А.С. ГРАЧЁВ

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ ГОУВПО «Марийский государственный университет»

Электроэнергетический факультет

А.С. ГРАЧЁВ

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ

РУКОВОДСТВО ПО РЕШЕНИЮ ЗАДАЧ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Йошкар-Ола, 2009

ББК 326 УДК 621.3 Г 788

Рецензенты:

В.В. Кошкин, канд. физ.-мат. наук, доц. МарГТУ; *С.В. Волков*, канд. техн. наук, доц. МарГУ

Рекомендовано к изданию редакционно-издательским советом МарГУ

Грачёв А.С.

Г 788 Электрические аппараты: руководство по решению задач проектирования электрических аппаратов / Мар. гос. ун-т; А.С. Грачёв. – Йошкар-Ола, 2009. – 111 с.

В руководстве рассмотрены наиболее типичные задачи, возникающие при расчетах, анализе работы и проектировании электрических аппаратов. Каждое практическое занятие содержит теоретические положения по данной проблеме и перечень задач и методических рекомендаций по их решению.

Приведены необходимые для расчетов справочные данные, графики, диаграммы.

ББК 326

УДК 621.3

© Грачев А.С., 2009

© ГОУВПО «Марийский

государственный университет», 2009

ВВЕДЕНИЕ

Все нарастающие темпы повышения энергоемкости промышленности и аграрного сектора экономики требуют неуклонного роста электрических аппаратов. И здесь простым увеличением их численности вопроса не решить. Нужны новые подходы, оригинальные сберегающие технологии, свежие конструктивные решения. Такая работа может проводиться только на базе ясных представлений о физике явлений, протекающих в электрических аппаратах, и умению применять законы электротехники при их проектировании.

В ходе изучения курса «Электрические аппараты» студенты сталкиваются с вопросами решения задач проектирования электрических аппаратов, расчета отдельных конструктивных элементов, которые закрепляются в ходе практических занятий, а те вопросы, которые не удается рассмотреть в это время, закрепляются в ходе самостоятельной работы. Руководство содержит материал для оказания практической помощи в проведении расчетов отдельных элементов электрических аппаратов.

Представлен широкий круг вопросов: от расчета электродинамических усилий (ЭДУ) до проверки проводников и электрических аппаратов на термическую стойкость.

3

1. ОСНОВЫ РАСЧЕТА ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ СИЛ

1.1. Электродинамические усилия в электрических аппаратах

При КЗ в сети через токоведущую часть аппаратов могут проходить токи, в десятки раз превышающие номинальные. При взаимодействии этих токов с магнитным полем других токоведущих усилий (ЭДУ). Эти усилия стремятся деформировать как проводники токоведущих частей, так и изоляторы, на которых они крепятся. При номинальных токах эти усилия малы и ими можно пренебречь.

Электродинамической стойкостью аппарата называется его способность противостоять ЭДУ, возникающим при прохождении токов КЗ.

1.2. Методы расчета электродинамических усилий

Первый метод. ЭДУ определяется как результат взаимодействия проводника с током и магнитного поля по правилу Ампера.



Рис. 1.1. Направление ЭДУ, действующего на элемент с током

На элементарный проводник длиной *dl м*, с током *I*, *A*, находящийся в магнитном поле с индукцией *B*, *Tn*, созданной другим проводником (рис. 1.1), действует усилие

$$dF = iBdl \sin\beta$$
,

где β – угол между векторами элемента dl и индукцией B, измеряемый по кратчайшему расстоянию между ними. За направление dl принимается направление тока в элементе.

Направление индукции *B*, создаваемой другим проводником, определяется по правилу буравчика, а направление усилия – по правилу левой руки.

Второй метод основан на использовании энергетического баланса системы проводников с током. Усилие можно найти по уравнению

$$F = dW / dx$$
,

где *W* – электромагнитная энергия;

х – возможное перемещение в направлении действия усилия.

Электромагнитная энергия системы обусловлена как энергией магнитного поля каждого изолированного контура, так и энергией, определяемой магнитной связью между контурами, и для двух взаимосвязанных контуров

$$W = \frac{1}{2}L_1i_1^2 + \frac{1}{2}L_2i_2^2 + Mi_1i_2,$$

где L_1 , L_2 – индуктивности изолированных контуров;

*i*₁, *i*₂ – токи, протекающие в них;

М – взаимная индуктивность.

Первые два члена уравнения определяют энергию независимых контуров, а третий член определяет энергию, обусловленную их магнитной связью.

1.3. Усилия между параллельными проводниками

Рассмотрим бесконечно тонкие проводники конечной длины (рис. 1.2). В этом случае легко аналитически найти индукцию в любой точке пространства. Поэтому для определения усилия можно воспользоваться первым методом.



Рис. 1.2. ЭДУ между параллельными проводниками

Согласно закону Био-Савара-Лапласа элементарная индукция от элемента тока $i_1 dy$ в месте расположения элемента dx

$$dB = d\mu_0 H = \frac{\mu_0 i_1 dy}{4\pi r^2} \sin a,$$

где μ_0 – магнитная постоянная, равная $4\pi \cdot 10^{-7} \, \Gamma_{\text{H/M}}$;

a – угол между током i_1 и лучом r, проведенным от $dy \ \kappa \ dx$.

Полная индукция от проводника l_1 в месте расположения элемента dx

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} i_1 \int_0^{i_1} \frac{\sin a}{r^2} dy$$

Перейдем к переменной а:

$$y = \frac{a}{tga}; r = \frac{a}{\sin a}; dy = -\frac{a}{\sin^2 a}da.$$

После подстановки получим

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} i_1 \int_{\pi-a}^{a_1} -\frac{\sin a}{a} da = i_1 \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{\cos a_1 + \cos a_2}{a}.$$

Усилие взаимодействия между проводником I_1 и элементом dx

$$dF_{x} = Bi_{2}dx = \frac{\mu_{0}}{4\pi} \frac{\cos a_{1} + \cos a_{2}}{a} i_{1}i_{2}dx.$$

Переменной интегрирования теперь является x – координата на проводнике l_2 . Углы для каждой точки выражаются через переменную x следующим образом:

$$\cos a_1 = \frac{l_2 - x}{\sqrt{(l_2 - x)^2 + a^2}}; \quad \cos a_2 = \frac{lx}{\sqrt{x^2 + a^2}},$$

тогда

$$F = \int_{0}^{l} dF = \int_{0}^{l} Bi \sin\beta dl = \frac{10^{-7}}{a} l_{1} l_{2} \int_{0}^{l_{2}} \left[\frac{l_{2} - x}{\sqrt{(l_{2} - x)^{2} + a^{2}}} + \frac{x}{\sqrt{x^{2} + a^{2}}} \right] dx.$$

Этой формулой можно пользоваться в зависимости от отношений *а*/1.

Если $l_1 = l_2 = l$, то

$$F_{x} = 10^{-7} l_{1} l_{2} \frac{2l}{a} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{a}{l}\right)^{2}} - \frac{a}{l} \right]$$

Произведение $\frac{2l}{a} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{a}{l}\right)^2} - \frac{a}{l} \right]$, называемое коэффициен-

том контура k, зависит только от размеров проводников и их расположения. Тогда

$$F_x = 10^{-7} k i_1 i_2.$$

При нахождении ЭДУ было принято, что сечение проводников бесконечно мало и весь ток идет по их геометрической оси. В действительности сечение проводников всегда конечно. Круглая и кольцевая формы сечения проводников не влияют на ЭДУ, так как магнитные силовые линии вокруг проводников и в этом случае представляют собой окружности и можно считать, что ток сосредоточен в геометрической оси проводника. Следует отметить, что поверхностный эффект в проводниках круглого сечения не сказывается на ЭДУ, а эффект близости, смещающий токи в проводниках, вызывает увеличение ЭДУ при встречных и уменьшение – при согласованных токах.

При прямоугольной форме сечения его размеры влияют на ЭДУ, так как магнитные силовые линии около проводников являются не окружностями, а овалами. Это влияние учитывается с помощью кривых Двайта (рис. 1.3), по которым находится коэффициент формы k_{ab} , после чего значение ЭДУ находится как



$$P = 10^{-7} k k_{\phi} i_1 i_2$$

Рис. 1.3. Кривые Двайта, учитывающие влияние размеров поперечного сечения проводника

1.4. Электродинамические силы между взаимно перпендикулярными проводниками

Перпендикулярное расположение проводников часто встречается в рубильниках, мостиковых контактных системах и т.п.



Рис. 1.4. К определению электродинамической силы между перпендикулярно расположенными проводниками

Из рисунка 1.4 а, при $h \to \infty$ $F = 10^{-7} i^2 \frac{a}{r}$, и при h конечном

$$F = 10^{-7} i^2 \ln \frac{a/r}{1 + \sqrt{1 + (a/h)^2}};$$

по рисунку 1.4 б сила будет соответственно в два раза большей:

$$F = 2 \cdot 10^{-7} i^2 \ln \frac{a}{r};$$

$$F = 2 \cdot 10^{-7} i^2 \ln \frac{a / r}{1 + \sqrt{1 + (a / h)^2}}.$$

Моменты относительно точки O, действующие на проводник l $(k \rightarrow \infty)$ по рисунку 1.4 а

$$M_0 = 10^{-7} i^2 (a - r);$$

$$M_0 = 10^{-7} i^2 a \left(ln \frac{a - r}{r} + r \right)$$

Момент относительно точки *O*₁, действующий на половину проводника 1 (рис. 1.4 б)

$$M_{01} = 10^{-7} i^2 \frac{a}{2} \left(ln \frac{a}{4r} + \frac{2r}{a} \right).$$

1.5. Электродинамические силы в кольцевом витке и между кольцевыми витками

В кольцевом витке (рис. 1.5) с током *i* возникают радиальные силы f_R , стремящиеся увеличить его периметр, т.е. разорвать виток. Если считать, что сечение проводника не деформируется, то общая радиальная сила, действующая на виток, будет

$$F_{R}' = \frac{i^2}{2} \frac{dl}{dR}$$

На единицу длины витка приходится сила

$$f_{R}' = \frac{F_{R}'}{2\pi R}.$$

Для того чтобы найти силу F_R , стремящуюся разорвать виток, необходимо проинтегрировать проекции радиальных сил, действующих на четверти витка. На элемент окружности витка $Rd\varphi$ действует сила $f_R Rd\varphi$, проекция которой на ось x равна $f_R Rd\varphi \cos \varphi$ откуда

$$F_R = \int_0^{\pi/2} f_R R \cos \varphi d\varphi = f_R = \frac{i^2}{2 \cdot 2\pi} \frac{dl}{dR}$$



Рис. 1.5. Электродинамические силы в кольцевых витках

Для витка круглого сечения, при *R* >> *r*

$$L = \mu_0 R \left(ln \frac{8R}{r} - 1.75 \right)$$

И

$$F_R = \frac{i^2}{2 \cdot 2\pi} 4\pi \cdot 10^{-7} \left(ln \frac{8R}{r} - 0.75 \right) = 10^{-7} i^2 \left(ln \frac{8R}{r} - 0.75 \right).$$

Аналогично для витка прямоугольного сечения

$$L = \mu_0 R \left(ln \frac{8R}{r} - 0.5 \right);$$

$$F_R = 10^{-7} i^2 \left(ln \frac{8R}{r} + 0.5 \right).$$

Приведенные формулы для электродинамических сил применимы не только к одному витку, но и к обмоткам с любым числом витков n, занимающим данное сечение. В этом случае за значение тока следует принимать суммарное значение тока всех витков $i = ni_0$.

Значения составляющих силы взаимодействия между двумя витками определяются уравнениями:

$$\begin{split} F_{y} &\approx 10^{-7} 4 \pi i_{1} i_{2} \frac{R_{1} h}{h^{2} + c^{2}}; \\ F_{x} &\approx 10^{-7} 4 \pi i_{1} i_{2} \frac{R_{1} c}{h^{2} + c^{2}}, \end{split}$$

где $c = R_2 - R_1$; $R_2 > R_1$.

Зависимости F_x и F_y от расстояния между витками представлены на рисунке 1.5 в и г.

1.6. Электродинамические силы при переменном токе

Приведенные выше уравнения справедливы и для переменного тока, но в этом случае сила будет иметь переменное значение.

Рассмотрим силы, действующие между параллельными проводниками, сначала при однофазном токе, а затем при трехфазном.

Электродинамические силы равны $f = ci_1^2$.

При переменном токе $i = I_m \sin \omega t$ сила

$$f = c_1 I_m^2 \sin^2 \omega t = c_1 I_m^2 \frac{1 - \cos 2\omega t}{2},$$

т.е. сила меняется с частотой, в два раза большей частоты тока (рис. 1.6 а).

Силу f можно представить как сумму двух составляющих: постоянной $c_1 I_m^2 / 2$ и переменной $c_1 I_m^2 \cos 2\omega t / 2$, меняющейся с двойной частотой по закону косинуса. Так как косинус угла принимает значения от +1 до -1, то сила будет изменяться от $f = c_1 I_m^2$ до f = 0, не меняя своего знака.



Рис. 1.6. Электродинамические силы при однофазном переменном токе

В расчетах учитывается максимальное значение силы

$$F_m = c_1 I_m^2 = 2c_1 I^2.$$

Из последней формулы видно, что при переменном однофазном токе максимальное значение электродинамической силы при одном и том же токе (действующем) оказывается в два раза большим, чем при постоянном.

При переменном токе следует иметь в виду еще одно весьма важное обстоятельство. В отличие от постоянного тока, при котором максимальное значение тока КЗ равно его установившемуся значению I_{ycm} (если пренебречь изменением сопротивления за счет нагрева). При переменном токе в зависимости от момента КЗ первая амплитуда ударного тока $i_{yo,max}$ может существенно превосходить амплитудное значение установившегося тока КЗ (рис. 1.6 б).

$$i_{y\partial_{.}max} = (1 - 1.8)I_m = k_{y\partial}I_m = k_{y\partial}\sqrt{2} \cdot I.$$

Максимальное усилие будет

$$F_{y\partial.max} = c_1 I_{y\partial.max}^2 = c_1 (1.8\sqrt{2}I)^2 = c_1 6.48I^2,$$

т.е. при равном значении установившегося тока КЗ при переменном токе электродинамическая сила может быть почти в 6,5 раза большей, чем при постоянном токе.



Рис. 1.7. Электродинамические силы при трехфазном переменном токе (проводники расположены в одной плоскости)

При трехфазной сети токи в фазах будут сдвинуты на 120 электрических градусов:

$$\begin{split} i_1 &= I_m \sin \omega t = \sqrt{2} \sin \omega t; \\ i_2 &= I_m \sin(\omega t - 120) = \sqrt{2} \sin(\omega t - 120); \\ i_3 &= I_m \sin(\omega t - 240) = \sqrt{2} \sin(\omega t - 240). \end{split}$$

Рассмотрим случай, когда проводники расположены в одной плоскости (рис. 1.7 а). Проводник 1 будет взаимодействовать с проводниками 2 и 3. Пусть сила взаимодействия между проводниками 1 и 2 при единице тока равна F_{12} , а между проводниками 1 и 3 – F_{13} . Токи в фазах равны. Тогда полная сила, действующая на проводник 1, определится выражением:

$$f_{1} = F_{12}i_{1}i_{2} + F_{13}i_{1}i_{3} =$$

= 0.25 \[\left(F_{13} - F_{12}\right)\sqrt{3} \cdot \sin 2\omega t - \left(F_{13} + F_{12}\right)(1 - \cos 2\omega t)\] 2I^{2}.

В отличие от однофазного тока при трехфазном токе сила меняется не только во времени, но и по знаку. При положительных значениях $sin 2\omega t$ и $cos 2\omega t$ получим силу, притягивающую проводник 1 к двум другим. При отрицательных значениях $sin 2\omega t$ и $cos 2\omega t$ получим силу, отталкивающую проводник 1 от двух других.

Проводники обычно располагаются на равном расстоянии друг от друга. В таком случае $F_{13} = 0.5F_{12}$, и тогда в установившемся режиме (рис. 1.7 б) максимальная притягивающая сила

$$F_{1np} = 0.055 F_{12} 2I^2$$
,

а максимальная отталкивающая сила

$$F_{1om} = 0,805 F_{12} 2I^2,$$

где $F_{12} = 10^{-7} c(I)^2 = c_1(I)^2.$

Силы, действующие на проводник 3, будут такими же, как и силы, действующие на проводник 1, но обратными по направлению.

