле с вектором магнитной индукции \vec{B} действует на проводник с током I , называется силой Ампера. Она определяется из *закона Ампера*, который в дифференциальной форме имеет следующий вид [9, с. 141]:

$$d\vec{F}_A = I[d\vec{l}, \vec{B}]. \quad (5.1)$$

Здесь $[d\vec{l}, \vec{B}]$ – векторное произведение вектора $d\vec{l}$ элементарного участка проводника, указывающего направление тока I , на вектор \vec{B} . Направление вектора $d\vec{F}_A$ определяется по правилу векторного произведения. Если проводник имеет длину l , а магнитное поле однородно, то модуль силы Ампера с учётом (4.9) равен

¹ Жан-Батист Био (*Jean-Baptiste Biot*; 1774 – 1862) — знаменитый французский учёный, физик, геодезист и астроном, член Парижской академии наук (1803).

² Феликс Савар (*Félix Savart*, 1791 – 1841) — был врачом в Страсбурге (1816), затем преподаватель физики в одном частном учебном заведении в Париже. Хотя он и не был великим ученым, но благодаря своим исследованиям оставил в науке своё имя.

³ Пьер-Симон Лаплас (*Pierre-Simon de Laplace*; 1749 – 1827) — выдающийся французский математик, физик и астроном. Лаплас состоял членом шести Академий наук и Королевских обществ, в том числе Петербургской академии (1802). Его имя внесено в список величайших учёных Франции, помещённый на первом этаже Эйфелевой башни.

$$F_A = Ibl \sin \alpha, \quad (5.2)$$

где α – угол между вектором \vec{B} и направлением тока в проводнике.

Исходя из закона Био – Савара – Лапласа [9, с. 143], вектор магнитной индукции, создаваемый элементом длины проводника $d\vec{l}$, по которому течёт ток I , равен

$$d\vec{B} = \frac{\mu\mu_0 [I d\vec{l}, \vec{r}]}{4\pi r^3}, \quad (5.3)$$

где \vec{r} – радиус-вектор, проведённый в ту точку поля, где определяется магнитная индукция \vec{B} ; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Гн}}{\text{м}}$ магнитная постоянная, измеряемая в единицах генри на метр ($1 \text{ Гн/м} = 1 \text{ Н/А}^2$); μ – относительная магнитная проницаемость, характеризующая магнитные свойства среды.

Из уравнения баланса магнитной энергии следует, что изменение магнитной энергии dW_m равно работе магнитной силы F_m по перемещению тела на расстояние dx в направлении этой силы, т.е. $dW_m = F_m dx$. Откуда эта сила, другими словами ЭДУ, определится как производная магнитной энергии по перемещению тела

$$F_m = \frac{dW_m}{dx}. \quad (5.4)$$

Энергия электрического тока I превращается в энергию магнитного поля W_m , и согласно этому энергетическому балансу [9, с. 148]

$$W_m = \frac{LI^2}{2}, \quad (5.5)$$

где L – индуктивность проводника, по которому течёт ток I , Гн.

Если рассматривать взаимодействие двух контуров с токами I_1 и I_2 , то

$$W_m = \frac{L_1 I_1^2}{2} + \frac{L_2 I_2^2}{2} + M I_1 I_2, \quad (5.6)$$

где L_1, L_2 – индуктивности проводников, по которым текут токи I_1 и I_2 , Гн; M – взаимная индуктивность этих проводников, Гн.

Вопросы для самоконтроля и задания

1. Напишите дифференциальную формулу закона Био – Савара – Лапласа.
2. Как определить направление вектора магнитной индукции \vec{B} в самом общем случае?
3. Как определить модуль вектора магнитной индукции \vec{B} и его направление для прямолинейного проводника с током бесконечной длины?

4. Как изменится величина магнитной индукции, если ток в проводнике увеличить в два раза?
5. Как изменится величина магнитной индукции, если расстояние до проводника с током уменьшить в два раза?

5.2. Усилия между параллельными проводниками

Рассмотрим бесконечно тонкие проводники конечной длины l_1 и l_2 (рис. 5.1).

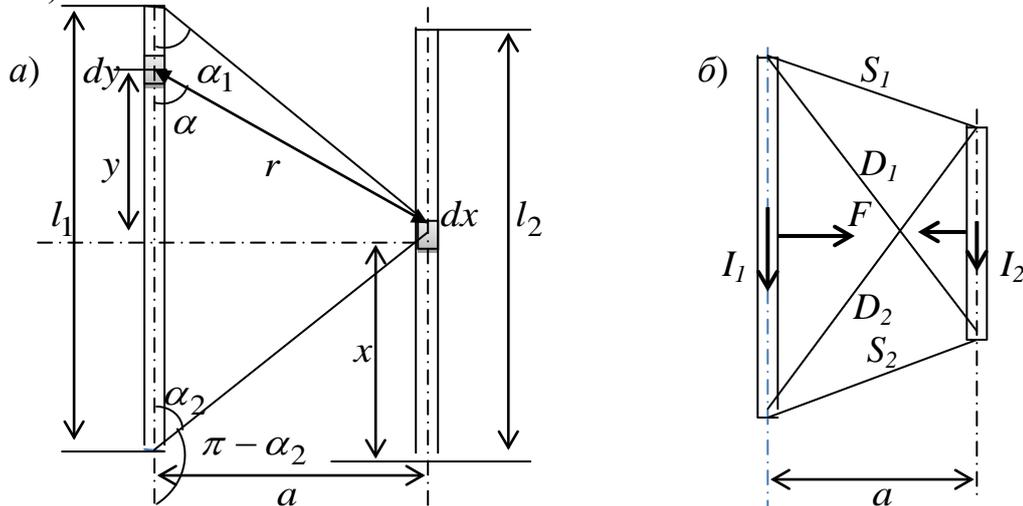


Рис. 5.1. Параллельные проводники с током

Найдем магнитную индукцию от проводника длины l_1 . Из (5.3) для данного случая (рис.5.1,а) при относительной магнитной проницаемости воздуха $\mu = 1$ следует

$$dB = \frac{\mu_0 I_1 dy \sin \alpha}{4\pi r^2}.$$

В результате интегрирования получим

$$B = \frac{\mu_0 I_1}{4\pi} \int_0^{l_1} \frac{\sin \alpha}{r^2} dy.$$

Перейдем к новой переменной α : $y = \frac{a}{\tan \alpha}$ (см. рис. 5.1,а), $r = \frac{a}{\sin \alpha}$,

$$dy = -\frac{a}{\sin^2 \alpha} d\alpha. \text{ Тогда}$$

$$B = \frac{\mu_0 I_1}{4\pi} \int_{\pi - \alpha_2}^{\alpha_1} \frac{\sin \alpha}{\left(\frac{a}{\sin \alpha}\right)^2} \left(-\frac{a}{\sin^2 \alpha}\right) d\alpha = -\frac{\mu_0 I_1}{4\pi a} \int_{\pi - \alpha_2}^{\alpha_1} \sin \alpha d\alpha = \frac{\mu_0 I_1}{4\pi a} [\cos \alpha_1 + \cos \alpha_2],$$

$$\text{где (рис. 5.1,а) } \cos \alpha_1 = \frac{l_2 - x}{\sqrt{(l_2 - x)^2 + a^2}}; \quad \cos \alpha_2 = \frac{x}{\sqrt{x^2 + a^2}}.$$

Следовательно, на второй проводник с током I_2 будет действовать магнитная индукция от первого проводника, равная

$$B = \frac{\mu_0 I_1}{4\pi a} \left(\frac{l_2 - x}{\sqrt{(l_2 - x)^2 + a^2}} + \frac{x}{\sqrt{x^2 + a^2}} \right). \quad (5.7)$$

Тогда по закону Ампера (5.1)

$$dF_x = I_2 B \sin \frac{\pi}{2} dx = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{4\pi a} \left(\frac{l_2 - x}{\sqrt{(l_2 - x)^2 + a^2}} + \frac{x}{\sqrt{x^2 + a^2}} \right) dx. \quad (5.8)$$

Здесь угол между вектором \vec{B} и направлением тока I_2 равен $\frac{\pi}{2}$, так как токи I_1 и I_2 параллельны. Проинтегрируем последнее уравнение для случая, когда $l_1 = l_2 = l$. Сначала вычислим интеграл

$$\begin{aligned} J_1 &= \int_0^l \frac{l - x}{\sqrt{(l - x)^2 + a^2}} dx = \\ &= -\frac{1}{2} \int_0^l \frac{d[(l - x)^2 + a^2]}{\sqrt{(l - x)^2 + a^2}} dx = -\sqrt{(l - x)^2 + a^2} \Big|_0^l = -a + \sqrt{l^2 + a^2}, \end{aligned}$$

затем

$$J_2 = \int_0^l \frac{x}{\sqrt{x^2 + a^2}} dx = \frac{1}{2} \int_0^l \frac{d(x^2 + a^2)}{\sqrt{x^2 + a^2}} = \sqrt{x^2 + a^2} \Big|_0^l = \sqrt{l^2 + a^2} - a.$$

Тогда

$$F_x = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{4\pi a} (J_1 + J_2) = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{4\pi a} 2 \left(\sqrt{l^2 + a^2} - a \right) = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{2l}{a} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{a}{l} \right)^2} - \frac{a}{l} \right) I_1 I_2.$$

Из полученного результата следует, что ЭДУ между двумя параллельными проводниками пропорционально произведению токов, протекающих в этих проводниках

$$F_x = \frac{\mu_0}{4\pi} k I_1 I_2, \quad (5.9)$$

где k – коэффициент пропорциональности зависит от отношения расстояния между проводниками к их длине. Его называют *коэффициентом контура*. Согласно полученным результатам он равен

$$k = \frac{2l}{a} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{a}{l} \right)^2} - \frac{a}{l} \right), \quad (5.10)$$

где a – расстояние между параллельными проводниками, а l – их длина в тех же единицах измерения, что и расстояние a .