Усилия, действующие на средний проводник, F_2 определятся уравнениями, аналогичными предыдущим. Если принять силу взаимодействия при единице тока между проводниками 2 и 3 равной F_{23} , а между проводниками 2 и 1 – равной $F_{21} = F_{12}$, то при равных токах и равных расстояниях между проводниками $F_{23} = F_{21} = F_{12}$ и максимальная сила, действующая на средний проводник, определится из уравнения

$$F_2 = 0,87F_{12}2I^2.$$

Таким образом, при расположении проводников в одной плоскости сила, действующая на средний проводник, оказывается большей, чем сила, действующая на крайний проводник.

С учетом переходной составляющей, возникающей в момент K3, максимальные силы будут большими, чем приведенные выше. Максимальное отталкивающее усилие будет иметь место при K3 в момент $\varphi = -15^0$ и составит

$$F_{1np.max} = 3,24F_{12}2I^2.$$

Притягивающая сила при $\varphi = -15^{0}$ будет близка к нулю. Максимум притягивающей силы имеет место при коротком замыкании в момент $\varphi = 75^{0}$:

$$F_{1np.max} = 0,23F_{12}2I^2.$$

Значение отталкивающей силы при $\varphi = 75^{\circ}$ составит $0.75F_{12}$. Изменение сил во времени при $\varphi = -15^{\circ}$ (кривая 1) и при $\varphi = 75^{\circ}$ (кривая 2) в переходном режиме КЗ приведено на рисунке 1.7 в.

1.7. Проверка шинных конструкций на электродинамическую стойкость

Электродинамической стойкостью шинной конструкции называется свойство конструкции выдерживать без повреждений механические воздействия, создаваемые токами КЗ.

Шинная конструкция считается электродинамически стойкой, если максимальное расчетное напряжение в материале шин σ_{pacy} и максимальные расчетные нагрузки на изоляторы F_{pacy} не превосходят допустимых значений, т.е.

$$\sigma_{pacu} \leq \sigma_{\partial on};$$
$$F_{pacu} \leq F_{\partial on},$$

где σ_{don}, F_{don} – допустимые напряжения в материале и нагрузка на изолятор.

Согласно ПУЭ допустимое напряжение $\sigma_{\partial on}$ принимается равным 70 % временного сопротивления разрыву (предела прочности) материала шин σ_{μ} , т.е. $\sigma_{\partial on} = 0.7\sigma_{\mu}$.

Допустимая нагрузка на изолятор $F_{\partial on}$ принимается равной 60 % от минимальной разрушающей нагрузки F_{pasp} , приложенной к головке изолятора, т.е.

$$F_{\partial on} = 0,6F_{pasp}$$

Если центр масс поперечного сечения шины удален от вершины опорного изолятора, например, у плоской шины, поставленной на ребро (рис. 1.8), допустимая нагрузка при изгибе изолятора должна быть уменьшена в соответствии с формулой

$$F_{\partial on} = 0.6F_{pasp}H / H + h,$$

где *h*- расстояние от вершины изолятора до центра масс поперечного сечения шины;

H – расстояние от головки изолятора до опасного сечения (сечение, где наиболее вероятна поломка) изолятора.



Рис. 1.8. К определению допустимых нагрузок на изоляторы

Для современных опорных (стержневых) изоляторов 6...35 κB с внутренней заделкой арматуры (рис. 1.8 а) расстояние H примерно равно высоте изолятора H_{us} . Для изоляторов 110 κB , а также некоторых типов изоляторов 10...35 κB с внешним креплением арматуры (рис. 1.8 б) опасное сечение проходит по верхней торцевой поверхности опорного фланца, для опорных штыревых изоляторов (рис. 1.8 в) – проходит по плоскости соединения чугунного штыря и фарфорового тела.

В качестве расчетной схемы шины принимают балку, защемленную или шарнирно опертую на опоры (рис. 1.8). Различают следующие основные типы шинных конструкций и соответствующие им расчетные схемы.

1. Шинные конструкции с разрезанными шинами, длина целых (или сварных) участков которых равна длине пролета. Расчетной схемой пролета таких конструкций служит балка с шарнирным опиранием (табл. 1.1, схема 1). Обычно расчетной схеме отвечают шинные конструкции напряжением 110 кВ и выше.

Таблица 1.1

N₂	Расчетная	Расчетная Тип схема машины	Коэффициент (параметр)		
схемы	схема		<i>r</i> ₁	λ	β
1	<u>A</u> <u>R</u>	Разрезная шина с длиной целого уча- стка, равной длине пролета	3,14	8	1,00
2	<u>A</u>	Разрезная шина с длиной целого уча- стка, равной длине двух пролетов	3,93	8	1,25
3	I	Многопролетная неразрезная шина	4,73	12	1,00

Типы шинных конструкций

2. Шинные конструкции с разрезными шинами, длина которых равна длине двух пролетов. Расчетная схема пролета такой конструкции представляет собой балку с жестким опиранием (защемлением) на одной и шарнирным опиранием на другой опоре (схема 2).

Эти конструкции иногда находят применение в РУ 110-220 *кВ*, реже – до 35 *кВ*.

3. *Многопролетные конструкции с неразрезными (цельными или сварными) шинами.* Средние пролеты ошинковки отвечают расчетной схеме балки с жестким опиранием (защемлением) на обеих опорах (схема 3). Конструкции широко используются в РУ до 35 кВ.

Опоры шин (т.е. изоляторы и основания, на которых они крепятся) в расчетах принимаются упругоподатливыми или абсолютно жесткими. Как правило, опоры можно считать абсолютно жесткими (не участвующими в колебаниях при КЗ) в РУ напряжением до 35 κB включительно. В РУ напряжением 110 κB и выше расчет электродинамической стойкости шинных конструкций следует проводить с учетом упругой податливости опор (изоляторов).

1.8. Механический резонанс

Всякая механическая упругая система имеет так называемую собственную частоту колебаний. Если какая-либо сила выведет эту систему из равновесия (деформирует ее каким-либо образом, не переходя предела упругости), а затем перестанет действовать, то система будет некоторое время колебаться около своего положения равновесия. Частота этих колебаний и называется собственной частотой колебаний системы. Скорость их затухания зависит от упругих свойств и массы системы и ее деталей, а также от сил трения и не зависит от значения силы, вызвавшей колебание.

Если сила, выводящая механическую систему из равновесия, будет меняться с частотой, равной частоте собственных колебаний системы, то на деформацию одного периода будет накладываться деформация следующего периода и система будет раскачиваться со все возрастающей амплитудой, теоретически до бесконечности. Естественно, что никакая конструкция не может противостоять такой все возрастающей деформации и разрушается.

Совпадение частоты собственных колебаний с частотой изменения электродинамической силы называется механическим резонансом.

Полный резонанс наблюдается при точном совпадении частоты колебаний силы с частотой собственных колебаний конструкции и равных положительных и отрицательных амплитудах, частичный – при неполном совпадении частот и неравных амплитудах.

Для избежания механического резонанса необходимо, чтобы частота собственных колебаний конструкции отличалась от частоты изменения электродинамической силы. Лучше, когда частота собственных колебаний лежит ниже частоты изменения силы. Подбор требуемой частоты собственных колебаний можно производить различными способами. Для шин, например, этого можно добиться путем изменения длины свободного пролета.

Для подсчета собственной частоты колебаний шин рекомендуется формула:

$$f = \frac{k}{l^2} \sqrt{\frac{EJ}{q}},$$

где *I* – пролет между изоляторами, *см*;

Е-модуль упругости, *Па*;

J – момент инерции, относительно оси, перпендикулярной направлению изгиба, cm^4 ;

- *q* вес единицы длины шины, *H/см*;
- *к* коэффициент, зависящий от характера крепления шин:
 - k = 112, при жестком креплении шин и изоляторов;
 - k = 78 при свободном креплении на одной опоре и жестком — на другой;
 - k = 49 при шинах, свободно лежащих на опорах.

Общие методические указания

При расчете нагрузок на шины последние считаются достаточно длинными и концевые эффекты не учитываются. Электродинамические нагрузки, действующие на параллельные шины, распределены по длине равномерно.

Для параллельных шин, расположенных в одной плоскости, максимальные значения нагрузок при двух- и трехфазных КЗ наступают примерно через 0,01 с и равны, *H*/*м*,

$$q_{max} = z i_{y\partial}^2 / a,$$

где $z = 2 \cdot 10^{-7} H / A^2$ при двухфазном и $\sqrt{3} \cdot 10^{-7} H / A^2$ при трехфазном K3;

а -расстояние между осями шин, м;

 $i_{v\partial}$ – ударный ток КЗ, А.

Если размеры поперечного сечения шин близки к расстоянию между ними, при расчете нагрузок следует учитывать коэффициент формы. В этом случае для шинной конструкции при двухфазном КЗ, а также для проводников одной фазы, состоящей из двух элементов, при любом виде КЗ наибольшие нагрузки вычисляются как

$$q_{max} = k_{\phi} z i_{y\partial}^2 / a,$$

где k_{ϕ} – коэффициент формы, определяемый по кривым Двайта (рис. 1.3);

 $i_{y\partial}$ – ударный ток КЗ в каждом элементе (шине).

Для шин, расположенных по вершинам треугольника (в частном случае в одной плоскости), наибольшие нагрузки при трехфазном КЗ находятся по формуле:

$$k_{max} = \frac{\sqrt{3} \cdot 10^{-7}}{a} i_{yo}^2 \xi,$$

где *ξ* – коэффициент максимальной нагрузки, зависящий от взаимного расположения шин, значения которого для некоторых конструкций указаны в таблице 1.2;

а – минимальное расстояние между осями, м.

Таблица 1.2

	Фаза	Коэффициент & максимальной нагрузки			
Расположение шин		результи- рующей	изги- бающей	растяги- вающей	сжи- мающей
В одной плоскости (рис. 1.9 а)	A, C	0,93	0,93	0,00	0,00
	B	1,00	1,00	0,00	0,00
По вершинам прямоугольного	A	0,87	0,87	0,29	0,87
равнобедренного треугольни-	B	0,95	0,43	0,93	0,07
ка (рис. 1.9 б)	C	0,95	0,93	0,14	0,43
По вершинам равносторон-	A	1,00	0,94	0,25	0,75
него треугольника	B	1,00	0,50	1,00	0,00
(рис. 1.9 в)	C	1,00	0,94	0,25	0,75
По вершинам равносторонне- го треугольника (рис. 1.9 г)	A, B, C	1,00	0,50	1,00	0,00

Значения коэффициента максимальной нагрузки



Рис. 1.9. Шинные конструкции

1.9. Задачи

1. Определить электродинамическое усилие, действующее на 10 *м* прямолинейного бесконечно тонкого уединенного проводника с током КЗ $I = 50 \ \kappa A$. Проводник находится в поле земли и расположен под углом $\beta = 30^{\circ}$ к плоскости магнитного меридиана. Горизонтальная составляющая напряженности магнитного поля $H = 12,7 \ A/m$, а угол наклонения $e = 72^{\circ}$.

Решение. Действующее на проводник усилие определим из закона Ампера

$$F = iBl \sin \beta$$
,

где $B = \mu_0 H$; $\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$ Гн/м.

Тогда горизонтальная составляющая индукции земного поля $B_z = 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 12,7 = 0,16 \cdot 10^{-4} T_{\pi};$ вертикальная составляющая $B_e = B_z tge = 0,16 \cdot 10^{-4} tg72^0 = 0,49 \cdot 10^{-4} T_{\pi}.$

Определим две составляющие силы, действующие на проводник:

от горизонтальной составляющей вектора индукции

 $F_z = 0,16 \cdot 10^{-4} \cdot 50 \cdot 10^3 \cdot 0,5$ H;

и от вертикальной

$$F_e = 0.49 \cdot 10^{-4} \cdot 50 \cdot 10^3 \cdot 10 = 24.5 \ H.$$

Суммарное усилие, действующее на проводник

$$F = \sqrt{F_{\Gamma}^2 + F_B^2} = \sqrt{4^2 + 24.5^2} = 24.8 \ H.$$

Ответ: F = 24,8 H.

2. Определить значение электродинамического усилия, с которым притягиваются друг к другу два параллельных круглых, бесконечно длинных проводника, находящихся друг от друга на расстоянии $a = 1 \ m$, когда по ним кратковременно протекают токи $i_1 = 10 \ \kappa A$, $i_2 = 20 \ \kappa A$. Диаметры проводников соответственно

равны $d_1 = 10$ *мм*, $d_2 = 20$ *мм*. Расчет усилия провести на длине l = 1 *м*.

Решение. Определим усилие, действующее на *1 м* проводника. Поскольку проводники бесконечно длинные, напряженность магнитного поля на оси второго проводника от тока в первом

$$H = i_1 / (2\pi a) = 10 \cdot 10^3 / (2\pi \cdot 1).$$

Так как диаметры проводников намного меньше, чем расстояния между ними, то расчет можно вести как для бесконечно тонких проводников. Тогда усилие между проводниками

$$F = Bi_2 l \sin \gamma = 4\pi 10^{-7} \frac{10 \cdot 10^2}{2\pi} 20 \cdot 10^3 \cdot 1 \cdot 1 = 40 \ H,$$

где sin $\gamma = 1$, так как проводники лежат в одной плоскости;

$$B = \mu_0 H; \quad \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \ \Gamma_H / M.$$

Ответ: F = 40 H.

3. Определить электродинамическое усилие, действующее на проводник 1, со стороны проводника 2 (рис. 1.10), если по проводникам протекает постоянный ток $I = 12 \ \kappa A$, а длина участков соответственно $l_1 = 1 \ m$, $l_2 = 2 \ m$. Проводники круглые диаметром $d = 10 \ m$ и находятся в воздухе на достаточном удалении от ферромагнитных частей.



Рис. 1.10. Эскиз расположения проводников

Решение. Выделим элементы проводников dl_1 и dl_2 и определим элементарную силу, действующую со стороны элемента dl_2 на элемент dl_1 . Так как проводники находятся в одной плоскости, то со стороны проводника 2 на проводник 1 действует элементарная сила

$$dF_{1/2} = \frac{\mu_0 I^2}{4\pi r^2} dl_1 dl_2,$$

или для $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \Gamma_H / M$, $dF_{1/2} = 10^{-7} I^2 dl_1 dl_2 / r^2$.

Суммарная сила, действующая на проводник 1

$$dF_{1/2} = 10^{-7} I^2 \int_{d/2}^{l_1} \int_{d/2}^{l_2} \frac{\sin a}{r^2} dl_1 dl_2 = 10^{-7} I^2 \int_{d/2}^{l_1} \int_{\pi/2}^{a_1} -\frac{\sin a}{x} dx da,$$

здесь

$$r = x / \sin a; \ dl_1 = dx; \ dl_2 = dy; \ y = xctg \ a; \ dy = -\frac{x}{\sin^2 a} da.$$

После интегрирования и учитывая, что $\cos a_1 = l_2 / \sqrt{l_2^2 + x^2}$, получаем

$$dF_{1/2} = 10^{-7} I^2 ln \frac{l_1 + \sqrt{l_2^2 + (d/2)^2}}{(d/2)(l_2 + \sqrt{l_2^2 + l_1^2})} =$$
$$= 10^{-7} \cdot 12^2 \cdot 10^6 ln \frac{1 + \sqrt{2^2 + (5^2 \cdot 10^{-6})}}{5 \cdot 10^{-3}(2 + \sqrt{2^2 + 1})} = 75,2 H$$

Ответ: $dF_{1/2} = 75,2$ H.

4. Определить усилие, которое действует на проводник 3 со стороны проводников 1 и 2 (рис. 1.11), если по проводникам протекает ток $i = 100 \ \kappa A$, проводник 1 имеет бесконечную длину, а проводники 2 и 3 – соответственно $l_2 = 1 \ m$, $l_3 = 2 \ m$. Проводники круглые диаметром $d = 40 \ m$. Вычислить также момент уси-

лия относительно точки *В* и определить точку приложения равнодействующей усилия на проводник 3.



Рис. 1.11. Эскиз расположения проводников

Решение.

Напряженность поля в точке *х* проводника 3 от тока, протекающего по проводнику 1, определим на основании закона Био-Савара-Лапласа, причем, поскольку диаметры проводников значительно меньше расстояний между ними, расчет будем проводить как для бесконечно тонких проводников.

Тогда

$$H_{1x} = \frac{l_1(\cos a_1 + \cos a_2)}{4\pi l_2} = \frac{ix + \sqrt{x^2 + l_2^2}}{4\pi l_2^2 \sqrt{x^2 + l_2^2}}$$

где $\cos a_1 = x / \sqrt{x^2 + l_2^2}$; $\cos a_2 = 1$.

В точке х от проводника 2 напряженность поля

$$H_{2x} = \frac{i(\cos a_1' + \cos a_2')}{4\pi x} = \frac{i}{4\pi} \frac{l_2^2}{x\sqrt{x^2 + l_2^2}}$$

где $\cos a_1' = l_2 / \sqrt{x^2 + l_2^2}$; $\cos a_2' = 0$.

Следовательно, общая напряженность в точке х

$$H_{x} = \frac{i}{4\pi} \left[\frac{1}{l_{2}} + \frac{x}{l_{2}\sqrt{x^{2} + l_{2}^{2}}} + \frac{l_{2}}{x\sqrt{x^{2} + l_{2}^{2}}} \right]$$

Действующее на элемент dx усилие определяется как

$$dF_x = \mu_0 H_x i dx = 10^{-7} \frac{i^2}{4\pi} \left[\frac{1}{l_2} + \frac{x}{l_2 \sqrt{x^2 + l_2^2}} + \frac{l_2}{x \sqrt{x^2 + l_2^2}} \right] dx = 7360 \ H.$$

Тогда суммарное усилие на проводник 3

$$F = 10^{3} \int_{0,04}^{2} \left[1 + \frac{x}{\sqrt{x^{2} + 1}} + \frac{1}{x\sqrt{x^{2} + 1}} \right] dx.$$

Момент усилия *F* относительно точки *B*

$$M_B = \int_{0.02}^{2} x \frac{dF_x}{dx} dx = 10^3 \int_{0.02}^{2} \left[x + \frac{x^2}{\sqrt{x^2 + 1}} + \frac{1}{x\sqrt{x^2 + 1}} \right] dx = 4960 \quad H \cdot M.$$

С другой стороны $M_B = Fl$.

Тогда расстояние от точки приложения равнодействующего усилия *F* будет равно

$$L = M_{R} / F = 4960 / 7360 = 0,674$$
 м.

5. Определить электродинамическое усилие, действующее между параллельно расположенными шинами (рис. 1.12) если $I_1 = 10 \ \kappa A$, $I_2 = 15 \ \kappa A$, $l_1 = 1 \ m$, $l_2 = 1,5 \ m$, $a = 0,5 \ m$.



Рис. 1.12. Параллельно расположенные проводники

Решение. Электродинамическое усилие определим по формуле $F_{1/2} = \mu_0 I_1 I_2 k_{1/2} / 4\pi$. Из рисунка 1.12 коэффициент контура электродинамических усилий

$$k_{1/2} = [d_1 + d_2 - (S_1 + S_2)] = 2(1,35 - 0,556) / 0,5 = 3,17;$$

для воздуха $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^7 \ \Gamma \text{H} / \text{ M}.$

Тогда
$$F_{1/2} = 10^{-7} \cdot 10 \cdot 10^3 \cdot 15 \cdot 10^3 \cdot 3,17 = 47,6$$
 H.

Ответ: $F_{1/2} = 47,6$ H.

6. Определить электродинамическое усилие, действующее на 1 *м* круглого проводника диаметром d = 20 *мм*. Проводник расположен на расстоянии a/2 = 10 *см* вдоль ферромагнитной стенки и по нему протекает ток I = 1000 *А*.

Решение. Так как диаметр проводника значительно меньше, чем расстояние до ферромагнитной стенки, то решению следует подходить, как и в случае бесконечно тонкого проводника. Методом зеркального изображения найдем электродинамическое усилие, которое действует между данным проводником и его зеркальным изображением относительно поверхности ферромагнитной стенки с тем же током *I*.

Тогда

$$F = \mu_0 I^2 l / 2\pi a = 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 10^6 / 2\pi \cdot 0.2 = 1.0 \ H,$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ *Гн/м;* $a = 2 \cdot 10 \cdot 10^{-2} = 0.2$ *м*.

Ответ: F = 1,0 H.

7. Определить электродинамическое усилие, возникающее между двумя витками цилиндрического однослойного реактора, имеющего радиус $R = 1 \ m$. Витки имеют шаг $h = 10 \ m$. По реактору протекает ток КЗ $I = 50 \ \kappa A$.

Решение. Для решения задачи воспользуемся формулой

$$F_g = dW / dg,$$

где $W = I^2 M + W_{co\delta}$ – полная электромагнитная энергия системы; g – возможное перемещение в направлении действия усилия, т.е. dg = dh;

 $W_{co\delta}$ — часть электромагнитной энергии, обусловленная собственной индуктивностью витков. При изменении координаты *g* остается неизменным $W_{co\delta}$, поэтому из формулы

$$F_h = I^2 \frac{dM}{dh}.$$

Если h = 0,4R (по условию задачи), то значения индуктивностей и взаимоиндуктивностей контуров при постоянном токе и низкой частоте найдем из таблицы 1.3.

$$M = \mu_0 R [ln(8R / h) - 2].$$

Тогда

$$F_h = -I^2 \mu_0 \frac{R}{h} = -50^2 \cdot 10^6 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} / 10 \cdot 10^{-3} = -3140 H.$$

Ответ: F = 3140 H.

8. Определить электродинамические усилия, стремящиеся разорвать витки цилиндрического реактора, имеющего радиус R = 1 *м*. Витки имеют шаг h = 10 *мм*. По реактору течет ток K3 I = 50 *кА*. Определить также электродинамические усилия, сжимающие проводники, изготовленные из круглого провода, радиус которого r = 10 *мм*.

Решение. Полная электромагнитная энергия витков определяется как

$$W = I_1 I_2 M + 0.5 L_1 I^2 + 0.5 L_2 I^2$$
,

где взаимная индуктивность M и собственная индуктивность витков для R >> r определяются из таблицы 1.3;

$$L_1 = L_2 = L = \mu_0 R \left[ln (8R / r) - \frac{7}{4} \right]$$
 – собственная индуктивность
витков для $R >> r$;
 $I_1 = I_2 = I$, тогда

$$W = I^{2} \mu_{0} R \left[ln \frac{8R}{r} + ln \frac{8R}{r} - \frac{15}{4} \right].$$

Таблица 1.3

Значения индуктивности (взаимоиндуктивности)

№ п/п	Эскизы контуров	Индуктивность или взаимоиндуктивность	Примечание
1	2r	$L = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \left(\frac{2l}{r} - \frac{3}{4} \right)$	Провод прямо- линейный круг- лого сечения дли- ной <i>I</i> . Второй провод беско- нечно удален
2		$L = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \left(ln \frac{2l}{a+b} + \frac{1}{2} \right)$	То же, но пря- моугольного сечения
3	$\downarrow^{2r}_{+} \downarrow^{2r}_{-} \downarrow^{2r}_{+}$	$L = \frac{\mu_0 l}{\pi} \left(ln \frac{d}{r} + \frac{1}{4} \right)$	Двухпроводная линия длины I
4	+ ^{2r} $+R$ R R R R R R R R R	При любых <i>R</i> и <i>r</i> $L = \mu_0 R \left(ln \frac{8R}{r} - \frac{7}{4} + \frac{r^2}{8R^2} \left(ln \frac{8R}{r} + \frac{1}{3} \right) \right)$ При <i>R</i> >> <i>r</i> $L = \mu_0 R \left(ln \frac{8R}{r} - \frac{7}{4} \right)$	Круговое кольцо круглого сече- ния
5		$L = \mu_0 R \left(ln \frac{8R}{a+r} - \frac{1}{2} \right)$	Круговое кольцо прямоугольного сечения
6	$\begin{array}{c} & & & \\ & & & & \\ & & & \\ & & & & \\ & & & & \\ & & & & \\ & & & & \\ & & & & \\ & & & & \\ & & & & \\ & & & & \\ & & & & \\ & & & & \\ & & & & \\ & & & & \\ & & & & \\ & & & & \\ & & & & \\ & & & & \\ & & & & \\ & & & & \\ & & & & \\$	$M = \mu_0 R_1 \left(ln \frac{8R_1}{\sqrt{h^2 + (R_2 - R_1)^2}} - 2 \right)$	Два круговых кольца, располо- женных в парал- лельных плос- костях

Доля энергии, приходящаяся на один виток, будет 0,5W. При g = R усилие, разрывающее виток,

$$F_{R} = \frac{dW}{dR} = \frac{1}{2}I^{2}\mu_{0} \left[ln\frac{8R}{r} + ln\frac{8R}{r} - \frac{15}{4} \right] =$$

= $\frac{1}{2}50^{2} \cdot 10^{6} \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot \left(ln\frac{8}{10^{-2}} + ln\frac{8}{10^{-2}} - \frac{15}{4} \right) = 11000 \ H.$

Эта сила равномерно распределена по дуге окружности витка. Сила же, стремящаяся разорвать виток, $F = F_R / 2\pi = 1750 \ H$. Сила, сжимающая проводник в направлении его радиуса, определяется при g = r:

$$F_{\gamma} = \frac{dW}{dr} = \frac{I^2 \mu_0 R}{-2r} = -0.5 \cdot 50^2 \cdot 10^6 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 1\frac{1}{10^{-2}} = -157000 \ H.$$

Эта сила равномерно распределена по всей поверхности витка.

Ombem: F = 1750 H; $F_{\gamma} = 157000 H$.

9. Определить усилие, разрывающее виток прямоугольного сечения, размер которого $a \cdot b = 10 \times 20$ *мм*, средний радиус витка R = 1,0 *м*. По витку протекает ток I = 20 *кА*. Вычислить также давления, с которым сжимаются горизонтальные и вертикальные грани поперечного сечения.

Решение. Индуктивность витка радиуса *R* с прямоугольным поперечным сечением $L = \mu_0 R \left(ln \frac{8R}{a+b} - \frac{1}{2} \right)$ (см. табл. 1.3). Тогда усилие, разрывающее виток, определяется

$$F = \frac{1}{4\pi} I^2 \frac{dL}{dR} = \frac{1}{4\pi} I^2 \mu_0 \left(ln \frac{8R}{a+b} + \frac{1}{2} \right) =$$

= $\frac{1}{4\pi} 4 \cdot 10^8 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \left(ln \frac{8 \cdot 1}{30 \cdot 10^{-3}} + \frac{1}{2} \right) = 244 \ H.$



Давление, действующее на грань шириной а

$$p_{a} = \frac{1}{2\pi R \cdot 2a} \frac{I^{2}}{2} \frac{dL}{da} = -\frac{I^{2}}{8\pi Ra} \frac{\mu_{0}R}{a+b} =$$
$$= -\frac{20^{2} \cdot 10^{6} \cdot 4\pi 10^{-7} \cdot 1}{8\pi \cdot 1 \cdot 10 \cdot 10^{-3} (10+20) 10^{-3}} = -6,68 \cdot 10^{4} H / M^{2} \cdot 10^{-3} H^{2} \cdot 10^{-3} H^{2}$$

Давление, действующее на грань шириной b

$$p_{b} = \frac{1}{2\pi R \cdot 2b} \frac{I^{2}}{2} \frac{dL}{db} = -\frac{I^{2}}{8\pi Rb} \frac{\mu_{0}}{a+b} =$$
$$= -\frac{20^{2} \cdot 10^{6} \cdot 4\pi 10^{-7}}{8\pi \cdot 1 \cdot 20 \cdot 10^{-3} (10+20) 10^{-3}} = -3.33 \cdot 10^{4} H / M^{2}$$

Omeen: $F = 244 \ H; \ p_a = 6,68 \cdot 10^4 \ H / m^2;$ $p_b = 3,33 \cdot 10^4 \ H / m^2.$

10. Определить усилие, с которым круглый проводник длиной l = 1 *м* и с током I = 1500 *А* притягивается к ферромагнитной стенке, если он находится от нее на удалении a = 20 *см*. Ферромагнитная стенка имеет бесконечную магнитную проницаемость. Диаметр проводника 2*r* = 10 *мм*. Вычислить также усилие, сжимающее проводник.

Решение. Если проводники расположены вдоль ферромагнитной стенки, то при расчете можно воспользоваться методом зеркальных отображений. Следовательно, индуктивность провода, расположенного вдоль ферромагнитной стенки на расстоянии a, равна индуктивности однофазной линии с проводами, расположенными на расстоянии b = 2a, т.е. для 1 m длины провода

$$L = \frac{\mu_0}{\pi} \left(ln\frac{b}{r} + \frac{1}{4} \right).$$

Тогда усилие, действующее на проводник, определится из формулы

$$F_B = \frac{I^2}{2} \frac{dL}{db} = \frac{I^2}{2} \frac{\mu_0}{\pi} \frac{1}{b} = \frac{1500^2}{2} \cdot \frac{4\pi \cdot 10^{-7}}{\pi} \cdot \frac{1}{2 \cdot 0,2} = 1,12 \ H.$$

Усилие, сжимающее проводник,

$$F_{\Gamma} = \frac{I^2}{2} \frac{dL}{dr} = \frac{I^2}{2} \frac{\mu_0}{\pi} \left(-\frac{1}{r}\right) = \frac{1500^2}{2} \cdot \frac{4\pi \cdot 10^{-7}}{\pi} \cdot \frac{1}{0,01} = -45 \ H.$$

Ответ: $F_B = 1,12$ *H*; $F_{\Gamma} = -45$ *H*.

11. Определить наибольшие результирующие и изгибающие электродинамические нагрузки при трехфазном КЗ, действующие на шины, расположенные в одной плоскости. Расстояние между шинами a = 0,4 *м*, ударный ток КЗ $i_{vo} = 50$ кА.

Решение. Для шин, расположенных в одной плоскости (рис. 1.9 а), расчетной является фаза *B*. В этой фазе $\zeta = 1$ (а для крайних фаз он составляет 0,93) (табл. 1.2), поэтому наибольшая на-грузка $q_{max} = \frac{\sqrt{3} \cdot 10^{-7}}{0.4} 50^2 \cdot 10^6 = 1082.5 \ H / M.$

Коэффициент изгибающих нагрузок $\zeta = 1$, $q_{max.usc} = 1082,5 H / M$.

12. Определить наибольшие результирующие и изгибающие электродинамические нагрузки при трехфазном КЗ, действующие на шины, расположенные по вершинам прямоугольного равно-

бедренного треугольника. Расстояние между шинами a = 0,4 *м*, ударный ток КЗ $i_{vol} = 50$ кA.

Решение. Для шин, расположенных по вершинам прямоугольного равнобедренного треугольника (рис. 1.9 б). Коэффициент ξ для шины фазы *A* равен 0,87, шин фаз *B* и *C* – 0,93 (табл. 1.2). Таким образом, результирующие нагрузки будут больше в фазах *B*

и *C*, поэтому наибольшая нагрузка $q_{max} = \frac{\sqrt{3} \cdot 10^{-7}}{0.4} 50^2 \cdot 10^6 \cdot 0.93 =$

1093,5 Н/м.

Коэффициент изгибающих нагрузок $\zeta = 0.93$, $q_{max.use} = 1017 \ H$ / м.

13. Определить наибольшие результирующие и изгибающие электродинамические нагрузки при трехфазном КЗ, действующие на шины, расположенные по вершинам равностороннего треугольника. Расстояние между шинами a = 0,4 *м*, ударный ток КЗ $i_{yo} = 50$ кА.

Ombem: $q_{max} = 1082.5 H / M. q_{max} = 1017 H / M.$

Вывод: наименьшие результирующие и изгибающие электродинамические нагрузки имеют место при расположении шин по вершинам прямоугольного равнобедренного треугольника.

14. Определить наибольшие электродинамические нагрузки на прямоугольные шины, расположенные на ребро, при двухфазном КЗ. Сечение шин $80 \times 8 \ \text{мм}$, ударный ток КЗ равен $i_{yo} = 20 \ \kappa A$, расстояние между осями шин принято 160, 80, 48, 32, 16 $\ \text{мм}$.

Решение. По кривым (рис. 1.3) найдем коэффициент формы для шины прямоугольного сечения при отношении толщины к ее высоте $\frac{b}{h} = \frac{8}{80} = 0,1$. Предварительно вычислим отношение (a-b)/(h+b).

Результаты сведем в таблицу 1.4.