Полученный результат справедлив для проводников с круглым сечением. При прямоугольной форме сечения шин на величину ЭДУ будут влиять размеры сечения. Это влияние учитывается коэффициентом формы K_ϕ , который можно определить по кривым Двайта (рис. 5.2) [3, с. 8].

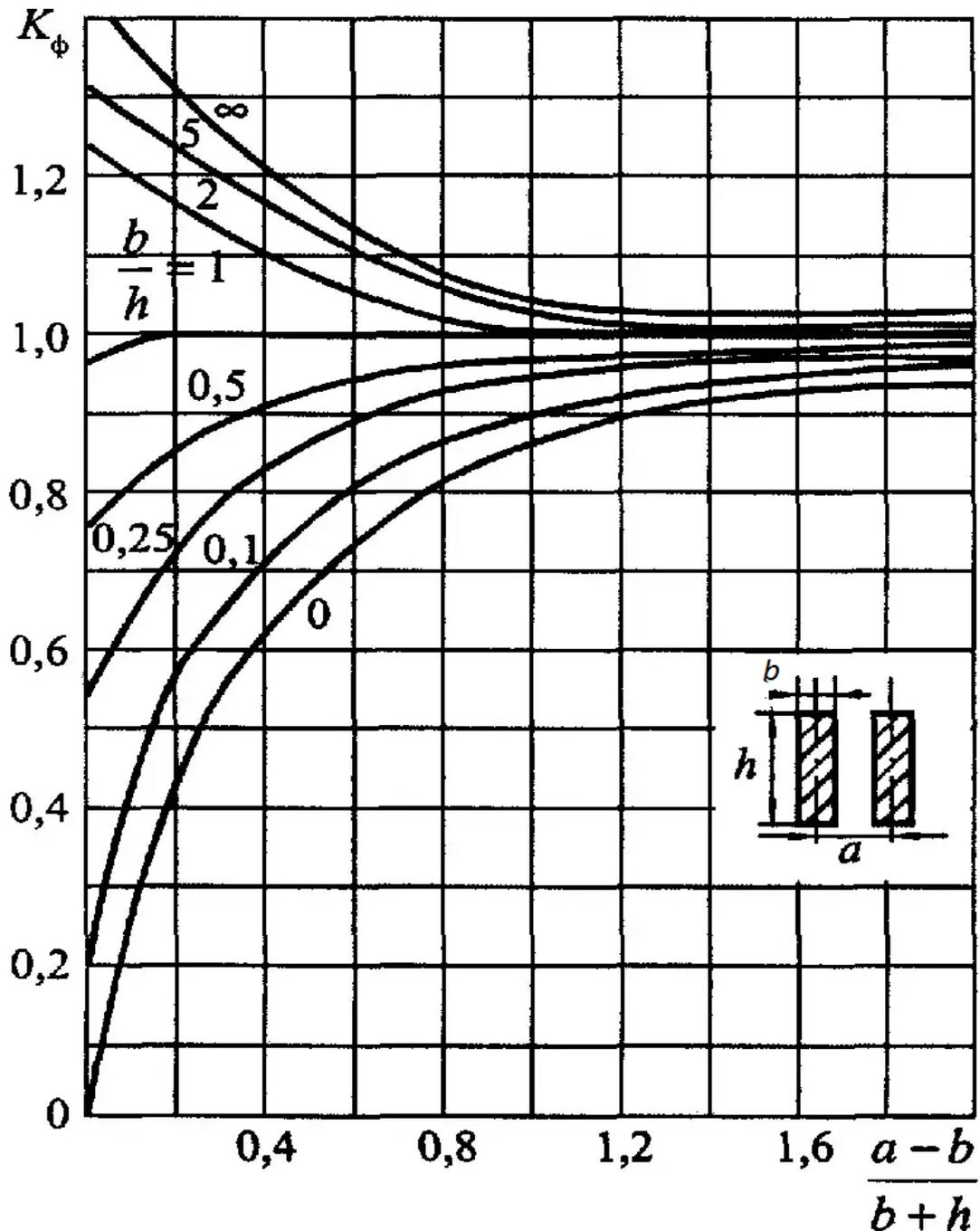


Рис. 5.2. Кривые Двайта для определения коэффициента формы

По размерам сторон прямоугольного сечения шины b , h и расстоянию a между шинами вычисляются величины $\frac{b}{h}$ и $\frac{a-b}{b+h}$ и по кривым Двайта

определяется коэффициент формы K_ϕ . А затем вычисляется значение ЭДУ по следующей формуле:

$$F_x = \frac{\mu_0}{4\pi} k \cdot K_\phi I_1 I_2. \quad (5.11)$$

Когда токи в параллельных проводниках направлены в одну сторону, ЭДУ будет их притягивать, а при противоположном направлении – отталкивать.

Вопросы для самоконтроля

1. Как определить модуль магнитной индукции от прямолинейного проводника круглого сечения, по которому течёт постоянный ток I ?
2. От чего зависит величина ЭДУ, возникающая между параллельными проводниками при коротком замыкании?
3. Что такое коэффициент контура, как его определить?
4. Что такое коэффициент формы, как его определить?

5.3. Усилия между перпендикулярными проводниками

В конструкциях многих электрических аппаратов часто встречаются взаимно перпендикулярные токоведущие части (например, рубильники, мостовые контактные схемы и т. д.). Ниже рассмотрим расчёт ЭДУ, возникающих между перпендикулярными проводниками (рис. 5.3).

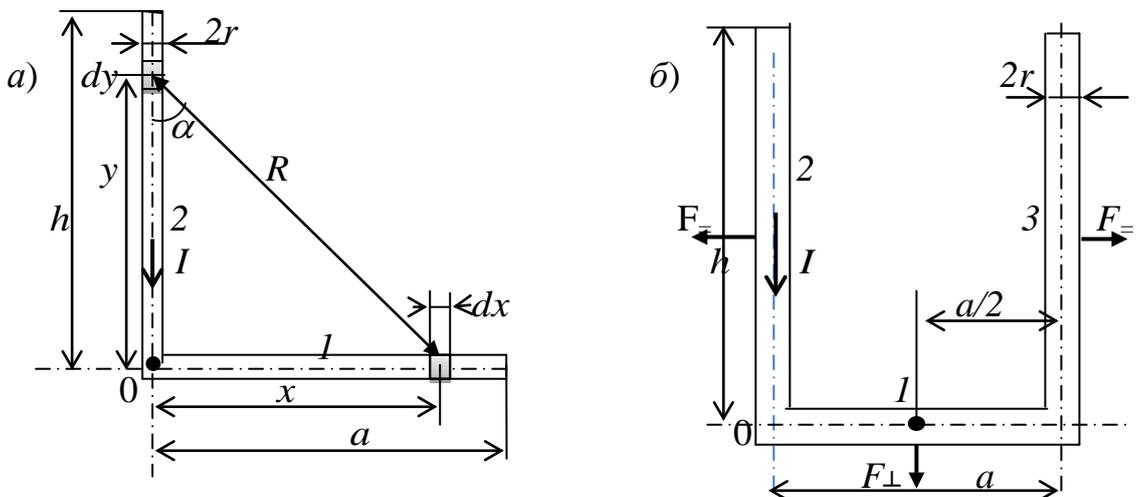


Рис. 5.3. Проводники с током: а) – с перпендикулярным изгибом; б) – с двойным изгибом

Магнитная индукция от элементарного участка dy в точке y проводника 2, действующая на элементарный участок dx в точке x проводника 1, согласно (5.3) будет равна

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I dy \cdot \sin \alpha}{R^2}.$$

Здесь (рис. 5.3,а) $\sin \alpha = \frac{x}{R}$, $R = \sqrt{x^2 + y^2}$. Тогда

$$dB = \frac{\mu_0 I x dy}{4\pi R^3} = \frac{\mu_0 I x}{4\pi} \frac{dy}{(x^2 + y^2)^{3/2}}.$$

От переменной y перейдём к переменной α . Согласно рис. 5.3,а

$$\cos \alpha = \frac{y}{\sqrt{x^2 + y^2}}. \text{ Откуда}$$

$$d \cos \alpha = -\sin \alpha d\alpha = d \frac{y}{\sqrt{x^2 + y^2}} = \frac{\sqrt{x^2 + y^2} - y \frac{2y}{2\sqrt{x^2 + y^2}}}{x^2 + y^2} dy = \frac{x^2}{(x^2 + y^2)^{3/2}} dy.$$

$$\text{Тогда } dB = \frac{\mu_0 I x}{4\pi} \frac{dy}{(x^2 + y^2)^{3/2}} = \frac{\mu_0 I}{4\pi x} (-\sin \alpha) d\alpha. \text{ Интегрируя последнее}$$

уравнение при условиях $\alpha_1 = \alpha(0) = \frac{\pi}{2}$, $\alpha_2 = \alpha(h) = \arctg \frac{x}{h}$ (см. рис. 5.3,а),

получим

$$B = \frac{\mu_0 I}{4\pi x} \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} (-\sin \alpha) d\alpha = \frac{\mu_0 I}{4\pi x} \cos \alpha \Big|_{\frac{\pi}{2}}^{\arctg \frac{x}{h}} = \frac{\mu_0 I}{4\pi x} \cos \left(\arctg \frac{x}{h} \right). \quad (5.12)$$