Таблица 1.4

а, мм	(a-b)/(h+b)	k_{ϕ}	q _{max} , Н/м
160	1,72	0,98	490
80	0,82	0,90	900
48	0,45	0,75	1250
32	0,27	0,65	1625
16	0,09	0,38	1900

Результаты вычислений

Находим значения максимальных нагрузок. При *a*, равных 160,16 *мм*, они составляют соответственно

$$q_{max} = k_{\phi} Z \frac{i_{y\partial}^2}{a} = 0.98 \frac{2 \cdot 10^{-7}}{0.160} 20^2 \cdot 10^6 = 490 \ H / \text{M};$$
$$q_{max} = k_{\phi} Z \frac{i_{y\partial}^2}{a} = 0.38 \frac{2 \cdot 10^{-7}}{0.016} 20^2 \cdot 10^6 = 1900 \ H / \text{M}.$$

Вывод: при малых расстояниях между плоскими шинами коэффициент формы существенно влияет на электродинамические нагрузки. Например, при уменьшении расстояния между полосами шин в десять раз нагрузки возрастают только в четыре раза.

15. Дано: ток КЗ составляет 20 кА; постоянная времени апериодической составляющей тока 0,05 с. Шины расположены горизонтально, расстояние между фазами a = 0,6 м, расстояние между изоляторами l = 1,3 м. Шины алюминиевые, трубчатые D/d = 70 мм/64 мм. Опорные изоляторы с минимальной разрушающей нагрузкой $P_{pasp} = 3675$ H и высотой H = 0,375 м. Номинальное напряжение 35 кВ. Шины имеют жесткое крепление в изоляторах.
Решение. Для такой задачи максимальный игзибающий момент в месте крепления:

$$M = pl^2 / 12,$$

где *р* – нагрузка на единицу длины шины, *H/м*;

l – длина пролета.

Максимальное напряжение в материале шины

$$\sigma_{max} = \frac{pl^2}{12W},$$

где W – момент сопротивления изгибу, M^3 ,

$$W = \frac{\pi \left(D^4 - d^4 \right)}{32D} = 0.85 \cdot 10^{-5} \ \text{m}^3.$$

Нагрузка, действующая на изоляторы, $P_{\mu_3} = pl$.

Условия механической прочности шин и изоляторов: $\sigma_{max} <_{maxdon} = 0,7\sigma_{pasp}$ Для алюминия марки АО $\sigma_{pasp} = 117 \cdot 10^6$ Па. Для изоляторов

$$P_{u_3} < P_{pa_{3p}}H / H'$$

где *H*['] – расстояние от основания изолятора до центра тяжести поперечного сечения шины, *м*.

Частота колебаний 1-й гармоники Н

$$f_1 = \frac{r_1}{2\pi l^2} \sqrt{\frac{EJ}{m}}.$$

Подставив значения $r_1 = 4,73$ — корень характеристического уравнения 1-й гармоники свободных колебаний шин $(r_2 = 10,996); l = 1,3 m; E = 7 \cdot 10^{10} H / m^2; m = s\delta = 1,7 \kappa r/m,$ где m — масса шины на единицу длины; $s = 6,31 \cdot 10^{-4} m^2$ — сечение шины, $\delta = 2700 \kappa r / m^3$ — плотность; J — момент инерции круглой шины, $J = \pi (D^4 - d^4) / 64 = 3 \cdot 10^{-7} m^4$, получим $f_1 = 234 \Gamma u$.

Поскольку полученное значение частоты больше 100 Гц, явление резонанса можно не учитывать

$$p = 1,02kk_{\phi} \frac{i_{y\partial}^2}{l} 10^{-7}.$$

Поскольку l >> a, можно принять k = 21/a. Для круглых проводников $k_{\phi} = 1$. Ударный ток $i_{\nu\phi} = 1,8\sqrt{2} \cdot 20 \cdot 10^3 = 50,8 \ \kappa A$;

$$p = 880 \ H / M;$$

$$\sigma_{max} = \frac{pl^2}{12W} = \frac{880 \cdot 1.3^2}{12 \cdot 0.85 \cdot 10^{-5}} = 145.5 \cdot 10^5 < 117 \cdot 10^6,$$

$$P_{u_3} = pl = 880 \cdot 1.3 = 1142 \ H < 0.6 \frac{P_{pa3p}H}{H'} < 0.6 \cdot 3675 \cdot 0.375 / 0.407 = 2010 \ H.$$

Таким образом, конструкция шин выполнена с запасом по механической прочности.

16. Определить наибольшие нагрузки на изоляторы и наибольшие напряжения в материале шин жесткой ошинковки ОРУ 110 кВ при ударном токе КЗ 50 кА. Вычислить наибольший допустимый ударный ток КЗ по условию электродинамической стойкости этой конструкции для решения вопроса о возможности сохранения установленных изоляторов и шин при расширении распределительного устройства и увеличении уровня токов КЗ.

Трубчатые шины кольцевого сечения внешним диаметром $D = 90 \, \text{мм}$, внутренним $d = 80 \, \text{мм}$ изготовлены из алюминиевого сплава марки 1915Т (модуль упругости $E = 7 \cdot 10^{10} \, H / \, \text{m}^2$; плотность $j = 2770 \, \kappa c / \, \text{m}^3$). Конструкция смонтирована из разрезных шин. Длина целого участка равна длине пролета $l = 9 \, \text{м}$. Фазы расположены в одной горизонтальной плоскости. Расстояние между осями шин смежных фаз $a = 1,4 \, \text{м}$.

17. Определить величину электродинамического усилия, возникающего между двумя расположенными параллельно друг

другу шинами прямоугольного сечения между двумя расположенными параллельно друг другу шинами прямоугольного сечения $h \cdot b = 100 \cdot 10$ мм на длине l = 2 м. Расстояние между осями шин a = 20 мм, по ним протекает ток КЗ I = 54 кА. Шины находятся в воздухе вдали от ферромагнитных частей, и ток по их сечению распределен равномерно. При решении задач учесть влияние поперечных размеров на величину электродинамического усилия. Шины расположены широкими сторонами друг к другу.

Решение. Величина электродинамического усилия определяется по формуле

$$F = 2 \cdot 10^{-7} k_{\phi} I^2 / a.$$

Для данного случая расположения проводников величина

$$(a-b)/(b+h) = (20-10)/(10+100) = 0,09; b/h = 10/100 = 0,1.$$

Тогда из рисунка 1.3 коэффициент формы $k_{\phi} = 0,44$. Следовательно,

$$F = 2 \cdot 10^{-7} \cdot 0,44 \cdot 54^2 \cdot 10^4 \cdot 2 / (20 \cdot 10^{-3}) = 257000 \ H.$$

Ответ: F = 257000 H.

18. Определить усилие, действующее между двумя круговыми витками 1, 2 (рис. 1.13), если по виткам протекают токи $I_1 = 20 \ \kappa A$, $I_2 = 15 \ \kappa A$. Радиусы витков $R_1 = 0.5 \ m$, $R_2 = 1 \ m$; диаметры проводников, из которых изготовлены витки, $d_1 = d_2 = 20 \ m$. Расстояние между витками, находящимися в воздухе, $h = 0.5 \ m$. Вычислить усилия, разрывающие витки, и давления, сжимающие проводники, а также определить направления усилий.

Решение. Если $h \approx R$, то для двух витков взаимная индуктивность равна

$$M = \mu_0 R_1 \left[ln \frac{R_1}{h^2 + (R_2 - R_1)^2} - 2 \right].$$



Рис. 1.13. Эскиз расположения витков

Тогда вертикальная составляющая усилия между витками в соответствии с f = dW / dg,

где W – электромагнитная энергия системы, Дж;

g – обобщенная координата, будет равна

$$F_{h} = I_{1}I_{2}dM / dh = -I_{1}I_{2}\mu_{0}h [h^{2} + (R_{2} - R_{1})^{2}] =$$

= -10 \cdot 10^{3} \cdot 15 \cdot 10^{3} \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 0,5 / [0,5^{2} + (1-0,5)^{2}] = -94,3 H.

Знак минус свидетельствует о том, что с уменьшением расстояния взаимная индуктивность увеличивается.

Радиальные составляющие усилий

$$F_{R1}' = I_1 I_2 dM / dR_1 = I_1 I_2 \mu_0 \left[ln \frac{8R_1}{\sqrt{h^2 + (R_2 - R_1)^2}} - 1 + \frac{R_1 (-R_2 - R_1)}{h^2 + (R_2 - R_1)^2} \right] =$$

= 10.10³.15.10³.4\pi.10⁻⁷ \left[ln \frac{8.0,5}{\sqrt{0,5^2 + (1-0,5)^2}} - 1 + \frac{0,5(-1-0,5)}{0,5^2 + (1-0,5)^2} \right] = 232 H;

$$F_{R2}' = I_1 I_2 dM / dR_2 = I_1 I_2 \mu_0 R_1 \left[-\frac{R_2 - R_1}{h^2 + (R_2 - R_1)^2} \right] =$$

= -10 \cdot 10^3 \cdot 15 \cdot 10^3 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 0,5 \left[\frac{(1 - 0,5)}{0,5^2 + (1 - 0,5)^2} \right] = -94,3 \ H.

Знак минус свидетельствует о том, что данная сила сжимает виток 2.

Усилия, обусловленные собственными индуктивностями контуров, определяются по формуле

$$f = \frac{i_1^2}{2} \frac{dL_1}{dg} + \frac{i_2^2}{2} \frac{dL_2}{dg} + i_1 i_2 \frac{dM_{12}}{dg},$$

где *L* – индуктивность системы, *Гн*.

$$F_{1}' = \frac{I_{1}^{2}}{2} \frac{dL_{1}}{dR_{1}} = \frac{1}{2} I_{1}^{2} \mu_{0} \left(ln \frac{8R_{1}}{r_{1}} - 0.75 \right) =$$

$$\frac{1}{2} 10^{2} \cdot 10^{6} \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \left(ln \frac{8 \cdot 0.5}{0.01} - 0.75 \right) = 330 \ H;$$

$$F_{2}' = \frac{I_{2}^{2}}{2} \frac{dL_{2}}{dR_{2}} = \frac{1}{2} I_{2}^{2} \mu_{0} \left(ln \frac{8R_{2}}{r_{2}} - 0.75 \right) =$$
$$= \frac{1}{2} 15^{2} \cdot 10^{6} \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \left(ln \frac{8 \cdot 1}{0.01} - 0.75 \right) = 840 H.$$

Тогда результирующее усилие, разрывающее витки,

$$F_{R1} = F'_{R1} + F''_{R1} = 232 + 330 = 562 H;$$

$$F_{R2} = F'_{R2} + F''_{R2} = -94,3 + 840 = 745,7 H.$$

Эти усилия равномерно распределены по дугам окружностей соответствующих витков.

Усилия, стремящиеся разорвать витки,

$$F_1 = F_{R1} / 2\pi = 562 / 2\pi = 89,4 H;$$

$$F_2 = F_{R2} / 2\pi = 745,7 / 2\pi = 119 H.$$

Для определения усилий, сжимающих витки, необходимо вычислить

$$F_{\gamma 1} = \frac{I_1^2}{2} \frac{dL_1}{dr_1} = -\frac{1}{2} I_1^2 \mu_0 \frac{R_1}{r_1} = -\frac{1}{2} 10^2 \cdot 10^6 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{0.5}{0.01} = -3140 \ H;$$

$$F_{\gamma 2} = \frac{I_2^2}{2} \frac{dL_2}{dr_2} = -\frac{1}{2} I_2^2 \mu_0 \frac{R_2}{r_2} = -\frac{1}{2} 15^2 \cdot 10^6 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{1}{0,01} = -14400 \ H.$$

Эти усилия распределены равномерно по боковым поверхностям витков. Здесь знаки минус свидетельствуют о том, что происходит сжатие проводников. Следовательно, давления, действующие на боковые поверхности проводников,

$$p_{1} = F_{\gamma 1} / (2\pi r_{1} \cdot 2\pi R_{1}) = 3140 (4 \cdot 3.14^{2} \cdot 0.01 \cdot 0.5) = 15900 \ H / M^{2};$$

$$p_{2} = F_{\gamma 2} / (2\pi r_{2} \cdot 2\pi R_{2}) = 14400 (4 \cdot 3.14^{2} \cdot 0.01 \cdot 1) = 36700 \ H / M^{2}.$$

Ответ: $F_h = 94,3 H$; $F_1 = 89,4 H$; $F_2 = 119 H$;

 $p_1 = 15900 \ H / m^2$; $p_2 = 36700 \ H / m^2$.

19. Определить усилие, сжимающее витки однослойной катушки индуктивности, имеющей N = 20 витков, размеры которой r = 100 мм, D = 500 мм (рис. 1.14), если по катушке протекает ток I = 1,0 кА. Вычислить также усилие, стремящееся разорвать катушку.



Рис. 1.14. Эскиз однослойной катушки индуктивности

Решение. Индуктивность однослойной катушки определяется по формуле:

$$L = \frac{\mu_0}{2} N^2 D \left[\left(1 + \frac{r^2}{24D^2} \right) ln \frac{4D}{r} - \frac{1}{2} + \frac{43r^2}{288D^2} \right]$$

Тогда усилие, сжимающее витки катушки, на основании формулы

$$f = \frac{i_1^2}{2} \frac{dL_1}{dg} + \frac{i_2^2}{2} \frac{dL_2}{dg} + i_1 i_2 \frac{dM_{12}}{dg}$$

равно

$$F_{\gamma} = \frac{1}{2}I^{2}\frac{dL}{dr} = \frac{1}{4}\mu_{0}N^{2}DI^{2}\left[\left(1 + \frac{r^{2}}{24D^{2}}\right)\left(-\frac{1}{r}\right) + \frac{2r}{24D^{2}}ln\frac{4D}{r} + \frac{43\cdot 2r}{288D^{2}}\right] = 0.25\cdot 4\pi\cdot 10^{-7}\cdot 20^{2}\cdot 0.5\cdot 10^{6}\times \left[\left(1 + \frac{100^{2}\cdot 10^{-6}}{24\cdot 0.5^{2}}\right)\left(-\frac{1}{100\cdot 10^{-3}}\right) + \frac{2\cdot 100\cdot 10^{-3}}{24\cdot 0.5^{2}}ln\frac{4\cdot 0.5}{100\cdot 10^{-3}} + \frac{43\cdot 2\cdot 100\cdot 10^{-3}}{288\cdot 0.5^{2}}\right] = 6120 \ H.$$

Это усилие равномерно распределено по дугам окружностей, ограничивающих витки катушки.

Усилие, разрывающее катушку, равно

$$F_{D} = \frac{1}{2}I^{2}\frac{dL}{dD} = \frac{1}{4}\mu_{0}N^{2}I^{2}\left[\left(1 - \frac{r^{2}}{24D^{2}}\right)ln\frac{4D}{r} + 0.5 + \frac{r^{2}}{24D^{2}} - \frac{43 \cdot r^{2}}{288D^{2}}\right] = 0.25 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 20^{2} \cdot 10^{6} \times \left[\left(1 - \frac{100^{2} \cdot 10^{-6}}{24 \cdot 0.5^{2}}\right)ln\frac{4 \cdot 0.5}{100 \cdot 10^{-3}} + 0.5 + \frac{100^{2} \cdot 10^{-6}}{24 \cdot 0.5^{2}} - \frac{43 \cdot 100^{2} \cdot 10^{-6}}{288 \cdot 0.5^{2}}\right] = 440 H.$$

Это усилие распределено по окружности радиуса D / 2.

Ответ: F = 6120 H; $F_D = 440$ H.

20. Вычислить усилие, стремящееся разорвать однослойную катушку дискового реактора. Катушка состоит из 10 витков и по ней протекает ток I = 800 A, ее внутренний диаметр $D_{en} = 320 \ \text{мм}$, наружный $D_{eap} = 480 \ \text{мм}$. Определить также усилие, сжимающее витки катушки.

21. Определить усилие, с которым отталкиваются друг от друга два дисковых реактора, если по ним протекают токи $I_1 = 80 \ \kappa A$, $I_2 = 120 \ \kappa A$, расстояние между реакторами $x = 20 \ cm$, размеры реакторов одинаковы: $r = 15 \ cm$, $D = 80 \ cm$. Реакторы выполнены из проводников прямоугольного поперечного сечения, имеют по 25 витков, высота поперечного сечения проводников намного меньше, чем расстояние между реакторами.