Для бесконечно длинного проводника 2 ($h \rightarrow \infty$)

$$B = \frac{\mu_0 I}{4\pi x}, \quad (5.13)$$

а сила Ампера, действующая на проводник 1, будет равна интегралу по конечному интервалу $r \leq x \leq a$:

$$F_{\perp} = \int_r^a IB \sin \frac{\pi}{2} dx = \frac{\mu_0 I^2}{4\pi} \int_r^a \frac{dx}{x} = \frac{\mu_0 I^2}{4\pi} (\ln a - \ln r) = \frac{\mu_0 I^2}{4\pi} \ln \frac{a}{r}. \quad (5.14)$$

При проводнике 2 конечной длины h имеем

$$F_{\perp} = \int_r^a IB \sin \frac{\pi}{2} dx = \frac{\mu_0 I^2}{4\pi} \int_r^a \cos \left(\arctg \frac{x}{h} \right) \frac{1}{x} dx. \quad (5.15)$$

Перейдём от переменной x к $\alpha_2 = \arctg \frac{x}{h}$. Тогда $x = h \cdot \operatorname{tg} \alpha_2$;

$$dx = \frac{h}{\cos^2 \alpha_2} d\alpha_2; \beta_1 = \alpha_2(r) = \arctg \frac{r}{h}; \beta_2 = \alpha_2(a) = \arctg \frac{a}{h}. \text{ Подставим}$$

это в (5.15), получим

$$F_{\perp} = \frac{\mu_0 I^2}{4\pi} \int_{\beta_1}^{\beta_2} \cos \alpha_2 \frac{h}{\cos^2 \alpha_2} \frac{1}{h \cdot \operatorname{tg} \alpha_2} d\alpha_2 = \frac{\mu_0 I^2}{4\pi} \int_{\beta_1}^{\beta_2} \frac{d\alpha_2}{\sin \alpha_2} =$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{\mu_0 I^2}{4\pi} \frac{1}{2} \ln \left| \frac{1 - \cos \alpha_2}{1 + \cos \alpha_2} \right|_{\beta_1}^{\beta_2} = \frac{\mu_0 I^2}{4\pi} \frac{1}{2} \ln \left| \frac{1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha_2}}}{1 + \frac{1}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha_2}}} \right|_{\operatorname{arctg} \frac{r}{h}}^{\operatorname{arctg} \frac{a}{h}} = \\
&= \frac{\mu_0 I^2}{4\pi} \frac{1}{2} \ln \left| \frac{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha_2} - 1}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha_2} + 1} \right|_{\operatorname{arctg} \frac{r}{h}}^{\operatorname{arctg} \frac{a}{h}} = \frac{\mu_0 I^2}{4\pi} \ln \left| \frac{\operatorname{tg} \alpha_2}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha_2} + 1} \right|_{\operatorname{arctg} \frac{r}{h}}^{\operatorname{arctg} \frac{a}{h}} = \\
&= \frac{\mu_0 I^2}{4\pi} \left[\ln \frac{a/h}{\sqrt{1 + (a/h)^2} + 1} - \ln \frac{r/h}{\sqrt{1 + (r/h)^2} + 1} \right] = \frac{\mu_0 I^2}{4\pi} \ln \frac{a}{r} \frac{\sqrt{1 + (r/h)^2} + 1}{\sqrt{1 + (a/h)^2} + 1},
\end{aligned}$$

то есть

$$F_{\perp} = \frac{\mu_0 I^2}{4\pi} \ln \frac{a}{r} \frac{\sqrt{1 + (r/h)^2} + 1}{\sqrt{1 + (a/h)^2} + 1}. \quad (5.16)$$

Обычно радиус сечения проводника много меньше его длины ($r \ll h$). Поэтому $(r/h)^2 \rightarrow 0$ и из (5.16) следует, что

$$F_{\perp} = \frac{\mu_0 I^2}{4\pi} \ln \frac{2a/r}{\sqrt{1 + (a/h)^2} + 1}. \quad (5.17)$$

Выражение $\ln \frac{2a/r}{\sqrt{1 + (a/h)^2} + 1} = k_{\perp}$ зависит лишь от размеров

проводников – это коэффициент контура для перпендикулярных изгибов провода, и, следовательно, формула для вычисления ЭДУ в этом случае имеет вид

$$F_{\perp} = \frac{\mu_0}{4\pi} k_{\perp} I^2, \quad (5.18)$$

где коэффициент k_{\perp} , согласно (5.14) и (5.17), вычисляется по формуле

$$k_{\perp} = \begin{cases} \ln \frac{a}{r} & \text{при длине проводника } h \rightarrow \infty; \\ \ln \frac{2a/r}{\sqrt{1 + (a/h)^2} + 1} & \text{при конечной длине } h. \end{cases} \quad (5.19)$$

При взаимодействии проводника I с двумя проводниками 2 и 3 , перпендикулярными ему (рис. 5.3,б) ЭДУ F_{\perp} будет в два раза больше.

Вопросы для самоконтроля

1. Как определить модуль магнитной индукции в перегнутом под прямым углом проводнике круглого сечения, по которому течёт ток короткого замыкания?
2. Как вычислить ЭДУ, возникающее между перпендикулярными проводниками при коротком замыкании?
3. Во сколько раз возрастёт ЭДУ при коротком замыкании, если ток короткого замыкания в 30 раз оказался выше номинального?
4. Если проводник имеет несколько изгибов, то при токе короткого замыкания что будет происходить с этими изгибами? Будут ли они выпрямляться или изгибаться ещё сильнее?

5.4. Электродинамические силы в кольцевом витке и между кольцевыми витками

Рассмотрим кольцевой виток, по которому течёт ток I (рис. 5.4).

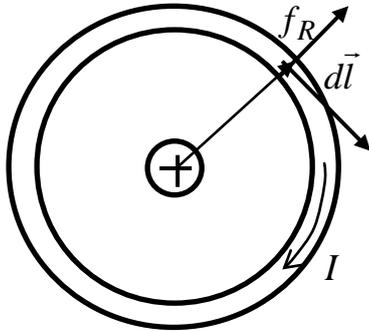


Рис. 5.4. Виток с током

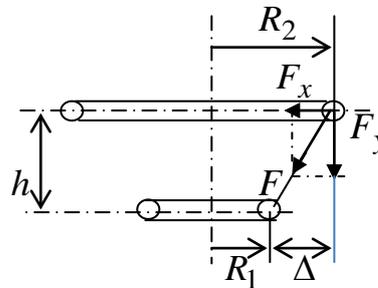


Рис. 5.5. ЭДУ между двумя витками

В таком витке возникают радиальные силы f_R , стремящиеся увеличить его периметр, то есть разорвать виток. Магнитная индукция в центре этого витка определится из (5.3) и в данном случае будет равна

$$B = \oint_l dB = \oint_l \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{Idl \cdot \sin \frac{\pi}{2}}{R^2} = \frac{\mu_0 I}{4\pi R^2} \oint_l dl = \frac{\mu_0 I}{4\pi R^2} 2\pi R = \frac{\mu_0 I}{2R}, \quad (5.20)$$

где R – радиус витка.

Тогда сила Ампера, стремящаяся разорвать виток, согласно (5.2) и (5.20), будет равна

$$f_R = IB \sin \frac{\pi}{2} = I \frac{\mu_0 I}{2R} 2\pi R = \mu_0 \pi I^2. \quad (5.21)$$

Данную формулу можно применять не только к одному витку, но и к обмотке с любым числом витков w . Только в этом случае за значение тока следует принимать магнитодвижущую силу Iw , и сила, стремящаяся разорвать обмотку катушки, будет в самом общем случае равна

$$F_R = \mu_0 \pi (Iw)^2. \quad (5.22)$$

Теперь рассмотрим электромагнитные взаимодействия между отдельными кольцевыми витками с током. Пусть имеется два витка с радиусами R_1 и R_2 , по которым текут токи I_1 и I_2 соответственно. Расстояние между ними равно h (рис.5.5).

Значение соответствующих сил взаимодействия в этом случае можно оценить по следующим приближённым формулам:

$$F_x = \mu_0 I_1 I_2 \frac{R_1 \Delta}{h^2 + \Delta^2}; \quad (5.23)$$

$$F_y = \mu_0 I_1 I_2 \frac{R_1 h}{h^2 + \Delta^2}, \quad (5.24)$$

где $\Delta = R_2 - R_1$ (см. рис.5.5); I_1, I_2 – токи в соответствующих витках.

Зависимости этих сил от расстояния между витками представлены на рис. 5.6.

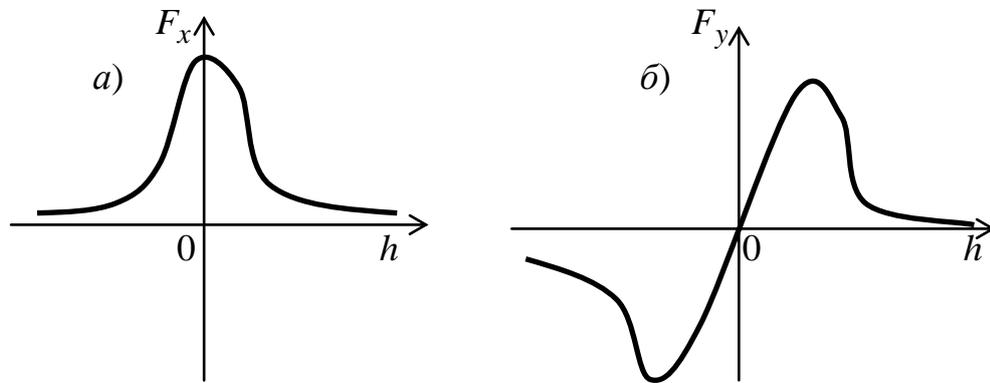


Рис. 5.6. Зависимости сил взаимодействия между витками: а) – $F_x(h)$; б) – $F_y(h)$

Вопросы для самоконтроля

1. Чему равен модуль магнитной индукции в центре кольцевого витка с током?
2. Чему равна сила Ампера, стремящаяся разорвать виток?
3. Чему равна сила, стремящаяся разорвать обмотку катушки?

5.5. Электродинамические силы при однофазном переменном токе

Полученные выше уравнения для вычисления ЭДУ справедливы и для сетей переменного тока. При этом ЭДУ будут иметь, как и ток, переменный характер. Сначала рассмотрим силы, действующие между параллельными проводниками в сети однофазного переменного тока.

Пусть по параллельным проводникам течёт ток $i_1 = i_2 = i = I_m \sin \omega t$. Из (5.11) следует, что между ними возникает ЭДУ

$$f = c_1 i^2 = c_1 I_m^2 \sin^2 \omega t = \frac{1}{2} c_1 I_m^2 - \frac{1}{2} c_1 I_m^2 \cos 2\omega t, \quad (5.25)$$

где $c_1 = \frac{\mu_0}{4\pi} k \cdot K_\phi$ – объединяющий все поправки постоянный коэффициент, Гн/м; параметры переменного тока: I_m – амплитуда, А, и угловая частота, с^{-1} ; τ – время, с.

Данное усилие состоит из двух составляющих: $f_- = \frac{1}{2} c_1 I_m^2$ – постоянной составляющей и $f_{\approx} = \frac{1}{2} c_1 I_m^2 \cos 2\omega\tau$ – переменной.

Переменная составляющая ЭДУ при этом меняется с удвоенной частотой относительно частоты переменного тока (рис.5.7).

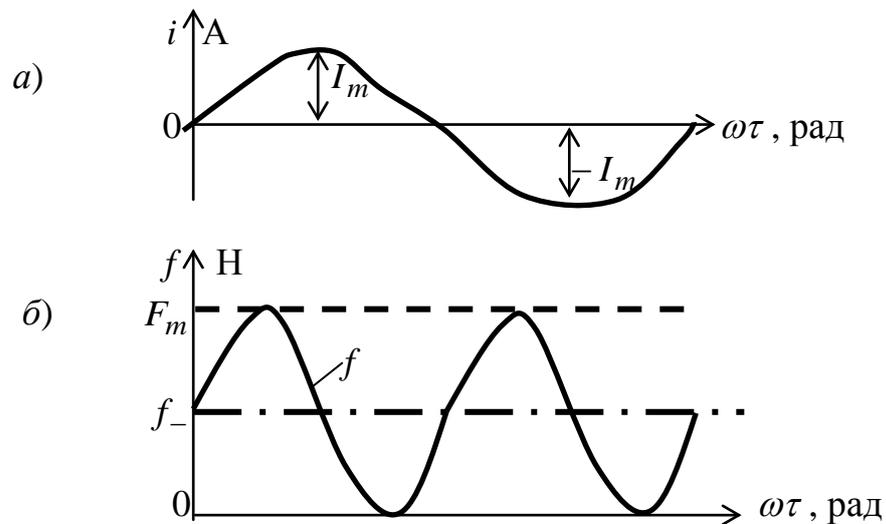


Рис. 5.7. Временные диаграммы: а) – тока и б) – ЭДУ

Общее электродинамическое усилие f будет меняться только по величине в интервале $0 \leq f \leq c_1 I_m^2$, не меняя своего направления.

Таким образом, максимальное ЭДУ здесь будет

$$F_m = c_1 I_m^2 = 2c_1 I^2, \quad (5.26)$$

где $I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$ – действующее значение переменного тока.

Из этого следует, что при однофазном переменном токе значение ЭДУ в два раза больше, чем при постоянном токе, эквивалентном данному.

Кроме того, если при постоянном токе значение тока короткого замыкания равно некоторому установившемуся значению $I_{уст}$, то при переменном токе в зависимости от момента короткого замыкания первая амплитуда ударного тока $I_{удm}$ может значительно превосходить значение тока $I_{уст}$. Экспериментально установлено [3, с. 13 – 14], что

$$I_{удm} = k_{уд} I_m = k_{уд} \sqrt{2} I, \quad (5.27)$$

где $k_{y\partial}$ – ударный коэффициент, зависящий от момента возникновения короткого замыкания ($k_{y\partial} = 1 \dots 1,8$).

Тогда максимальное ЭДУ в этом случае может составить

$$F_{y\partial m} = c_1(I_{y\partial m})^2 = c_1(1,8 \cdot \sqrt{2})^2 I^2 = 6,48c_1 I^2, \quad (5.28)$$

то есть электродинамическое усилие здесь может почти в шесть с половиной раз превзойти ЭДУ при постоянном токе, значение которого соответствует действующему значению данного переменного тока.

Вопросы для самоконтроля

1. По какому закону изменяется величина ЭДУ в сети однофазного переменного тока?
2. Почему в отличие от переменного тока ЭДУ не меняется по направлению?
3. Какие явления следует учитывать при вычислении возможных значений ЭДУ при коротком замыкании в сети однофазного переменного тока?
4. Чем объяснить возможность более чем шестикратного увеличения ЭДУ при однофазном переменном токе?

5.6. Электродинамические силы при трехфазном переменном токе

В обычной трёхфазной сети токи в фазах сдвинуты на 120° , то есть

$$i_1 = I_m \sin \omega \tau, \quad (5.29)$$

$$i_2 = I_m \sin(\omega \tau - 120^\circ), \quad (5.30)$$

$$i_3 = I_m \sin(\omega \tau + 120^\circ). \quad (5.31)$$

Рассмотрим случай, когда проводники лежат в одной плоскости и параллельны друг другу (рис.5.8).

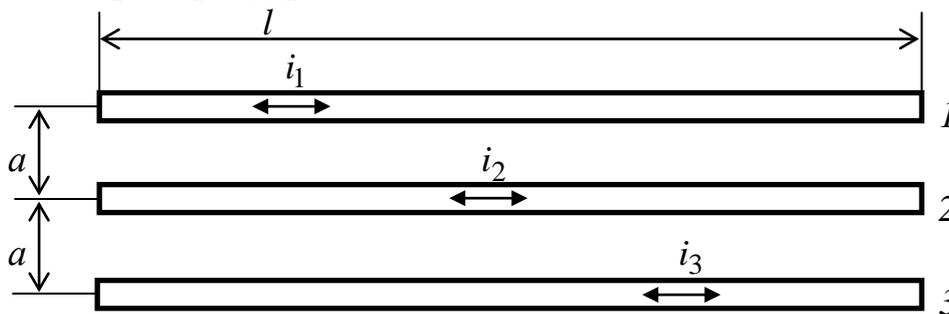


Рис. 5.8. Схема расположения проводников трёхфазного тока

Введём обозначения:

F_{12} – сила электромагнитного взаимодействия между проводниками 1 и 2, Н/А²;

F_{13} – сила электромагнитного взаимодействия между проводниками 1 и 3, Н/А².

Тогда полная сила, действующая на проводник 1, определится выражением

$$f_1 = F_{12}i_1i_2 + F_{13}i_1i_3. \quad (5.31)$$

Используя (5.29) и (5.30), вычислим величину

$$\begin{aligned} i_1 i_2 &= I_m \sin \omega \tau \cdot I_m \sin(\omega \tau - 120^\circ) = I_m^2 \sin \omega \tau \cdot [\sin \omega \tau \cdot \cos 120^\circ - \sin 120^\circ \cos \omega \tau] = \\ &= I_m^2 \sin \omega \tau \cdot \left[-\frac{1}{2} \sin \omega \tau - \frac{\sqrt{3}}{2} \cos \omega \tau \right] = \frac{I_m^2}{4} \left(-2 \sin^2 \omega \tau - \sqrt{3} \cdot 2 \sin \omega \tau \cos \omega \tau \right) = \\ &= \frac{I_m^2}{4} \left(-(1 - \cos 2\omega \tau) - \sqrt{3} \cdot \sin 2\omega \tau \right) = \frac{I_m^2}{4} \left(\cos 2\omega \tau - 1 - \sqrt{3} \cdot \sin 2\omega \tau \right). \end{aligned}$$

Поскольку $I_m = \sqrt{2}I$, то из последнего выражения следует

$$i_1 i_2 = \frac{I^2}{2} \left(\cos 2\omega \tau - 1 - \sqrt{3} \cdot \sin 2\omega \tau \right). \quad (5.32)$$

Затем, используя (5.29) и (5.31), вычислим величину

$$\begin{aligned} i_1 i_3 &= I_m \sin \omega \tau \cdot I_m \sin(\omega \tau + 120^\circ) = I_m^2 \sin \omega \tau \cdot [\sin \omega \tau \cdot \cos 120^\circ + \sin 120^\circ \cos \omega \tau] = \\ &= I_m^2 \sin \omega \tau \cdot \left[-\frac{1}{2} \sin \omega \tau + \frac{\sqrt{3}}{2} \cos \omega \tau \right] = \frac{I_m^2}{4} \left(-2 \sin^2 \omega \tau + \sqrt{3} \cdot 2 \sin \omega \tau \cos \omega \tau \right) = \\ &= \frac{I_m^2}{4} \left(-(1 - \cos 2\omega \tau) + \sqrt{3} \cdot \sin 2\omega \tau \right) = \frac{I_m^2}{4} \left(\cos 2\omega \tau - 1 + \sqrt{3} \cdot \sin 2\omega \tau \right). \end{aligned}$$

Подставив $I_m = \sqrt{2}I$, окончательно получим

$$i_1 i_2 = \frac{I^2}{2} \left(\cos 2\omega \tau - 1 + \sqrt{3} \cdot \sin 2\omega \tau \right). \quad (5.33)$$

В (5.31) подставим (5.32) и (5.33). После преобразований получим

$$f_1 = \frac{I^2}{2} [(F_{13} - F_{12})\sqrt{3} \cdot \sin 2\omega \tau - (F_{13} - F_{12})(1 - \cos 2\omega \tau)]. \quad (5.34)$$

В отличие от однофазного тока здесь ЭДУ меняется не только по величине, но и по направлению (по знаку) в зависимости от времени.