22. Вычислить усилие, стремящееся сжать витки однослойной катушки индуктивности, имеющей 30 витков прямоугольного провода. По катушке протекает ток I = 500 A, а ее размеры $r = 50 \ \text{мм}, \ D = 300 \ \text{мм}.$

23. Определить усилие, действующее на виток в направлении изменения его радиуса, если по витку протекает ток $I = 15 \ \kappa A$, виток имеет прямоугольное поперечное сечение с размерами $a \times b = 5 \times 10 \ MM$, а его средний радиус $R = 0.5 \ M$.

24. Определить усилие, с которым две одинаковые плоские катушки (рис. 1.15) притягиваются друг к другу, если по ним протекают токи $I_1 = I_2 = 100 \ A$. Расстояние между катушками $x = 15 \ cm$, размеры катушек $r = 10 \ cm$, $D = 50 \ cm$, каждая катушка имеет по N = 20 витков провода.



Рис. 1.15. Эскиз расположения плоских катушек

Решение. Взаимная индуктивность двух плоских катушек определяется по формуле:

$$M = \frac{1}{4}\mu_0 N^2 D \begin{bmatrix} \left(1 + \frac{3}{4}\frac{x^2}{D^2} + \frac{r^2}{24D^2}\right) ln \frac{16D^2}{x^2 + r^2} + \left(1 + \frac{5}{8}\frac{x^2}{D^2}\right) \frac{x^2}{r^2} ln \frac{x^2 + r^2}{x^2} - \\ -4 \left(1 + \frac{x^2}{D^2}\right) \frac{x}{r} arctg \frac{r}{x} - 1 + \frac{37}{24}\frac{x^2}{D^2} \end{bmatrix}$$

Тогда усилие, действующее между катушками, на основании формулы

$$f = \frac{i_1^2}{2} \frac{dL_1}{dg} + \frac{i_2^2}{2} \frac{dL_2}{dg} + i_1 i_2 \frac{dM_{12}}{dg}$$

определится, как

$$F_{x} = I_{1}I_{2}\frac{dM}{dx} = I^{2}0,25\mu_{0}N^{2}D + \frac{16D^{2}}{x^{2}+r^{2}} - \left(1 + \frac{3}{4}\frac{x^{2}}{D^{2}} + \frac{1}{24}\frac{r^{2}}{D^{2}}\right)\frac{2x}{x^{2}+r^{2}} + \left(1 + \frac{2x}{r^{2}} + \frac{5}{8}\frac{4x^{3}}{D^{2}r^{2}}\right)ln\frac{x^{2}+r^{2}}{x^{2}} + \left(1 + \frac{5}{8}\frac{x^{2}}{D^{2}}\right)\frac{x^{2}}{r^{2}}\left(\frac{2x}{x^{2}+r^{2}} - \frac{2}{x}\right) - \left(4\left(\frac{1}{r} + \frac{2x^{2}}{D^{2}r}\right)arct\frac{r}{x} - 4\left(1 + \frac{2x^{2}}{3D^{2}}\right)\frac{x}{x^{2}+r^{2}} + \frac{37}{12}\frac{x}{D^{2}}\right)$$

$$= 0,25 \cdot 10^{4} \cdot 4 \cdot 10^{-7} \cdot \pi \cdot 400 \cdot 0,5$$

$$= 0,25 \cdot 10^{4} \cdot 4 \cdot 10^{-7} \cdot \pi \cdot 400 \cdot 0,5$$

$$= 0,25 \cdot 10^{4} \cdot 4 \cdot 10^{-7} \cdot \pi \cdot 400 \cdot 0,5$$

$$= 0,25 \cdot 10^{4} \cdot 4 \cdot 10^{-7} \cdot \pi \cdot 400 \cdot 0,5$$

$$= 0,25 \cdot 10^{4} \cdot 4 \cdot 10^{-7} \cdot \pi \cdot 400 \cdot 0,5$$

$$= 0,25 \cdot 10^{4} \cdot 4 \cdot 10^{-7} \cdot \pi \cdot 400 \cdot 0,5$$

$$= 0,25 \cdot 10^{4} \cdot 4 \cdot 10^{-7} \cdot \pi \cdot 400 \cdot 0,5$$

$$= 0,25 \cdot 10^{4} \cdot 4 \cdot 10^{-7} \cdot \pi \cdot 400 \cdot 0,5$$

$$= 0,25 \cdot 10^{4} \cdot 4 \cdot 10^{-7} \cdot \pi \cdot 400 \cdot 0,5$$

$$= 0,25 \cdot 10^{4} \cdot 4 \cdot 10^{-7} \cdot \pi \cdot 400 \cdot 0,5$$

$$= 0,25 \cdot 10^{4} \cdot 4 \cdot 10^{-7} \cdot \pi \cdot 400 \cdot 0,5$$

$$= 0,25 \cdot 10^{4} \cdot 4 \cdot 10^{-7} \cdot \pi \cdot 400 \cdot 0,5$$

$$= 0,25 \cdot 10^{4} \cdot 4 \cdot 10^{-7} \cdot \pi \cdot 400 \cdot 0,5$$

$$= 0,25 \cdot 10^{4} \cdot 4 \cdot 10^{-7} \cdot \pi \cdot 400 \cdot 0,5$$

$$= 0,25 \cdot 10^{4} \cdot 4 \cdot 10^{-7} \cdot \pi \cdot 400 \cdot 0,5$$

$$= 0,25 \cdot 10^{4} \cdot 4 \cdot 10^{-7} \cdot \pi \cdot 400 \cdot 0,5$$

$$= 0,25 \cdot 10^{4} \cdot 4 \cdot 10^{-7} \cdot \pi \cdot 400 \cdot 0,5$$

$$= 0,25 \cdot 10^{4} \cdot 4 \cdot 10^{-7} \cdot \pi \cdot 400 \cdot 0,5$$

$$= 0,25 \cdot 10^{4} \cdot 4 \cdot 10^{-7} \cdot \pi \cdot 400 \cdot 0,5$$

$$= 0,25 \cdot 10^{4} \cdot 4 \cdot 10^{-7} \cdot \pi \cdot 400 \cdot 0,5$$

$$= 0,25 \cdot 10^{4} \cdot 4 \cdot 10^{-7} \cdot \pi \cdot 400 \cdot 0,5$$

$$= 0,25 \cdot 10^{4} \cdot 4 \cdot 10^{-7} \cdot \pi \cdot 400 \cdot 0,5$$

$$= 0,25 \cdot 10^{4} \cdot 4 \cdot 10^{-7} \cdot \pi \cdot 400 \cdot 0,5$$

$$= 0,25 \cdot 10^{4} \cdot 4 \cdot 10^{-7} \cdot \pi \cdot 400 \cdot 0,5$$

$$= 0,25 \cdot 10^{4} \cdot 4 \cdot 10^{-7} \cdot \pi \cdot 400 \cdot 0,5$$

$$= 0,25 \cdot 10^{4} \cdot 4 \cdot 10^{-7} \cdot \pi \cdot 400 \cdot 0,5$$

$$= 0,25 \cdot 10^{4} \cdot 4 \cdot 10^{-7} \cdot \pi \cdot 400 \cdot 0,5$$

$$= 0,25 \cdot 10^{4} \cdot 4 \cdot 10^{-7} \cdot \pi \cdot 400 \cdot 0,5$$

$$= 0,25 \cdot 10^{4} \cdot 4 \cdot 10^{-7} \cdot \pi \cdot 400 \cdot 0,5$$

$$= 0,25 \cdot 10^{4} \cdot 4 \cdot 10^{-7} \cdot \pi \cdot 400 \cdot 0,5$$

$$= 0,25 \cdot 10^{4} \cdot 4 \cdot 10^{-7} \cdot \pi \cdot 400 \cdot 0,5$$

$$= 0,25 \cdot 10^{-7} \cdot 10^{-7}$$

Omeem: $F_x = 66,2$ H.

25. Определить характер изменения во времени электродинамического усилия, действующего на ножи рубильника (рис. 1.16), по которым протекает однофазный ток КЗ. Установившееся значение тока $I_{ecn} = 800 \ A$, частота $f = 50 \ \Gamma \mu$.



Рис. 1.16. Эскиз рубильника

Известно, что короткое замыкание произошло в удаленных от генератора точках сети. Размеры рубильника: l = 80 мм, h = 70 мм.

Решение. Поскольку короткое замыкание произошло в удаленных от генератора точках сети, влиянием апериодической составляющей на электродинамическое усилие можно пренебречь, т.е. ток K3 $i = \sqrt{2}I_{vcm} \sin \omega t$.

Тогда усилие взаимодействия между ножами рубильника будет

$$F = \frac{\mu_0}{4\pi} i^2 k_{1/2} = \frac{\mu_0}{4\pi} 2 I_{ycm}^2 k_{1/2} \sin^2 \omega t,$$

где

$$k_{1/2} = \frac{2l}{h} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{h}{l}\right)^2 - \frac{h}{l}} \right] = \frac{2 \cdot 8 \cdot 10^{-2}}{7 \cdot 10^{-2}} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{7 \cdot 10^{-2}}{8 \cdot 10^{-2}}\right)^2 - \frac{7 \cdot 10^{-2}}{8 \cdot 10^{-2}}} \right] = 1,04 - 1000$$

коэффициент контура электродинамических усилий;

ф – круговая частота тока.

Тогда

$$F = \frac{4\pi \cdot 10^{-7}}{4\pi} \cdot 2 \cdot 800^2 \cdot 1,04 \cdot \sin^2 \omega t.$$

Разложив $sin^2 \omega t = (1 - cos 2\omega t)/2$, получаем F = 0,067 - 0,067 cos 628t. Очевидно, что максимальное значение усилия $F_{max} = 0,314$ H, среднее значение $F_{cp} = 0,067$ H, $F_{min} = 0$.

Ombem: $F_{max} = 0.314 \ H$, $F_{cp} = 0.067 \ H$, $F_{min} = 0$.

26. Для задачи 25 **проверить**, удовлетворяют ли условиям прочности и жесткости ножи рубильника, которые изготовлены из меди, поперечное сечение их имеет прямоугольную форму с $a \times b = 3 \times 15$ *мм*. Ножи расположены широкими сторонами друг к другу.

Решение. Нож рубильника можно рассчитать как балку на двух опорах, т.е.

$$\sigma_{u_3} = M / W_{u_3} < \sigma_{\partial on},$$

где $M = F_{max}l/8 = 0,134 \cdot 80 \cdot 10^{-3}/8 = 0,134 \cdot 10^{-2}$ $H \cdot M -$ минимальное значение изгибающего момента;

 $W_{u_3} = b \cdot a^2 / G = 15 \cdot 10^{-3} \cdot 3^2 \cdot 10^{-6} / G = 22,5 \cdot 10^{-9} \ m^2$ — момент сопротивления; $\sigma_{\partial on} = 137 \cdot 10^6 \ \Pi a$ — допустимое напряжение на изгиб для меди.

Тогда

$$\sigma_{u_3} = 0.134 \cdot 10^{-2} / (22.5 \cdot 10^{-9}) = 0.6 \cdot 10^6 < 137 \cdot 10^6 \ \Pi a.$$

Следовательно, ножи рубильника удовлетворяют условиям прочности. Во избежание появления механического резонанса необходимо, чтобы частота собственных колебаний механической системы не была равна частоте возбуждающей силы, т.е. в нашем случае 100 Гц.

Для двух параллельных шин частота собственных колебаний

$$f_{co\delta} = \frac{k}{l^2} \sqrt{\frac{EJ}{\gamma S}} = \frac{48}{64 \cdot 10^{-4}} \sqrt{\frac{11.8 \cdot 10^6 \cdot 15 \cdot 10^{-4} \cdot 3^3}{12 \cdot 85.2 \cdot 3 \cdot 15 \cdot 10^{-3}}} = 39.3 \ \Gamma \mu,$$

где *k* – коэффициент, учитывающий жесткость заделки ножа как балки на двух опорах. При жестко заделанном одном конце и свободном закреплении другого конца, это имеет место в случае рубильника, *k* = 48;

$$E = 11,8 \cdot 10^{6} H / cm^{2}$$
 – модуль упругости материала (меди);
 $\gamma = 85,2 H / cm^{3}$ – удельный вес меди;
 $S = 3 \times 15 \cdot 10^{-2} cm^{2}$ – площадь поперечного сечения;

 $J = ba^2 / 12 = 15 \cdot 10^{-4} \cdot 3^3 / 12 \ cm^2$ – момент инерции поперечного сечения. Следовательно, поскольку собственная частота меньше вынужденной, механический резонанс не будет иметь места.

Ombem: $\sigma_{u_3} = 0.6 \cdot 10^6 \ \Pi a < \sigma_{don}$; $f_{coo} = 39.3 \ \Gamma u < 100 \ \Gamma u$.

27. Определить усилия, действующие на каждый из ножей трехполюсного разъединителя, по которым протекает предельный сквозной ток трехфазного КЗ. Амплитудное значение тока $I_{max} = 320 \ \kappa A$, длина ножей $l = 610 \ mm M$, расстояние между ними $h = 700 \ mm M$. Вычислить требуемый момент сопротивления поперечного сечения ножей.

Решение. На каждый из ножей в случае установившегося тока КЗ будет действовать знакопеременные во времени усилия. Определим максимальные притягивающие и максимальные отталкивающие усилия на каждый из трех ножей разъединителя (рис. 1.17).



Рис. 1.17. Эскиз разъединителя

Из формулы

$$F_{om} = 0.55 \frac{\mu_0}{4\pi} k_{1/2} I_{max}^2$$

$$\begin{split} F_{1om} &= 0,805 C I_{max}^2 = 0,805 \cdot 0,665 \cdot 10^{-7} \cdot 320^2 \cdot 10^6 = 5450 \ H, \end{split}$$
где $C &= \frac{\mu_0 k_{1/2}}{4\pi} = 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 0,665 / 4\pi = 0,665 \cdot 10^{-7}; \\k_{1/2} &= 0,665. \end{split}$

где $C = \frac{\mu_0 k_{1/2}}{4\pi}.$

Аналогично $F_{2om} = F_{2np} = 0,87CI_{max}^2 = 5900 \ H, \ F_{3om} = F_{1om} = 5450 \ H,$ $F_{3np} = F_{1np} = 374 \ H.$

Наиболее напряженным будет средний полюс, поэтому его необходимо рассчитывать на прочность изгиба как балку на двух опорах. Требуемое значение момента сопротивления поперечного сечения

$$W_{u3} = M / \sigma_{\partial on} = 450 / 137 \cdot 10^6 = 3,28 \cdot 10^{-6} \ \text{m}^3$$

где $M = F_{max} l / 8 = 5900 \cdot 0.61 / 8 = 450 H \cdot M$ – изгибающий момент;

 $\sigma_{don} = 137 \cdot 10^6 \ \Pi a$ – допустимое напряжение на изгиб для ножей, выполненных из меди.

Omeem:
$$F_{3om} = F_{1om} = 5450 \ H$$
; $F_{2om} = F_{2np} = 5900 \ H$;
 $F_{3np} = F_{1np} = 374 \ H$; $W_{u3} = 3,28 \cdot 10^{-6} \ M^3$.

28. Определить на каком минимальном расстоянии можно поставить опорные изоляторы в распределительном устройстве, если в нем применены прямоугольные медные шины сечением 100×10 *мм* по одной шине на фазу. Шины закреплены жестко на опорах, поставлены на ребро и по ним протекает ток трехфазного КЗ, установившееся значение которого $I_{ycm} = 50 \ \kappa A$. Расстояние между фазами равно 0,3 *м*.

Решение. Определим значение электродинамического усилия, действующего на 1 *м* длины шин, при этом расчетное значение тока определим по формуле

$$i_{y\partial} = k_{y\partial} I_{m3} = 1.8 \cdot 50 \cdot \sqrt{2} = 128 \ \kappa A.$$

Здесь $i_{vo} = 1,8.$

Сила, действующая на 1 м длины,

 $F = 10^{-7} i_{y0}^2 l / a = 10^{-7} \cdot 128^2 \cdot 10^6 / 0.3 = 5470 H / M.$

Для многопролетной балки

$$\sigma_{\partial on} = Fl^2 / 10W_{u_3},$$

где $W_{u_3} = bh^2/6$ — момент сопротивления поперечного сечения шины;

 $\sigma_{don} = 137 \cdot 10^6 \ \Pi a$ – допустимое напряжение на изгиб для меди.

Подставив числовые значения, получим

$$137 \cdot 10^{6} = \frac{5470 \cdot 6l_{1min}}{10 \cdot 100 \cdot 10^{-3} \cdot 10^{2} \cdot 10^{-6}},$$

откуда $l_{1min} = 0.65$ м.