Если проводники (рис. 5.8) расположены на равном расстоянии a друг от друга и их длина много больше этого расстояния ($l \gg a$), то $F_{13} \approx \frac{1}{2} F_{12}$.

Это с тем, что при $l \gg a$ из (5.10) следует $k = \frac{2l}{a} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{a}{l} \right)^2} - \frac{a}{l} \right) \approx \frac{2l}{a}$. Тогда

$k_{12} = \frac{2l}{a}, k_{13} = \frac{2l}{2a} \Rightarrow k_{13} \approx \frac{1}{2} k_{12}$ и, следовательно, $F_{13} \approx \frac{1}{2} F_{12}$. В этом случае из (5.34) получим

$$f_1 = \frac{F_{12} I^2}{4} [3 \cos 2\omega \tau - \sqrt{3} \cdot \sin 2\omega \tau - 3]. \quad (5.35)$$

Если данная сила имеет положительный знак, то это сила притягивания проводника I , а если отрицательный – то сила отталкивания.

Найдём максимумы и минимумы такой силы. Для этого исследуем на экстремум функцию

$$f(x) = 3 \cos x - \sqrt{3} \cdot \sin x - 3, \quad (5.36)$$

где с целью сокращения записи за x обозначена величина $2\omega\tau$.

Для нахождения экстремальных точек найдём производную функции $f(x)$ и приравняем её к нулю:

$$f'(x) = -3 \sin x_m - \sqrt{3} \cdot \cos x_m = 0,$$

откуда $\operatorname{tg} x_m = -\frac{1}{\sqrt{3}}$; $x_{m_{1,2}} = \operatorname{arctg}\left(-\frac{1}{\sqrt{3}}\right) + \pi n = \pi n - 30^\circ$.

При $n = 0$ $x_{m_1} = -30^\circ$ и $f(-30^\circ) = 3 \frac{\sqrt{3}}{2} - \sqrt{3} \left(-\frac{1}{2}\right) - 3 = 2\sqrt{3} - 3 = 0,464$ –

это максимум.

При $n = 1$ $x_{m_2} = \pi - 30^\circ = 150^\circ$ и $f(150^\circ) = 3 \left(-\frac{\sqrt{3}}{2}\right) - \sqrt{3} \left(\frac{1}{2}\right) - 3 = -6,464$

– это минимум.

Тогда максимальная сила притяжения проводника I

$$f_{1np_{\max}} = \frac{F_{12} I^2}{4} f(-30^\circ) = 0,116 F_{12} I^2, \quad (5.37)$$

а максимальная сила отталкивания проводника I

$$f_{1om_{\max}} = \frac{F_{12} I^2}{4} f(150^\circ) = -1,616 F_{12} I^2. \quad (5.38)$$

Исходя из соображений симметрии (см. рис. 5.8), силы, действующие на проводник 3, будут такими же, как и силы, действующие на проводник 1, но противоположны по направлению.

Для определения ЭДУ, действующих на проводник 2 (средний), необходимо вычислить величину $i_2 i_3$. Используя (5.30) и (5.31), получим

$$\begin{aligned} i_2 i_3 &= I_m \sin(\omega\tau - 120^\circ) \cdot I_m \sin(\omega\tau + 120^\circ) = I_m^2 [\sin \omega\tau \cdot \cos 120^\circ - \sin 120^\circ \cos \omega\tau] \times \\ &\times [\sin \omega\tau \cdot \cos 120^\circ + \sin 120^\circ \cos \omega\tau] = I_m^2 \left[\frac{1}{4} \sin^2 \omega\tau - \frac{3}{4} \cos^2 \omega\tau \right] = -\frac{I_m^2}{4} (\cos 2\omega\tau + \\ &+ 2 \cos^2 \omega\tau) = -\frac{I_m^2}{4} (\cos 2\omega\tau + 1 + \cos 2\omega\tau) = -\frac{I_m^2}{2} (1 + 2 \cos 2\omega\tau). \end{aligned}$$

Тогда $f_2 = F_{12} i_1 i_2 + F_{23} i_2 i_3$. Подставляя сюда найденное $i_2 i_3$ и $i_1 i_2$ из (5.33), получим

$$f_2 = \frac{I^2}{2} [-F_{12} - F_{23} + (F_{12} - 2F_{23}) \cos 2\omega\tau - \sqrt{3} \cdot \sin 2\omega\tau]. \quad (5.39)$$

При равных токах и равных расстояниях $F_{23} = F_{12}$. Поэтому

$$f_2 = \frac{I^2 F_{12}}{2} [-2 - \cos 2\omega\tau - \sqrt{3} \cdot \sin 2\omega\tau] = \frac{I^2 F_{12}}{2} \varphi(x), \quad (5.40)$$

где $\varphi(x) = -2 - \cos x - \sqrt{3} \sin x$, $x = 2\omega\tau$. Найдём экстремальные точки для данной функции. Для этого её первую производную приравняем к нулю:

$$\varphi'(x) = [-2 - \cos x - \sqrt{3} \sin x]' = \sin x - \sqrt{3} \cos x = 0. \text{ Откуда } \operatorname{tg} x_m = \sqrt{3} \text{ и}$$

$$x_{m_{1,2}} = \operatorname{arctg} \sqrt{3} + \pi n = \pi n + 60^\circ.$$

При $n = 0$ $x_{m_1} = 60^\circ$ и $\varphi(60^\circ) = -2 - \frac{1}{2} - \sqrt{3} \frac{\sqrt{3}}{2} = -4$ – это соответствует случаю максимального усилия, которое может испытывать средний проводник (знак минус здесь говорит о том, что направление этого усилия противоположно направлению силы F_{12} на единицу тока). Тогда максимальная сила, действующая на средний проводник, найдется из выражения

$$f_{2_{\max}} = \frac{I^2 F_{12}}{2} \varphi(60^\circ) = 2I^2 F_{12}. \quad (5.41)$$

Из сравнения выражений (5.37), (5.38) и (5.41) видно, что при расположении проводников в одной плоскости сила, действующая на средний проводник, будет больше силы, действующей на крайние проводники.

В момент короткого замыкания появление переходной составляющей может существенно увеличить значения полученных выше максимальных значений сил. Максимальное отталкивающее усилие будет иметь место при коротком замыкании в момент $\omega\tau = -15^\circ$ и составит

$$F_{10m_{\max}} = 6,48 F_{12} I^2. \quad (5.42)$$

Притягивающая сила в этот момент близка к нулю. Максимум притягивающей силы имеет место при коротком замыкании в момент $\omega\tau = 75^\circ$:

$$F_{1np_{\max}} = 0,46 F_{12} I^2. \quad (5.43)$$

Значение отталкивающей силы в этот момент составит $0,75 F_{12} I^2$.

Вопросы для самоконтроля

1. Какая из электродинамических сил (притягивания или отталкивания) имеет более сильное воздействие на крайние проводники, лежащие в одной плоскости трёхфазной линии передач?
2. На какие из проводников такой линии (крайние или средний) оказывается наибольшее ЭДУ?
3. Чем объяснить влияние фазы в момент короткого замыкания на величину максимального ЭДУ?
4. При каком моменте короткого замыкания возникает наибольшее ЭДУ?

5.7. Проверка шинных конструкций на электродинамическую стойкость

Помимо термической стойкости, описанной в подразд. 4.7, электрические аппараты должны обладать ещё и *электродинамической стойкостью*.

Электродинамической стойкостью шинной конструкции называют свойство конструкции выдерживать без повреждений механические воздействия, вызванные токами короткого замыкания.

Шинная конструкция будет удовлетворять этому условию, если максимально возможное расчётное напряжение в материале шин $\sigma_{расч}$ и максимальные расчётные нагрузки на изоляторы $F_{расч}$ не превзойдут допустимых значений:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{расч} &\leq \sigma_{доп}; \\ F_{расч} &\leq F_{доп}, \end{aligned} \right\} \quad (5.44)$$

где $\sigma_{доп}$, $F_{доп}$ – допустимые напряжения в материале, Па, и нагрузка на изолятор, Н.

Для медной шины временное сопротивление разрыву (предел прочности $\sigma_{II} = (245 \dots 295)$ МПа), а допустимое напряжение обычно составляет 70 % от него – $\sigma_{доп} = 0,7\sigma_{II}$.

Расчётное напряжение зависит от максимально возможного ЭДУ на шину, размеров поперечного сечения шины, конструкции крепления и момента сопротивления поперечных сечений шин. В частности, для шины прямоугольного сечения (рис. 5.9,а) момент сопротивления W_y , м³, равен

$$W_y = \frac{hb^2}{6}, \quad (5.45)$$

где h, b – ширина и толщина поперечного сечения шины (рис. 5.9,а), м.

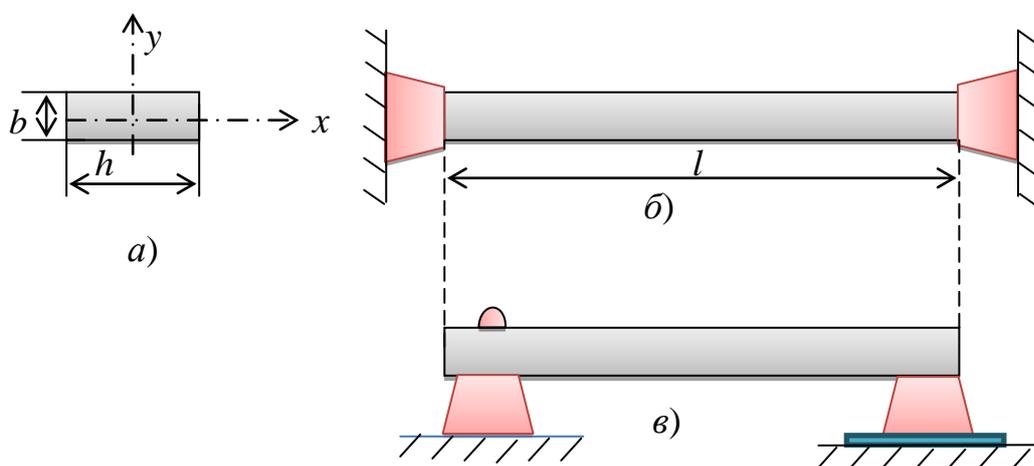


Рис. 5.9. Элементы шинной конструкции: а) – поперечное сечение шины; б) – однопролётные неподвижные опоры; в) – однопролётные простые опоры

При трёхфазном коротком замыкании

$$\sigma_{расч} = \frac{F_{max} l}{\lambda W_y}, \quad (5.46)$$

$$F_{расч} = \beta F_{max}, \quad (5.47)$$

где F_{\max} – максимальное ЭДУ, определяемое по (5.42), Н; l – длина шины (рис. 5.9,б), м; W_y – момент сопротивления поперечного сечения шины, определяемое по (5.45), м³; λ, β – коэффициенты, зависящие от условия закрепления шин, а также числа пролётов конструкции с неразрезанными шинами.

Здесь коэффициенты λ и β определяются по ГОСТ Р 52736-2007. В частности, для однопролётных неподвижных опор (см. рис. 5.9,б) $\lambda = 12$, $\beta = 1$, а для однопролётных простых опор (рис. 5.9,в) $\lambda = 8$, $\beta = 1$. В качестве допустимого значения механической нагрузки на изолирующую опору $F_{\text{доп}}$ следует брать 60 % от минимальной разрушающей силы $F_{\text{разр}}$, приложенной к вершине опоры при изгибе или разрыве, то есть $F_{\text{доп}} = 0,6F_{\text{разр}}$. Величина $F_{\text{разр}}$ указывается разработчиком шинной конструкции.

После определений по описанным выше оценкам допустимых значений $\sigma_{\text{доп}}, F_{\text{доп}}$ (напряжения и усилия) и вычисления их расчётных значений по формулам (5.42), (5.46) и (5.47) проверяется выполнение условий (5.44). Если эти условия выполнены, то данная шинная конструкция является электродинамически стойкой.

Вопросы для самоконтроля и задания

1. Сформулируйте понятие электродинамической стойкости электрического аппарата.
2. Напишите условия, которые должны быть выполнены для обеспечения электродинамической стойкости.
3. Как определяются допустимые значения напряжения и механические нагрузки на шинные конструкции?
4. От каких параметров зависят и как вычисляются расчётные напряжение и ЭДУ?

Библиографический список

1. Алиев, И.И. Электрические аппараты : справочник / И.И. Алиев, М.Б. Абрамов. – М. : Радио-Софт, 2004. – 256 с.
2. Буль, О.Б. Методы расчёта магнитных систем электрических аппаратов : учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений / О.Б. Буль. – М.: Академия, 2005. – 336 с.
3. Грачёв, А.С. Электрические аппараты : руководство по решению задач проектирования электрических аппаратов / А.С. Грачёв. – Йошкар-Ола : Мар. гос. ун-т, 2009. – 111 с.
4. Евдокимов, Ф.Е. Теоретические основы электротехники : учеб. для средн. спец. учеб. заведений. – 7-е изд., испр. и доп. / Ф.Е. Евдокимов. – М. : Высш. шк., 2001. – 495 с.: ил.
5. Касаткин, А.С. Электротехника : учеб. для вузов. – 6-е изд., перераб. / А.С. Касаткин, М.В. Немцов. – М. : Высш. шк., 2000. – 542 с.: ил.
6. Немцов, М.В. Справочник по расчету параметров катушек индуктивности / М.В. Немцов, Ю.М. Шамаев. – М.: Энергоиздат, 1981. — 136 с.
7. Таев, И.С. Электрические аппараты управления : учебник для вузов по спец. «Электрические аппараты». – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Высш. шк., 1984. – 247 с.: ил.
8. Хольм, Р. Электрические контакты : пер. с англ. / Р. Хольм. – М. : Изд-во иностранной литературы, 1961 . – 464 с.
9. Червенчук, В.Д. Учебное пособие по физике : учебное пособие / В.Д. Червенчук. – Омск : Полиграфический центр КАН, 2012. – 252 с.: ил.
10. Электрические и электронные аппараты. В 2 т. Т. 1. Электромеханические аппараты : учебник для студ. высш. учеб. заведений / [Е. Г. Акимов и др.]; под ред. А.Г. Годжелло, Ю.К. Розанова. – М. : Издательский центр «Академия», 2010. — 352 с.
11. Расчёт однослойной катушки в режиме on-line : [Электронный ресурс] / *Coil32*. Программа расчета индуктивности катушек. – Электрон. дан.: сайт существует 2606 дней. – Режим доступа <http://coil32.ru/calc/one-layer.html>, свободный. – Загл. с экрана (дата обращения к ресурсу: 29.11.1016).

Задания для контрольной работы

Тема: Расчет клапанного электромагнита

В контрольной работе предлагается: определить приблизительно размеры клапанного электромагнита, если при рабочем зазоре δ и длительном режиме работы он развивает силу F_3 . Исходные данные для решения задачи приведены в табл. П.1.1.

Таблица П.1.1

Исходные данные для электромагнита

Вариант	Сила, развиваемая электромагнитом F_3 , Н	Рабочий зазор δ , мм	Вариант	Сила, развиваемая электромагнитом F_3 , Н	Рабочий зазор δ , мм
1	5,0	0,20	11	8,0	0,30
2	5,3	0,21	12	8,3	0,31
3	5,6	0,22	13	8,6	0,32
4	5,9	0,23	14	8,9	0,33
5	6,2	0,24	15	9,2	0,34
6	6,5	0,25	16	9,5	0,35
7	6,8	0,26	17	9,8	0,36
8	7,1	0,27	18	10,1	0,37
9	7,4	0,28	19	10,4	0,38
10	7,7	0,29	20	12,0	0,39

Определить приблизительно размеры клапанного электромагнита, если при рабочем зазоре $\delta = 0,25$ мм и длительном режиме он должен развивать силу $F_3 = 5$ Н.

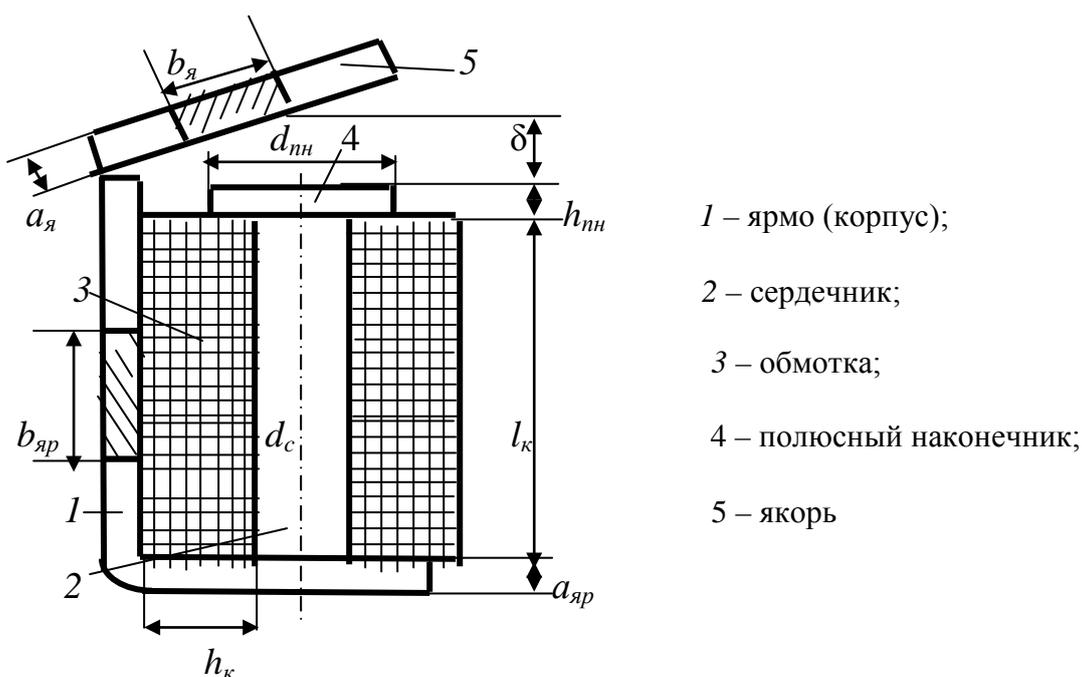


Рис. П.1. Клапанный электромагнит

Решение. Вычислим показатель $\Pi_k = \frac{\sqrt{F_9}}{\delta} = \frac{\sqrt{5}}{0,25 \cdot 10^{-2}} = 894 \frac{\sqrt{H}}{M}$.

Согласно табл. П.1.2 выбираем клапанный электромагнит с П-образным магнитопроводом.