Поскольку по шинам протекает переменный ток, необходимо найти минимальное расстояние между изоляторами в случае отсутствия механического резонанса. При этом собственная частота шин должна быть меньше частоты механических колебаний, т.е. двойной частоты тока.

Из формулы

$$f = \frac{k}{l_{2\min}^2} \sqrt{\frac{EJ}{\gamma S}},\tag{1}$$

где k = 112 - для жесткого закрепления шин;

 $E = 11,8 \cdot 10^6 H / cm^2$ – модуль упругости для меди;

 $J = bh^3 / 12 = 10 \cdot 1^3 / 12 = 0,838 \ cm^4$ – момент инерции сечения шины;

 $\gamma = 85,2 H / cm^3 -$ удельный вес меди;

 $S = 10 \ cm^2$ – поперечное сечение шины.

После решения равенства (1) относительно l_{min} получаем требуемое расстояние между изоляторами $l_{2min} = 0,596 \ m$. Выбираем наименьшее из двух полученных значений, т.е. 0,6 *м*.

Ответ: $l_{min} = 0,6$ м.

29. Определить максимальные напряжения, возникающие в наиболее нагруженном пакете шин распределительного устройства трехфазного генератора, если короткое замыкание произошло на выходе из распределительного устройства и действующее значение установившегося тока трехфазного КЗ $I_{ycm} = 140 \ \kappa A$. Пакеты шин расположены в одной плоскости, расстояние между ними $h = 700 \ mm$, расстояние между опорными изоляторами $l = 600 \ mm$, пакеты шин состоят из 2-х жестко связанных медных шин с размерами поперечного сечения $120 \times 10 \ mm$, расстояние между шинами пакета $d = 10 \ mm$ и через каждые $10 \ cm$ между шинами имеются прокладки.

Решение. При вычислении напряжения на изгиб необходимо учесть взаимодействие между шинами пакета, т.е. $\sigma_{pacy} = \sigma_{\phi a3} + \sigma_{na\kappa}$, где $\sigma_{\phi a3}$ – напряжение от усилий, возникающих от взаимодействия соседних фаз, $\sigma_{na\kappa}$ – напряжение от взаимодействия шин в одном пакете.

Поскольку более напряженным при данном расположении шин будет средний пакет шин, для него и проведем расчет. Максимальное усилие, действующее на средний пакет,

$$F_{\phi a 3} = 0.87 C_1 \left(k_{y \partial} \sqrt{2I_{y c m}} \right)^2 = 0.87 \cdot 0.66 \cdot 10^{-7} \left(1.8 \sqrt{2 \cdot 140 \cdot 10^3} \right)^2 = 7280 \ H,$$

где $C_1 = \mu_0 k_1 / 4\pi = 0,66 \cdot 10^{-7}$;

 $k_{y\partial} = 1,8$ – ударный коэффициент, учитывающий влияние на электродинамические усилия апериодической составляющей тока КЗ. Так как короткое замыкание произошло вблизи генератора, то это влияние довольно значительно. Так как шину можно рассчитать как многопролетную балку, то

$$\sigma_{\phi a3} = F_{\phi a3} / 10W_{u3} = 7280 \cdot 0.6 / 10 \cdot 1.44 \cdot 120 \cdot 10^{-3} \cdot 10^2 \cdot 10^{-6} = 25.3 \cdot 10^6 \ \Pi a,$$

где $W_{u_3} = 1,44ab^2$ – момент инерции поперечного сечения пакета шин;

а = 120 мм, b = 10 мм.

Максимальное усилие, возникающее между шинами пакета, можно вычислить как максимальное усилие в однофазной системе, и так как шины в пакете находятся близко друг к другу, то необходимо учесть влияние конечных размеров шин. Предположим, что ток между шинами распределен равномерно. Тогда

$$F_{max} = k_{\phi} C_2 \left(k_{y\partial} \sqrt{2l} / 2 \right)^2$$
,

где $C_2 = \mu_0 k_{1/2} / 4\pi;$ $k_{1/2} = \frac{2l_{np}}{\delta} \left[\sqrt{1 + (\delta / l_{np})^2} - \frac{\delta}{l_{np}} \right];$ $l_{np} = 100 \text{ мм} - \text{расстояние между прокладками;}$ $\delta = 20 \text{ мм} - \text{расстояние между осями шин;}$

 $k_{\phi} = 0,4 -$ коэффициент формы.

После вычислений получим $C_2 = 8 \cdot 10^{-7}$.

$$F_{nak} = 0.4 \cdot 8 \cdot 10^{-7} \left(1.8\sqrt{2 \cdot 140 \cdot 10^3} / 2 \right)^2 = 10400 \ H.$$

Напряжение изгиба в пакете шин

$$\sigma_{na\kappa} = F_{na\kappa} l_{na\kappa} / 12W_{uu} = 10400 \cdot 100 \cdot 10^{-3} / 12 \cdot 20 \cdot 10^{-7} = 43,5 \cdot 10^{6} \ \Pi a,$$

где $W_{uu} = ab^{2} / 6 = 120 \cdot 10^{-3} \cdot 10^{2} \cdot 10^{-6} / 6 = 20 \cdot 10^{-7} \ M^{3}.$

Суммарное максимальное напряжение изгиба *о* в наиболее нагруженной шине

$$\sigma = \sigma_{da3} + \sigma_{na\kappa} = 25.3 \cdot 10^6 + 43.5 \cdot 10^6 = 68.8 \cdot 10^6 \ \Pi a.$$

Ombem: $\sigma = 68.8 \cdot 10^6 \ \Pi a$.

2. ПРОВЕРКА ПРОВОДНИКОВ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АППАРАТОВ НА ТЕРМИЧЕСКУЮ СТОЙКОСТЬ

2.1. Общие сведения

В токоведущих, изолирующих и конструктивных деталях электрических аппаратов возникают потери электрической энергии в виде тепла. В общем случае тепловая энергия частично расходуется на повышение температуры аппарата и частично рассеивается в окружающей среде.

Нагрев токоведущих частей и изоляции аппарата в значительной степени определяет его надежность. Поэтому во всех возможных режимах работы температура их не должна превышать таких значений, при которых обеспечивается заданная длительность работы аппарата.

2.2. Активные потери энергии в аппаратах

2.2.1. Потери в токоведущих частях

В аппаратах постоянного тока нагрев происходит только за счет потерь в активном сопротивлении токоведущей цепи.

Энергия, выделяющаяся в проводнике, Дж

$$W = \int_{0}^{t} i^2 R dt,$$

где i – ток в цепи, A;

R – активное сопротивление проводника, *Ом*;

t – длительность протекания тока, c.

Активное сопротивление проводника различно при постоянном и переменном токе из-за поверхностного эффекта и эффекта близости. При переменном токе

$$R = R_{\infty} k_{\partial o \delta}$$
,

где R_{∞} – сопротивление при постоянном токе;

*k*_{*доб} – коэффициент* добавочных потерь, вызванных поверхностным эффектом и эффектом близости.</sub>

0,5 0,3 0,20 0,15 0,1 k, ່ດ ດໍສ໌ 2,1 $_{2,0}\Delta_{ au}/c$ k_{*} $\Delta \tau$ 2,8 2,6 2,4 2,2 2,0 1,8 1,9 1,8 1.71,6 1,5 ัก ก่ล 1,4 1.6 1,3 1,2 1,4 1,2 1,1 1,0 1,0 8kf 1 2 3 4 0 0,5 1,01,5 2,0 2,5 3,0 3,5 4,0 4,5 $\sqrt[4]{R_{=}\cdot 10^7}$ $\sqrt{3,05 \cdot 10^6 R_{=}}$ 48 k_{*} 3,0 b 2 2.6 h/b=1 h/b=12 2,2 6 1.8 1,4

В зависимости от формы сечения шины поверхностный коэффициент k_n определяется по кривым, изображенным на рисунке 2.1.



7 8

 $\frac{8kf}{R_{=}\cdot 10^7}$

5

6

1,0

1

2 3 4

а – для сплошного круглого проводника; б – для шины прямоугольного сечения;
 в – для трубчатого проводника

На рисунке f – частота, Γu ; $R_{=}$ – сопротивление проводника, Ом, при постоянном токе и длине l = 1 м. В проводниках из ферромагнитного материала из-за увеличения магнитной проницаемости возрастает поток, создаваемый током в проводнике. При этом поверхностный эффект увеличивается во много раз. Чем ближе расположены проводники друг к другу, тем сильнее магнитное поле от соседнего проводника и тем больше эффект близости.

Коэффициент близости для круглого проводника можно определить по кривым, изображенным на рисунке 2.2.



Рис. 2.2. Коэффициент близости для круглых проводников

В отличие от k_n коэффициент k_{δ} может быть и меньше единицы, так как за счет магнитного поля соседних проводников возможно выравнивание плотности тока по сечению. На рисунке 2.3 а показана зависимость k_{δ} от расстояния Δ между плоскими шинами при их различном взаимном расположении.



Рис. 2.3. Зависимость коэффициента близости от расположения прямоугольных шин

При расположении параллельных шин в одной плоскости k_{δ} значительно больше (рис. 2.3 б), чем в случае, когда плоскости шин параллельны.

$$k_{\partial o \delta} = k_n \cdot k_{\delta}.$$

Из-за больших значений $k_{\partial o \delta}$ ферромагнитные материалы редко применяются для изготовления токоведущих элементов.

2.2.2. Потери в нетоковедущих ферромагнитных деталях аппаратов

Полные потери в стали магнитопровода *P_{cm}* на гистерезис и вихревые токи могут быть найдены с помощью формулы

$$P_{cm} = \left(\aleph_{\mathcal{B}} B_m^{1,6} + \aleph_{\mathcal{B}} f B_m^2\right) f G,$$

где *B_m* – максимальное значение магнитной индукции в магнитопроводе, *T*л;

 \aleph_{e} , \aleph_{e} – коэффициенты потерь от гистерезиса и вихревых токов;

G – масса магнитопровода, кг;

f – частота тока.

В аппаратах переменного тока высокого напряжения помимо потерь в проводниках и ферромагнитных материалах необходимо учитывать потери, *Bm*, в изоляции проводов и изолирующих деталях

$$P = 2\pi f C U^{-2} t g \delta,$$

где C – емкость изоляции, Φ ;

U – действующее значение напряжения, В;

 $tg\delta$ – тангенс угла диэлектрических потерь в изоляции.

Изоляция аппарата нагревается за счет, как этих потерь, так и потерь в токоведущей цепи.

2.3. Установившийся режим нагрева

Процесс нагрева считается установившимся, если с течением времени температура частей аппарата не изменяется. Температура может считаться установившейся, если за 1 час она возрастет не более чем на $1 \, {}^{0}$ С. В установившемся режиме все выделяющееся тепло отдается в окружающее пространство.

2.3.1. Расчет сечения неизолированного проводника

Сопротивление круглого проводника

$$R = \frac{4\rho_0 \left(1 + a_R \Theta_{HOM}\right)l}{\pi d^2},$$

где ρ_0 – удельное электрическое сопротивление при 0 °C;

d – диаметр проводника;

l – его длина;

*а*_{*R}</sub> – температурный коэффициент сопротивления;*</sub>

 $\Theta_{_{HOM}}$ – допустимая температура в номинальном режиме, ⁰С.

Тепло, отдаваемое в окружающее пространство в единицу времени, (мощность) определяется уравнением $\Phi = k_{\tau} S(\Theta_2 - \Theta_1) = k_{\tau} S \tau$

$$\Phi = I^{2}R = \frac{4\rho_{0}I^{2}(1 + a_{R}\Theta_{HOM})l}{\pi d^{2}} = k_{\tau}\pi d(\Theta_{HOM} - \Theta_{0})l,$$

где $\Theta_{\mu o m}$ – температура окружающей среды;

 $\tau = \Theta_2 - \Theta_1$ – превышение температуры, ⁰C;

Θ₂ – температура поверхности нагретого тела;

 Θ_1 – температура окружающей среды;

 k_{τ} – коэффициент теплообмена, включающей все виды охлаждения, $Bm \, M^{-2} \, C^{l}$.

Из последней формулы следует

$$d = \sqrt[3]{\frac{4\rho_0 I^2 (1 + a_R \Theta_{HOM})}{\pi^2 k_\tau (\Theta_{HOM} - \Theta_0)}}.$$

Выбрав d с некоторым запасом и рассчитав коэффициент добавочных потерь k_{dof} уточняем

$$d = \sqrt[3]{\frac{4\rho_0 I^2 (1 + a_R \Theta_{HOM}) k_{\partial o \delta}}{\pi^2 k_\tau (\Theta_{HOM} - \Theta_0)}},$$

Для проводника прямоугольного сечения (шины)

$$R = \rho_0 l \frac{1 + a_R \Theta_{HOM}}{ab},$$

где а и b – стороны сечения шины.

Получим
$$ab\left(a+b=rac{
ho_0 I^2\left(1+a_R\Theta_{HOM}\right)}{2k_{\tau}\left(\Theta_{HOM}-\Theta_0\right)}
ight)$$
.

Обозначив m = a / b, получим

$$d = \sqrt[3]{\frac{\rho_0 I^2 (1 + a_R \Theta_{HOM})}{m(m+1)2k_\tau (\Theta_{HOM} - \Theta_0)}}.$$

Из конструктивных соображений и условий механической прочности обычно принимается m = 3 - 10.

Определив затем *a*, находят коэффициент добавочных потерь и проводят проверку с учетом этого коэффициента.

2.3.2. Нагрев изолированных токоведущих частей

Рассмотрим нагрев круглого медного проводника, покрытого равномерным слоем изоляционного материала (рис. 2.4).

В установившемся режиме вся мощность, выделяемая в проводнике, отдается в окружающую среду через внешнюю поверхность изоляции. Превышение температуры между этой поверхностью и окружающей средой

$$\tau_{noe} = \Theta_{noe.u3} - \Theta_0.$$

Тепловой поток проводника создает на толщине изоляции перепад температуры $\Delta \Theta$. Тогда температура медной поверхности проводника

$$\Theta_{npos} = \Theta_{nos.us} + \Delta\Theta = \Theta_0 + \tau_{nos} + \Delta\Theta$$



Рис. 2.4. К нагреву круглого изолированного проводника

Превышение температуры поверхности изоляции может быть найдено из уравнения $\tau_{nob} = \frac{\Phi}{k_{\tau}\pi Dl} = \frac{i^2 R k_{\partial o \delta}}{k_{\tau}\pi Dl}.$

Решив уравнение Фурье для случая передачи тепла теплопроводностью $\Phi = -\lambda \frac{d\Theta}{dx} 2\pi x l$ относительно Θ и с учетом $\Theta_{npoo} > \Theta_{noo}$ получим $\Delta \Theta = \frac{\Phi}{2\pi l \lambda} ln \frac{D}{d} = \Phi R_{\tau}$, где $R_{\tau} = \frac{\pi}{2\lambda} ln \frac{D}{d}$ – термическое сопротивление изоляции.

Температура провода

$$\Theta_{npob} = \Theta_0 + \frac{\Phi}{k_{\tau}\pi Dl} + \frac{\Phi}{2\pi l\lambda} ln \frac{D}{d},$$

откуда следует, что результирующее термическое сопротивление

$$R_{\tau,pes} = \frac{\Theta_{npoe} - \Theta_0}{\Phi} = \frac{1}{k_{\tau}\pi Dl} + \frac{1}{2\pi l\lambda} ln \frac{D}{d} = R_{\tau} + R_{\tau 0}.$$

Таким образом, результирующее сопротивление равно сумме термического сопротивления изоляции R_{τ} и термического сопротивления $R_{\tau 0}$ перехода от наружной поверхности изоляции к окружающей среде.

2.3.3. Нагрев катушек

В установившемся тепловом режиме для любого элементарного объема проводника характерно, что количество тепла Q_1 , поступающего из внутренней части, и количество тепла Q_2 , выделившегося в этом объеме, равно количеству тепла Q_3 , выходящего из этого объема,

$$Q_1 + Q_2 = Q_3.$$

Из уравнения плотности теплового потока при теплопровод-

ности
$$\frac{d^2 Q}{dSdt} = -\lambda \frac{dQ}{dx} = \phi_0$$
 получим
 $Q_1 = -2\pi x l \frac{\partial \tau}{\partial x};$
 $Q_3 = -2\pi (x+dx) l \frac{\left(\tau + \frac{\partial \tau}{dx} dx\right)}{dx},$

где *x* – радиус элементарного цилиндра; *l* – его длина.