Таблица П.1.2

Данные для выбора типа электромагнитов постоянного тока

Тип электромагнита	$\Pi_k, H^{0,5}/M$
Броневой с плоским стопом и якорем	5000 – 28000
Броневой с якорем и стопом конической формы с углом при вершине 90°	1600 – 5300
То же, с углом при вершине 60°	380 – 1600
Клапанный электромагнит с П-образным магнитопроводом	840 – 8400
Соленоидный электромагнит	< 2,8

Далее по кривой 2 (рис. П.1.2) и найденному значению $\Pi_k = 894 \frac{\sqrt{H}}{M}$ определяем индукцию $B_\delta = 0,265$ Тл.

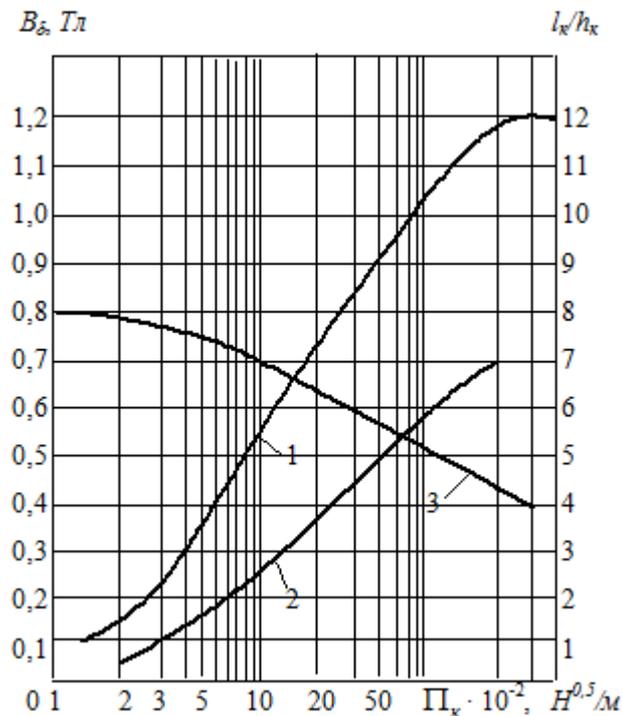


Рис.П.1.2. Зависимость параметров электромагнитов от конструктивного показателя: 1 – для броневого электромагнита с плоским стопом; 2 – для клапанного электромагнита с П-образным магнитопроводом; 3 – отношение длины катушки к её толщине в броневом электромагните с плоским стопом

Площадь полюсного наконечника (шляпки) найдётся из формулы для электромагнитной силы Максвелла: $F_y = \frac{B_\delta^2 S_{nn}}{2\mu_0}$, откуда

$$S_{nn} = 2\mu_0 \cdot \frac{F_y}{B_\delta^2} = 2 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{5}{0,265^2} = 1,79 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 \text{ и диаметр полюсного наконечника } d_{nn} = \sqrt{4 \cdot S_{nn} / \pi} = \sqrt{4 \cdot 1,79 \cdot 10^{-4} / 3,14} = 1,5 \cdot 10^{-2} \text{ м}.$$

Магнитный поток воздушного зазора

$$\Phi_\delta = B_\delta S_{nn} = 0,265 \cdot 1,79 \cdot 10^{-4} = 0,47 \cdot 10^{-4} \text{ Вб}.$$

Зададим коэффициент рассеяния $\sigma_x = 1,3$. Тогда поток в сердечнике

$$\Phi_c = \sigma_x \Phi_\delta = 1,3 \cdot 0,47 \cdot 10^{-4} = 0,61 \cdot 10^{-4} \text{ Вб}.$$

Задаёмся значением магнитной индукции стержня $B_c = 0,8 \text{ Тл}$. Площадь сердечника $S_c = \frac{\Phi_c}{B_c} = 0,61 \cdot 10^{-4} / 0,8 = 0,76 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$, а диаметр

$$d_c = \sqrt{4 \cdot S_c / \pi} = \sqrt{4 \cdot 0,76 \cdot 10^{-4} / 3,14} = 0,98 \cdot 10^{-2} \approx 10^{-2} \text{ м}.$$

Длину цилиндрической бескаркасной катушки при длительном режиме работы определяют по формуле

$$l_k = \sqrt{\frac{F_y^2 \rho_t n}{2k_{3m} k_T (t_{дон} - t_0)}},$$

где $F_y = k_3 F_{mp}$ – установившееся значение МДС катушки, А; $k_3 = 1,1 \dots 1,2$ – коэффициент запаса; $F_{mp} = k_n F_\delta$ – МДС трогания; $k_n = 1,2 \dots 1,5$ – коэффициент, учитывающий падение МДС в рабочем зазоре $F_\delta = B_\delta \delta / \mu_0$.

Для нахождения размеров электромагнита, приняв коэффициенты $k_n = 1,4$ и $k_3 = 1,2$, вычислим

$$F_y = k_3 k_n \frac{B_\delta \delta}{\mu_0} = 1,2 \cdot 1,4 \cdot 0,265 \cdot 0,25 \cdot 10^{-2} / 4\pi \cdot 10^{-7} = 923 \text{ А}.$$

Зададим коэффициенты $k_{зм} = 0,6$, $k_T = 10 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{К}}$, $n = 4$ и примем превышение температуры (перегрев) $t_{дон} - t_0 = 70^\circ\text{C}$, найдём по справочнику удельное сопротивление провода обмотки $\rho(t_{дон}) = 2,34 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ и вычислим

$$l_{\kappa} = \sqrt{\frac{F_y^2 \rho_t n}{2k_{зм} k_T (t_{дон} - t_0)}} = \sqrt{\frac{923^2 \cdot 2,34 \cdot 10^{-8} \cdot 4}{2 \cdot 0,6 \cdot 10 \cdot 70}} = 4,5 \cdot 10^{-2} \text{ м},$$

при этом толщина обмотки

$$h_{\kappa} = l_{\kappa} / n = 4,5 \cdot 10^{-2} / 4 = 1,125 \cdot 10^{-2} \text{ м}.$$

Тогда диаметр катушки будет

$$D_{\kappa} = d_c + 2h_{\kappa} = 10^{-2} + 2 \cdot 1,125 \cdot 10^{-2} = 3,25 \cdot 10^{-2} \text{ м}.$$

Используем рекомендуемые соотношения размеров: ширина ярма $b_{яр} = D_{\kappa}$; толщина ярма $a_{яр} \geq S_c / b_{яр}$; ширина якоря (над шляпкой) $b_{я} \geq d_{нн}$; площадь сечения якоря $S_{я} = (0,5 \dots 0,8) S_c$; толщина якоря $a_{я} \geq S_{я} / b_{я}$; толщина шляпки (потенциального наконечника) $h_{нн} \geq d_c / 4$.

Вычисляем искомые размеры: $b_{яр} = 3,25 \cdot 10^{-2} \text{ м}$;

$$a_{яр} \geq \frac{S_c}{b_{яр}} = \frac{0,76 \cdot 10^{-4}}{3,25 \cdot 10^{-2}} \approx 0,234 \cdot 10^{-2} \text{ м} \Rightarrow \text{примем } a_{яр} = 0,3 \cdot 10^{-2} \text{ м};$$

$$b_{я} \geq 1,5 \cdot 10^{-2} \text{ м} \Rightarrow b_{я} = 1,7 \cdot 10^{-2} \text{ м}; S_{я} = 0,62 \cdot S_c \approx 0,47 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2;$$

$$a_{я} \geq 0,47 \cdot 10^{-4} / 1,7 \cdot 10^{-2} = 0,28 \cdot 10^{-2} \text{ м}; h_{нн} \geq \frac{d_c}{4} = \frac{10^{-2}}{4} = 0,25 \cdot 10^{-2} \text{ м}.$$

Производя проверочный расчёт магнитной цепи, можно уточнить выбранные коэффициенты и искомые размеры.

$$\text{Ответ: } d_c = 1 \text{ см}; d_{нн} = 1,5 \text{ см}; h_{нн} = 0,25 \text{ см};$$

$$l_c = l_{\kappa} = 4,5 \text{ см}; h_{\kappa} = 1,125 \text{ см}; b_{яр} = D_{\kappa} = 3,25 \text{ см};$$

$$a_{яр} = 0,3 \text{ см}; b_{я} = 1,7 \text{ см}; a_{я} = 0,28 \text{ см}.$$

Справочные таблицы

1. Провода обмоточные с бумажной изоляцией

В данную группу входят провода с медными и алюминиевыми однопроволочными жилами круглого или прямоугольного сечения с изоляцией из бумажных лент, предназначенные для обмоток электрических машин, работающих в среде электроизоляционного масла.

Таблица П.2.1

Марки проводов

Марка провода	ГОСТ, ТУ	Конструктивные особенности
АПБ-М	ТУ 16.К71-108-94	С алюминиевой жилой
ПБ-М	То же	С медной жилой
ПБУ	То же	С прямоугольной медной жилой с изоляцией из уплотненной бумаги
ПБПУ	ТУ 16-505.661-74	С двумя или тремя разделенными медными прямоугольными жилами с изоляцией из уплотненной бумаги

Геометрические размеры обмоточных проводов характеризуются разницей между наружными размерами и размерами жилы. Эта разница есть удвоенная толщина изоляции: для круглых жил – $D - d$ (рис. П.2.1), для прямоугольных жил – $B - d$ (рис. П.2.2, П.2.3).