Для приближенных расчетов можно воспользоваться формулой

$$\tau_{y.cp} = \frac{I_0^2 R_0}{k_\tau S_{_{\mathcal{H}}} \left(1 + a_R \frac{I_0^2 R_0}{k_\tau S_{_{\mathcal{H}}}} \right)},$$

где $\tau_{y.cp}$ – среднее установившееся превышение температуры;

 I_0 и R_0 – ток и сопротивление до включения при температуре окружающей среды;

S_{эк} – эквивалентная поверхность охлаждения;

 k_{τ} – коэффициент теплоотдачи; a_{R} – температурный коэффициент сопротивления.

2.4. Проверка проводников и электрических аппаратов на термическую стойкость при коротких замыканиях

В отечественной практике степень термического воздействия тока КЗ на проводники и электрические аппараты принято определять по значению интеграла Джоуля

$$B_{\kappa} = \int_{0}^{t_{omk\pi}} i_{kt}^2 dt,$$

где *i*_{kt} – ток в произвольный момент времени, *A*;

*t*_{откл} – расчетная продолжительность КЗ, *c*;

t – время, c.

Без существенной погрешности этот интеграл можно принять равным сумме интегралов от периодической $B_{\kappa n}$ и апериодической $B_{\kappa n}$ составляющих тока КЗ, т.е.

$$B_{\kappa} = B_{\kappa n} + B_{\kappa a}.$$

Методика расчета интеграла Джоуля зависит от исходной расчетной схемы электроустановки, положения расчетной точки КЗ и ее удаленности от генераторов, синхронных компенсаторов или электродвигателей.

При этом возможны четыре случая (четыре типа расчетных схем):

1. Если исходная расчетная схема имеет произвольный характер, но для всех генераторов (синхронных компенсаторов) расчетное КЗ является удаленным, т.е. отношение действующего значения периодической составляющей тока любого генератора (синхронного компенсатора) в начальный момент КЗ к его номинальному току не достигает двух, то путем преобразования эквивалентной схемы замещения все источники энергии (генераторы, синхронные компенсаторы и источники более удаленной части системы) следует заменить одним эквивалентным источником, ЭДС которого считать неизменной по амплитуде, а индуктивное сопротивление равным результирующему эквивалентному сопротивлению расчетной схемы. При этом интеграл Джоуля определяется по формуле

$$B_{\kappa} = I_{nc}^{2} \left[t_{om\kappa\pi} + T_{a\nu\kappa} \left(1 - exp \left(- 2t_{om\kappa\pi} / T_{a\nu\kappa} \right) \right) \right],$$

где I_{nc} – действующее значение периодической составляющей тока K3 от эквивалентного источника энергии (системы), *A*; $T_{a_{3\kappa}}$ – постоянная времени затухания апериодической составляющей тока K3 от эквивалентного источника:

$$T_{a_{\mathcal{I}}\kappa} = \frac{x_{\mathcal{I}\kappa(R=0)}}{\omega R_{\mathcal{I}\kappa(R=0)}},$$

где $x_{_{3\kappa}(R=0)}$ и $R_{_{3\kappa}(x=0)}$ – результирующие эквивалентные сопротивления расчетной схемы, найденные путем учета соответственно только индуктивных и только активных сопротивлений элементов этой схемы.

В тех случаях, когда $t_{om\kappa n} \ge 3T_{a_{3\kappa}}$, интеграл Джоуля можно определять по более простой формуле

$$B_{\kappa} \approx I_{nc} (t_{om\kappa\pi} + T_{as\kappa}).$$

2. Если исходная расчетная схема содержит один или несколько однотипных генераторов (синхронных компенсаторов), причем последние находятся в одинаковых условиях относительно расчетной точки КЗ (все машины или блоки присоединены к общим шинам), а расчетное КЗ является близким, т.е. начальное действующее значение периодической составляющей тока генератора (синхронного компенсатора) превышает его номинальный ток в два раза и более, то интеграл Джоуля следует вычислять, используя выражение

$$B_{\kappa} = I_{nor}^{2} \left[B_{*_{\kappa r}} t_{om\kappa n} + T_{ar} \left(1 - exp \left(-2t_{om\kappa n} / T_{ar} \right) \right) \right],$$

где I_{nor} – начальное действующее значение периодической составляющей тока КЗ от генератора (синхронного компенсатора), *A*; T_{a2} – постоянная времени затухания апериодической составляющей тока КЗ от генератора (синхронного компенсатора), *c*; $B_{*\kappa^2}$ – относительный интеграл Джоуля от генератора



где I_{noe} – действующее значение периодической составляющей тока K3 от генератора (синхронного компенсатора) в произвольный момент времени, *А*.

Значения относительного интеграла Джоуля при разных удаленностях расчетной точки КЗ от генератора (синхронного компенсатора) $I_{*nor(HOM)}$, т.е. разных отношениях начального действующего значения периодической составляющей тока машины к ее номинальному току, могут быть определены по кривым (рис. 2.5).



Рис. 2.5. Кривые для определения $\underset{\kappa_2}{B}$ от синхронных генераторов с тиристорной системой возбуждения

При $t_{om\kappa\pi} \ge 3T_{as\kappa}$ приближенно для вычисления интеграла Джоуля можно использовать формулу

$$B_{\kappa} = I_{nor}^2 \Big(\underset{*_{\kappa r}}{B} t_{om\kappa n} + T_{ar} \Big).$$

3. Если исходная расчетная схема содержит произвольное число источников энергии, для которых расчетное КЗ является удаленным, и, кроме того, генератор (синхронный компенсатор), который при КЗ оказывается связанным с точкой КЗ по радиальной схеме и для которого это КЗ является близким, то интеграл Джоуля от периодической составляющей тока КЗ следует рассчитывать по формуле:

$$B_{\kappa n} = \left(I_{nc}^2 + 2I_{nc}I_{nor} \underbrace{Q}_{*\kappa r} + I_{nor}^2 B_{\kappa r}\right) t_{om\kappa n}$$

где I_{nc} – действующее значение периодической составляющей тока K3 от удаленных источников энергии, *A*;

Q – относительный интеграл от периодической составляю-

щей тока в месте КЗ, обусловленного действием генератора,

$$Q_{*\kappa 2} = \frac{\int_{nor}^{I_{omK\pi}} I_{nor} dt}{I_{nor} t_{omK\pi}}.$$

Значение относительного интеграла $Q_{*_{K^2}}$ при разных удаленностях расчетной точки КЗ от генератора (синхронного компенсатора) находят по кривым (рис. 2.6).

Интеграл Джоуля от апериодической составляющей тока КЗ

$$\begin{split} B_{\kappa n} &= I_{nc}^2 T_{a \Im \kappa} \left(1 - exp \left(-2t_{om\kappa \pi} / T_{a \Im \kappa} \right) \right) + I_{noc}^2 T_{ac} \left(1 - exp \left(-2t_{om\kappa \pi} / T_{a \Im \kappa} \right) \right) + \\ &+ \frac{4I_{nc} I_{noc}}{\frac{1}{T_{a \Im \kappa}} + \frac{1}{T_{ac}}} \left[1 - exp \left(-t_{om\kappa \pi} \left(\frac{1}{T_{a \Im \kappa}} + \frac{1}{T_{ac}} \right) \right) \right]. \end{split}$$



Рис. 2.6. Кривые для определения $Q_{*_{\kappa_{c}}}$ от синхронных генераторов с тиристорной системой возбуждения

В тех случаях, когда $t_{omkn} \ge 3T_{ac}$ можно пользоваться выражением

$$B_{\kappa a} = I_{nc}^2 T_{a \not \sigma \kappa} + I_{n \sigma z}^2 T_{a z} + \frac{4I_{nc} I_{n \sigma z}}{\frac{1}{T_{a \not \sigma \kappa}} + \frac{1}{T_{a z}}}$$

4. Если исходная расчетная схема содержит различные источники энергии, для которых расчетное КЗ является удаленным, и группу однотипных электродвигателей (синхронных или асинхронных), а расчетная точка КЗ находится на шинах, куда подключены электродвигатели, или вблизи этих шин, то при определении интеграла Джоуля все эти электродвигатели допустимо заменять одним эквивалентным электродвигателем, мощность которого равна сумме номинальных мощностей отдельных электродвигателей. Вместо I_{no2} и T_{a2} необходимо подставлять значения соответствующих величин I_{nod} и T_{ad} для эквивалентного электродвигателя, вместо $\underset{\kappa_2}{B}$ и $\underset{\kappa_2}{Q}$ – значения $\underset{\kappa_0}{B}$ и $\underset{\kappa_0}{Q}$ электродвигателя могут быть найдены по кривым (рис. 2.7, 2.8).



Рис. 2.7. Кривые для определения $\displaystyle \mathop{Q}_{*_{\kappa\partial}}$ от асинхронного электродвигателя



Рис. 2.8. Кривые для определения $\mathop{B}_{*_{\kappa O}}$ от асинхронного электродвигателя

Проверка электрического аппарата на термическую стойкость при КЗ заключается в сравнении найденного при расчетных условиях значения интеграла Джоуля с его допустимым для данного аппарата значением B_{mep} . Электрический аппарат удовлетворяет условию термической стойкости, если выполняется условие $B_{\kappa} \leq B_{mep}$.

Проверка проводников на термическую стойкость при КЗ заключается в определении их температуры нагрева к моменту отключения КЗ и сравнении этой температуры с предельно допустимой температурой нагрева при КЗ. Последняя зависит от вида проводника, его материала и других факторов. Нормированные значения предельно допустимых температур нагрева разных проводников при КЗ приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1

№ п/п	Вид проводника	$\mathcal{P}_{\partial on}$, ^{0}C
1	Шины:	
	алюминиевые	200
	медные	300
	стальные, не имеющие непосредственного соединения с аппара-	400
	тами	
	стальные с непосредственным присоединением к аппаратам	300
2	Кабели с бумажной пропитанной изоляцией на напряжение, кВ:	
	до 10	200
	2030	130
	110220	125
3	Кабели и изолированные провода с медными и алюминиевыми	
	жилами и изоляциеи из:	1(0
	поливинилхлорида	160
	резины	150
	резины повышенной теплостойкости	250
	полиэтилена (номинальное напряжение каоеля до 35 кВ)	130
	вулканизированного полиэтилена (ном. напряжение каоеля до $35 \ \kappa B$)	250
4	Провода при тяжениях, <i>Н/мм</i> ² :	
	медные неизолированные	
	< 20	250
	≥ 20	200
	алюминиевые неизолированные	
	< 10	200
	≥ 10	160
	алюминиевая часть сталеалюминиевых проводов	200

Нормированные значения предельно допустимых температур нагрева разных проводников при КЗ Расчет температуры нагрева проводников к моменту отключения КЗ ведут с использованием кривых зависимости этой температуры от функции A_g (рис. 2.9). Расчет ведут в следующем порядке:

1) выбирают кривую, соответствующую материалу проверяемого проводника; по этой кривой, исходя из начальной температуры проводника \mathcal{G}_{μ} , определяют начальное значение функции A_{μ} , Ac^{2}/MM^{4} ;

2) вычисляют значение интеграла Джоуля;

3) находят значение $A_{g_{\kappa n}}$, соответствующее конечной температуре нагрева проводника $g_{\kappa n}$.

$$A_{\mathcal{G}_{\mu}} = A_{\mathcal{G}_{\mu}} + B_{\kappa} / s^2,$$

где *s* – площадь поперечного сечения проводника (в случае сталеалюминевых проводов – площадь поперечного сечения алюминиевой части провода), *мм*;

4) используя выбранную ранее кривую (рис. 2.9), по значению $A_{g_{m}}$ определяют конечную температуру нагрева проводника $\mathcal{G}_{\kappa\mu}$.



Рис. 2.9. Кривые для определения температуры нагрева проводников из различных материалов при КЗ: 1 – MM; 2 – MT; 3 – AM; 4 – AT; 5 – AДО, ACT; 6 – AД31T1; 7 – AД31T; 8 – Ст3

Если при выборе сечения проводника определяющим условием является его термическая стойкость при КЗ, то исходя из этого условия по кривым рисунок 2.9 находят значение $A_{g_{aon}}$, соответствующее предельно допустимой температуре нагрева проводников при КЗ, и определяют минимальное сечение проводника, при котором обеспечивается его термическая стойкость:

$$s_{mep.Muh} = \sqrt{B_k / (A_{\mathcal{G}_{\partial on}} - A_{\mathcal{G}_{H}})}$$

Используя шкалу сечений проводов, жил кабелей или шин, выбирают сечение $s_{mep.muh}$.

В тех случаях, когда нагрузка проводника до КЗ близка к продолжительно допустимой, минимальное сечение проводника, отвечающее условию термической стойкости при КЗ, определяют по формуле

$$S_{mep...muh} = \sqrt{B_k} / C_{\tau}$$
,

где $C_{\tau} = \sqrt{A_{g_{oon}} - A_{g_{HOM}}}$, $A_{g_{HOM}}$ – значение функции A_{g} при продолжительно допустимой температуре проводника g_{HOM} .

В таблице 2.2 приведены значения параметра C_{τ} для кабелей с алюминиевыми жилами.

Таблица 2.2

Кабель	$C_{\tau}, A c^{1/2} / M M^2$	
Напряжением > 10 <i>кВ</i>	90	
Напряжением 2035 кВ	70	
С полихлорвиниловой или резиновой изоляцией	75	
С полиэтиленовой изоляцией	65	

Значения параметра *С* $_{ au}$ для кабелей с алюминиевыми жилами

Задачи

Расчетная схема



В цепях трансформаторов СН предполагается установить выключатели типа МГУ-20-90/6300УЗ, у которых:

- номинальный ток термической стойкости I_{тер.ном} = 90 кА;

– предельно допустимое время воздействия этого тока $t_{mep.nom} = 4 c;$

- полное время отключения выключателя $t_{g,omkn} = 0,2$ c;

– время действия основной защиты $t_3 = 0.1 c$.

В кабельных линиях предполагается установить выключатели типа ВМПЭ-10-1000-20УЗ, у которых $t_{g,omky} = 0,095 c$;

– выдержка времени защит, установленных в начале кабельных линий, $t_3 = 0,8 c$;

- кабельные линии выполнены кабелем марки АСБ-10-3×150.

Генераторы G₁ и G₂: $P_{HOM} = 110 \text{ мВm}$, $U_{HOM} = 10,5 \text{ кB}$; $\cos \varphi_{HOM} = 0,8$; $X_{*d(HOM)}^{11} = 0,189$; $X_{*2(HOM)} = 0,23$; $T_{a}^{(3)} = 0,41 \text{ c}$; $P_{101} / P_{HOM} = 1$.

Трансформаторы T₁ и T₂: $S_{HOM} = 80 \ MBA$; $n = 230/10,5 \ \kappa B$; $u_{\kappa} = 11\%$; $I_{mep,HOM} = 315 \ \kappa Bm$.

Трансформаторы собственных нужд TCH₁ и TCH₂: $S_{\mu o m} = 10 \ mBA; \ n = 10,5 / 6,3 \ \kappa B; \ u_{\kappa} = 8\%; \ \Delta p_{\kappa} = 60 \ \kappa Bm.$

Реактор LR₁: $U_{HOM} = 10 \ \kappa B;$ $I_{HOM} = 4000 \ A;$ $X = 0,18 \ OM;$ $\Delta p_{\kappa} = 27,7 \ \kappa Bm.$

Реакторы LR₂ и LR₃: $U_{\text{ном}} = 10 \text{ кB}$; $I_{\text{ном}} = 1000 \text{ A}$; X = 0.35 Ом; $\Delta p_{\kappa} = 5.9 \text{ кBm}$.

Линии W₁ и W₂: $l = 150 \ \kappa m$; $X_{y\partial} = 0,429 \ Om/\kappa m$; $R_{y\partial} = 0,098 \ Om/\kappa m$.

Система: $S_{c.HOM} = 4000$ *мBA*; $X_{c(HOM)} = 1,1; X_c / R_c = 15.$

1. Проверить на термическую стойкость при КЗ выключатель, установленный в цепи трансформатора СН.

Решение. Расчетная точка КЗ (K_2) находится около выключателя со стороны трансформатора СН. При этом расчетный ток КЗ складывается из тока от генератора G_1 и тока от генератора G_2 и системы С, амплитуда которого (при КЗ в рассматриваемой точке) остается практически неизменной. Таким образом, преобразованная расчетная схема относится к третьему типу.