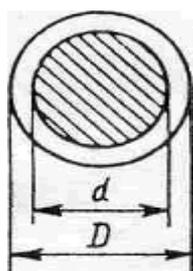


Рис. П.2.1. Провода круглых сечений

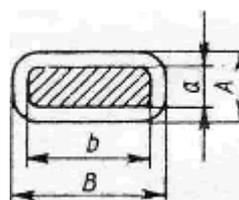


Рис. П.2.2. Провода прямоугольных сечений

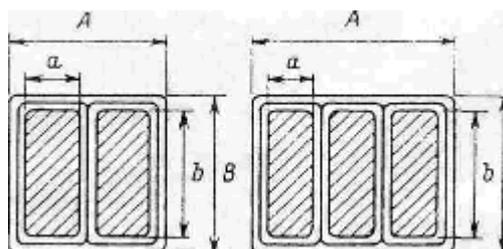


Рис. П.2.3. Сечение проводов марки ПБПУ

Провода АПБ-М, ПБ-М с круглым сечением выпускаются с номинальным диаметром жил в диапазоне $d = (1,5 \div 5,3)$ мм, а их максимальные наружные диаметры приведены в табл.П.2.2.

Таблица П.2.2

Диаметры проводов АПБ-М, ПБ-М

Номинальный диаметр жилы d , мм	Максимальный наружный диаметр провода D , мм
1,50	1,87
1,60	1,97
1,70	2,07
1,80	2,17
1,90	2,27
2,00	2,37
2,12	2,49
2,24	2,61
2,36	2,73
2,50	2,88
2,65	3,03
2,80	3,18
3,00	3,38
3,15	3,53
3,35	3,73
3,55	3,94
3,75	4,14
4,00	4,39
4,25	4,64
4,50	4,90
4,75	5,15
5,00	5,40
5,20	5,60
5,30	5,70

Прямоугольные провода марок АПБ-М, ПБ-М, ПБУ выпускаются в диапазоне по стороне $a = (1,32 \dots 5,6)$ мм и по стороне $b = (4 \dots 16)$ мм, а их максимальные наружные размеры B приведены в табл.П.3 и П.4.

Таблица П.2.3
**Максимальные наружные размеры B , мм, прямоугольных проводов
 АПБ-М, ПБ-М**

b , мм	$(B - b)$, мм							
	0,45	0,55	0,72	0,96	1,20	1,35	1,68	1,92
4,00	4,55	4,67	4,87	5,11	5,40	5,55	5,88	6,12
4,25	4,80	4,92	5,12	5,36	5,65	5,80	6,13	6,37
4,50	5,05	5,17	5,37	5,61	5,90	6,05	6,38	6,62
4,75	5,30	5,42	5,62	5,86	6,15	6,30	6,63	6,87
5,00	5,55	5,67	5,87	6,11	6,40	6,55	6,88	7,12
5,30	5,85	5,97	6,17	6,41	6,70	6,85	7,18	7,42
5,60	6,15	6,27	6,47	6,71	7,00	7,15	7,48	7,72
6,00	6,55	6,67	6,87	7,11	7,40	7,55	7,88	8,12
6,30	6,88	7,00	7,20	7,44	7,73	7,88	8,21	8,45
6,70	7,28	7,40	7,60	7,84	8,13	8,28	8,61	8,85
7,10	7,68	7,80	8,00	8,24	8,53	8,68	9,01	9,25
7,50	8,08	8,20	8,40	8,64	8,93	9,08	9,41	9,65
8,00	8,58	8,70	8,90	9,14	9,43	9,58	9,91	10,15
8,50	9,08	9,20	9,40	9,64	9,93	10,08	10,41	10,65
9,00	9,58	9,70	9,90	10,14	10,43	10,58	10,91	11,15
9,50	10,58	10,20	10,40	10,64	10,93	11,08	11,41	11,65
10,00	10,58	10,70	10,90	11,14	11,43	11,58	11,91	12,15
10,60	11,18	11,30	11,50	11,74	12,03	12,18	12,51	12,75
11,20	11,78	11,90	12,10	12,34	12,63	12,78	13,11	13,35
11,80	12,38	12,50	12,70	12,94	13,23	13,38	13,71	13,95
12,50	13,10	13,22	13,42	13,66	13,95	14,10	14,43	14,67
13,20	13,80	13,92	14,12	14,36	14,65	14,80	15,13	15,37
14,00	14,60	14,72	14,92	15,16	15,45	15,60	15,93	16,17
15,00	15,60	15,72	15,92	16,16	16,45	16,60	16,93	17,17

Таблица П.2.4
Максимальные наружные размеры B , мм, прямоугольных проводов марки ПБУ

b , мм	$(B - b)$, мм						
	1,35	2,00	2,48	2,96	3,60	4,08	4,40
4,75	-	-	4,73	7,91	-	-	-
5,6	-	-	8,28	8,76	-	-	-
6,0	-	-	8,68	8,76	-	-	-
6,3	-	-	8,98	9,46	-	-	-
6,7	8,22	8,87	9,40	9,88	10,57	11,05	11,42
7,10	8,62	9,27	9,8	10,28	10,97	11,45	11,82
7,50	9,02	9,67	10,2	10,68	11,37	11,85	12,22
8,0	9,52	10,17	10,7	11,18	11,87	12,35	12,72
8,5	10,02	10,67	11,2	11,68	12,37	12,85	13,22
9,0	10,52	11,17	11,7	12,18	12,87	13,35	13,72
9,50	11,02	11,67	12,20	12,68	13,37	13,85	14,22
10,0	11,52	12,17	12,70	13,18	13,87	14,35	14,72
10,6	12,12	12,77	13,30	13,78	14,47	14,95	15,32
11,2	12,72	13,37	13,90	14,38	15,07	15,55	15,92
11,8.	13,32	13,97	14,50	14,98	15,67	16,15	16,52
12,5	14,02	14,67	15,20	15,68	16,37	16,85	17,22
13,2	14,75	15,40	15,93	16,41	17,10	17,58	17,95
14,0	15,5	16,20	16,73	17,21	17,90	18,38	18,75
15,0	16,55	17,20	17,73	18,21	18,90	19,38	19,75

Таблица П.2.5
Максимальные наружные размеры B , мм, прямоугольных проводов марки ПБПУ

b , мм	С двумя проводниками			С тремя проводниками		
	$(B - b)$, мм			$(B - b)$, мм		
	2, 00	2, 48	2, 96	2, 00	2, 48	2, 96
1	2	3	4	5	6	7
7,50	10,4	11,0	11,5	-	-	-
8,0	10,9	11,5	12,0	-	-	-
8,5	11,4	12,0	12,5	-	-	-

Окончание табл. П.2.5

1	2	3	4	5	6	7
9,0	11,9	12,5	13,0	-	-	-
9,5	12,4	13,0	13,5	-	-	-
10,0	12,95	13,5	14,0	12,2	12,7	13,2
10,6	13,55	14,1	14,6	13,8	14,3	14,8
11,2	14,5	14,7	15,2	14,4	14,9	15,4
11,8	14,75	15,3	15,8	15,0	15,5	16,7
12,5	15,45	16,0	16,5	15,7	16,2	-
13,2	16,15	16,7	17,2	16,4	16,9	17,4
14,0	16,95	17,5	18,0	17,2	17,7	18,2
15,0	17,95	18,5	19,0	18,2	18,7	19,2

2.Предохранители с плавкими вставками отечественного производства

Таблица П.2.6

Предохранители до 10 А

Наименование	Предельный ток А	Наименование	Предельный ток А
1	2	3	4
ВП1-1	0,25-5	ВПБ6-38	4
ВП1-2	0,25-5	ВПБ6-39	5
ВП2Б-1В	0,25-8	ВПБ6-40	6,3
ВПЗБ-1В	1-8	ВПБ6-41	8
ВПЗТ-2Ш	3,15-10	ВПБ6-42	10
ВП4-1	0,5	ВПБ6-5	0,5
ВП4-2	0,75	ВПБ6-7	1
ВП4-3	1	ВПМ2-М1	0,1-0,5
ВП4-4	2	ВТФ-6	6
ВП4-5	3,15	ВТФ-10	10
ВП4-6	3,5	ПК-30	0,15-2
ВП4-7	4	ПК-45	0,15-5
ВП4-8	0,1	ПЦ-30	1-5
ВП4-9	0,16	ВПТ6-1	0,16
ВП4-10	0,2	ВПТ6-2	0,25
ВП4-11	0,25	ВПТ6-3	0,315
ВП4-12	0,315	ВПТ6-4	0,4
ВП4-13	0,4	ВПТ6-5	0,5
ВП4-14	1,25	ВПТ6-6	0,63
ВП4-15	1,6	ВПТ6-7	1
ВП4-16	5	ВПТ6-8	1,25
ВП4-17	0,63	ВПТ6-9	1,6
ВП4-18	2,5	ВПТ6-10	2
ВПБ6-1	0,16	ВПТ6-11	3,5
ВПБ6-2	0,25	ВПТ6-13	5
ВПБ6-10	2	ВПТ6-15	0,25
ВПБ6-11	3,15	ВПТ6-18	0,5
ВПБ6-12	4	ВПТ6-19	2
ВПБ6-13	5	ВПТ6-20	1
ВПБ6-23	2	ВПТ6-26	5

Окончание табл. П.2.6

1	2	3	4
ВПБ6-24	3,15	ВПТ6-28	0,25
ВПБ6-25	4	ВПТ6-31	0,5
ВПБ6-26	5	ВПТ6-33	1
ВПБ6-36	2	ПВД-1	4/6,3
ВПБ6-37	3,15		

Таблица П.2.7

Предохранители свыше 15 А

Наименование	Предельный ток, А
ПВД-2	16/25
ППН-35	35
ДВП4-2	12/16
ДВП4-2В	25
ПН2-100	31,5/40/50/63/80/100
ПН2-250	80/100/125/160/200/250
ПН2-400	250/315/355/400
ПН2-630	315/500/630
ПНБ-5М 380/400	250
ПР-2/220В	60
ПРС-25-10	10
ПРС-25-16	16
ПРС-25-20	25