В качестве базисных единиц выбираем $S_{\delta} = 1000 \ \text{мBA}$; $U_{\delta} = U_{cp,\text{ном}}$, т.е. $U_{\delta 1} = 230 \ \kappa B$ и $U_{\delta 11} = 10,5 \ \kappa B$, где цифрами 1 и 11 (в индексах) обозначены соответственно ступени высшего и генераторного напряжений; $I_{\delta 1} = S_{\delta} / (\sqrt{3}U_{\delta 1}) = 1000 / \sqrt{3} \cdot 230 = 2,51 \ \kappa A$. При этом $I_{\delta 11} = S_{\delta} / (\sqrt{3}U_{\delta 11}) = 1000 / \sqrt{3} \cdot 10,5 = 55 \ \kappa A$.
Эквивалентная схема замещения представлена на рисунке 2.10.



Рис. 2.10. Эквивалентная схема замещения

При КЗ в точке K_2 необходимо треугольник, образованный индуктивными сопротивлениями X_3 , X_4 и X_6 , преобразовать в эквивалентную звезду (рис. 2.11 а).



Рис. 2.11. Преобразование схемы замещения относительно точки К2

$$X_{*11(\delta)} = \frac{X_{*3(\delta)} X_{*4(\delta)}}{X_{*3(\delta)} + X_{*4(\delta)} + X_{*6(\delta)}} = \frac{1,375^{2}}{2 \cdot 1,375 + 1,633} = 0,4314;$$
$$X_{*12(\delta)} = X_{*13(\delta)} = \frac{X_{*3(\delta)} X_{*6(\delta)}}{X_{*3(\delta)} + X_{*4(\delta)} + X_{*6(\delta)}} = \frac{1,375 \cdot 1,633}{2 \cdot 1,375 + 1,633} = 0,5123.$$

Результаты дальнейших преобразований схемы представлены на рисунке 2.11 б и в, где

$$E_{*3(\delta)} = \frac{E_{2(\delta)} X_{*14(\delta)} + E_{c(\delta)} X_{*15(\delta)}}{X_{*14(\delta)} + X_{*15(\delta)}} = \frac{1,124 \cdot 1,3145 + 1 \cdot 1,8863}{1,3145 + 1,8863} = 1,051.$$

Начальные значения периодической составляющей тока K3 от генератора $G_{\rm l}$

$$I_{noG_1} = \frac{E}{\frac{*}{1(\delta)}} I_{\delta 11} = \frac{1,124}{1,374} \cdot 55 = 44,993 \ \kappa A;$$

от генератора G2 и системы

$$I_{noG_2} = \frac{\frac{E}{*}_{3(\delta)}}{X_{*1\delta(\delta)}} I_{\delta 11} = \frac{1,051}{1,287} \cdot 55 = 44,91 \ \kappa A;$$

в месте КЗ

$$I_{nO} = 44,993 + 44,91 = 89,903 \ \kappa A.$$

Найдем значение периодической составляющей тока КЗ от генератора G₁ через 0,15 *с*.

$$I_{nOG_{1}(HOM)} = I_{nOG_{1}(\tilde{\sigma})} \frac{S_{\tilde{\sigma}}}{S_{HOM}} = \frac{1,124 \cdot 1000}{1,374 \cdot 110 / 0,8} = 5,95.$$

По кривым на рисунке 2.12 а при $t = 0,15 \ c$ находим $\gamma_{kt} = 0,71$ и тогда I_{kt} и I_{ko} – периодическая составляющая тока в месте КЗ соответственно в момент I_{ntG_2c} и начальный момент; γ_{kt} – коэффициент затухания тока КЗ при изменении времени действующего значения периодической составляющей тока КЗ от синхронного генератора с тиристорной независимой системой возбуждения (*a*) и зависимость коэффициента затухания токов в месте КЗ в генераторе (δ)

$$I_{ntG_1} = 0.71 \frac{1.124}{1.374} 55 = 31.945 \ \kappa A$$



Рис. 2.12. Кривые изменения во времени коэффициента затухания

Порядок определения периодической составляющей тока КЗ от генератора G_2 и системы, т.е. тока I_{ntG_2c} :

1) из схемы (рис. 2.11 б) определяем значение периодической составляющей тока генератора G₂ в начальный момент K3 (в относительных единицах при базисных условиях)

$$I_{noG_2(\delta)} = \frac{\frac{E_{2(\delta)} - I_{*noG_2c} X_{12(\delta)}}{X_{*15(\delta)}}}{\frac{1,124 - (1,051/1,287) \cdot 0,5123}{1,8863}} = 0,374;$$

2) удаленность находится как отношение периодической составляющей тока генератора (синхронного компенсатора) в начальный момент КЗ I_{no} к номинальному току машины I_{HOM} и может быть найдена как

$$I_{*nO(HOM)} = \frac{I_{*nO(\tilde{o})} S_{\tilde{o}}}{S_{HOM}} = 0,374 \frac{1000}{110/0,8} = 2,72;$$

находим I_{nOG_2} / I_{nOG_2c} как

$$\frac{I_{nOG_2}}{I_{nOG_2c}} = \frac{I_{*nOG_2(\delta)}I_{G11}}{I_{nOG_22c}} = \frac{0.375 \cdot 55}{44.91} = 0.458.$$

Хотя $I_{*nOG_2(nom)} > 2$, но $I_{nOG_2} / I_{nOG_2c} < 0,5$ поэтому изменением амплитуды периодической составляющей тока от генератора G2 и системы можно пренебречь и считать $I_{ntG_2c} = I_{nOG_2c} = 44,91 \ \kappa A$. Таким образом, суммарный ток в месте K3 в момент $t = 0,15 \ c$, $I_{\kappa 1} = I_{ntG_1} + I_{ntG_2} = 31,945 + 44,91 = 76,855 \ \kappa A$.

Ударный ток КЗ от генератора G1

$$I_{y\partial G_1} = \sqrt{2}I_{nOG_1} \left(1 + \frac{-0.01/T_a}{2} \right) = \sqrt{2} \cdot 44,993 \left(1 + e^{-0.01/0.41} \right) = 125,707 \quad \kappa A.$$

Чтобы вычислить ударный ток КЗ от генератора G2 и системы, необходимо предварительно определить соответствующую эквивалентную постоянную времени затухания апериодической составляющей тока КЗ $T_{nG_{2}c}$. Известно, что

$$X_{*_{c(\tilde{o})}} = \frac{I_{\delta N}}{I_c},$$

где $I_{\delta N}$ – базисный ток той ступени напряжения сети, на которой задан ток I_c и из рисунка 2.11 находим

$$X'_{*15(\delta)} = X'_{2(\delta)} + X_{*13(\delta)} = 1,673 + 0,5123 = 2,1853;$$

$$X'_{*16(\delta)} = X_{*14(\delta)} \cdot X'_{*15(\delta)} / \left(X'_{*15(\delta)} + X_{*12(\delta)}\right) + X_{*12(\delta)} = \frac{1,3145 \cdot 2,1853}{2,1853 + 1,3145} + 0,5123 = 1,331,$$

а из схемы (рис. 2.13) при не учете индуктивных сопротивлений определяем

$$R_{*11(\delta)} = \frac{R_{*3(\delta)} R_{*4(\delta)}}{R_{*3(\delta)} + R_{*4(\delta)} + R_{*6(\delta)}} = \frac{0,049 \cdot 0,049}{2 \cdot 0,049 + 0,0154} = 0,0212;$$

$$R = R = \frac{0,049 \cdot 0,0154}{2 \cdot 0,0154} = 0,00665.$$

$$^{*}_{12(\delta)}$$
 $^{*}_{13(\delta)}$ $2 \cdot 0,049 + 0,0154$



Рис. 2.13. Схема замещения обратной последовательности

Дальнейшее преобразование схемы, составленной только из сопротивлений постоянному току и показанной на рисунке 2.14, дает

$$\begin{split} R_{*14(\delta)} &= R_{*19(\delta)} + R_{*11(\delta)} = 0,1571 + 0,0212 = 0,1783; \\ R_{*15(\delta)} &= R_{*2(\delta)} + R_{*13(\delta)} = 0,013 + 0,00665 = 0,01965; \\ R_{*16(\delta)} &= \frac{R_{*14(\delta)} \cdot R_{*15(\delta)}}{R_{*14(\delta)} + R_{*15(\delta)}} + R_{*12(\delta)} = \frac{0,1783 \cdot 0,01965}{0,1783 + 0,01965} + 0,00665 = 0,02435; \end{split}$$



Рис. 2.14. Преобразование схемы замещения, составленной из сопротивлений постоянному току, относительно точки К₂

Преобразованная схема представлена на рисунке 2.14 б. Таким образом

$$T_{aG_{2}c} = \frac{X_{*16(\delta)}}{\omega R_{*16(\delta)}} = \frac{1,3331}{314 \cdot 0,02435} = 0,1744$$

и ударный ток от генератора G2 и системы

$$I_{y\partial G_2} = \sqrt{2}I_{nOG_2} \left(1 + \frac{-0.01/T_{aG_2c}}{2} \right) = \sqrt{2} \cdot 44,91 \left(1 + \frac{-0.01/0.1744}{2} \right) = 123,487 \quad \kappa A.$$

Суммарный ударный ток в месте КЗ

 $I_{y\partial} = i_{y\partial G_1} + i_{y\partial G_2} = 125,707 + 123,487 = 249,194 \quad \kappa A.$

Для решения задачи: $I_{nc} = I_{nOG_2} = 44,91 \ \kappa A$; $I_{nO_2} = I_{nOG_1} = 44,993 \ \kappa A$; $I_{*nOG_1(nom)} = 5,95$; $T_{az} = T_{aG_1} = 0,41 \ c$; $T_{a_{3\kappa}} = T_{aG_2c} = 0,1744 \ c$. Pac-

четная продолжительность КЗ $t_{om\kappa\pi} = t_{B om\kappa\pi} + t_3 = 0,2 + 0,1 = 0,3 c.$

При $I_{*nOG_1(HOM)} = 5,95$ и $t_{omkn} = 0,3$ *с* по кривым (см. рис. 2.5 и 2.6) имеем $B_{*n2} = 0,56$ и $Q_{*n2} = 0,74$.

Поэтому
$$B_{\kappa n} = (I_{nc}^2 + 2I_{nc}I_{nO2} Q_{*_{\kappa 2}} + + I_{nO2}^2 B_{*_{\kappa 2}})t_{om\kappa n},$$

 $B_{\kappa n} = (44910^2 + 2.44910.44993.0,74 + 44993^2.0,56)0,3 = = 1842,3288.10^6 A^2.c,$

а из

$$\begin{split} B_{\kappa a} &= I_{nc}^{2} T_{a 3 \kappa} \left[1 - exp \left(-\frac{2t_{om \kappa \pi}}{T_{a 3 \kappa}} \right) \right] + I_{nOe}^{2} T_{a 2} \left[1 - exp \left(-\frac{2t_{om \kappa \pi}}{T_{a 2}} \right) \right] + \\ &+ \frac{4I_{nc} I_{nOe}}{\frac{1}{T_{a 3 \kappa}}} + \frac{1}{T_{a 2}} \left\{ \left[1 - exp \left(-t_{om \kappa \pi} \left(\frac{1}{T_{a 3 \kappa}} + \frac{1}{T_{a 2}} \right) \right) \right] \right\}. \\ B_{\kappa a} &= 44910^{2} \cdot 0,1744 \left[1 - exp \left(-\frac{2 \cdot 0,3}{0,1744} \right) \right] + 44993^{2} \cdot \\ &\cdot 0,41 \left[1 - exp \left(-\frac{2 \cdot 0,3}{0,41} \right) \right] + \frac{4 \cdot 44910 \cdot 44993}{\frac{1}{0,1744}} \cdot \\ &\frac{1}{0,1744} + \frac{1}{0,41} \\ &\cdot \left\{ \left[1 - exp \left(-0,3 \left(\frac{1}{0,1744} + \frac{1}{0,41} \right) \right) \right] \right\} = 1882,1612 \cdot 10^{6} \ A^{2} \cdot c \ . \end{split}$$

При этом

$$B_{\kappa} = B_{\kappa n} + B_{\kappa a} = 1842,3288 \cdot 10^6 + 1882,1612 \cdot 10^6 = 3724,49 \cdot 10^6 \quad A^2 \cdot c.$$

Поскольку $t_{omkn} = 0,3 \ c$, a $t_{mep.hopm} = 4 \ c$, т.е. $t_{omkn} < t_{mep.hopm}$, то $B_{mep} = t_{mep.hopm}^2 \cdot t_{omkn} = 90^2 \cdot 0,3 \ \kappa A^2 \cdot c$.

Таким образом, $B_{\kappa} > B_{mep}$, т.е. выключатель МГУ-20-90/6300УЗ не удовлетворяет условию термической стойкости при КЗ. Очевидно, для ограничения тока КЗ в цепях трансформаторов СН следует принять необходимые меры.

2. Для присоединения трансформаторов СН **выбрать** минимальное сечение алюминиевых шин, удовлетворяющее условию термической стойкости при КЗ.

Решение. С некоторым запасом минимальное сечение шин можно определить по формуле

$$s_{mep...muh} = \sqrt{B_k} / C_{\tau}$$

где $C_{\tau} = \sqrt{A_{g_{oon}} - A_{g_{nom}}}$, $A_{g_{nom}}$ – значение функции A_{g} при продолжительно допустимой температуре проводника g_{nom} .

При КЗ в присоединении трансформатора $B_{\kappa} = 3724,49 \cdot 10^6 A^2 \cdot c$ (см. задачу 1), а для алюминия $C_{\tau} = 90 A c^{1/2} / M M^2$, поэтому

$$s_{mep.Muh} = \sqrt{3724,49 \cdot 10^6} / 90 = 678,1 \ MM^2$$

По таблице номинальных размеров алюминиевых шин (табл. 7.2 в [1]) выбираем шину сечением 80×10 или 100×8 мм².

3. Определить длительный ток через токоведущий элемент в виде медного стержня $d = 0,035 \ m$. Наружная изоляция выполнена многослойной из хлопчатобумажной ленты, пропитанной глифталевым лаком (класс изоляции А). Толщина изоляции $10^{-3} \ m$. Найти также допустимый ток КЗ при длительности его протекания 5 с. Частота тока 50 Гц.

Решение. Температура на поверхности стержня определяется

$$\Theta_{npos} = \Theta_0 + \frac{\Phi}{k_{\tau}\pi Dl} + \frac{\Phi}{\lambda 2\pi l} ln \frac{D}{d};$$

$$\Phi = I^2 R k_{do\delta} = \left(\Theta_{npos} - \Theta_0\right) \frac{2\pi k_{\tau} Dl\lambda}{2\lambda + k_{\tau} D ln \frac{D}{d}} = \left(\Theta_{npos} - \Theta_0\right) \frac{1}{R_{\tau.pes}}$$

Расчет проведем для единицы длины стержня (формула Ньютона):

$$I = \sqrt{\frac{\left(\Theta_{npoo} - \Theta_{0}\right)2\pi k_{\tau} D l \lambda}{R k_{\partial o \delta} \left(2\lambda + k_{\tau} D \ln \frac{D}{d}\right)}}$$

Поскольку изоляция относится к классу *A*, то температура провода на поверхности $\Theta_{npoe} = 105 \ ^{0}C$. Наибольшее значение $\Theta_{0} = 40 \ ^{0}C$. Коэффициент теплообмена $k_{\tau} = 11 - 13 \ Bm / m^{2} \cdot C^{2}$. Удельная теплопроводность пропитанной хлопчатобумажной изоляции $\lambda = 0,114 \ Bm/m \cdot ^{0}C$.

Коэффициент добавочных потерь $k_{\partial o \delta}$ определяется с помощью рисунка 2.1.

Удельное сопротивление ρ при температуре 105 ⁰C.

$$\rho = \rho_0 (1 + a_R \Theta) = 1,55 \cdot 10^{-8} (1 + 0,004 \cdot 105) = 2,2 \cdot 10^{-8} \ O_M \cdot M.$$

Аргумент $\sqrt{\frac{8\pi f}{R_{\infty} \cdot 10^{-7}}} = 2,36$, тогда $k_{\partial o \delta} = 1,118.$

Сопротивление единицы длины стержня на постоянном токе

$$R_{\infty} = \frac{\rho}{q} \frac{2,2 \cdot 10^{-8} \cdot 4}{\pi (3,5)^2 \cdot 10^{-4}} = 0,23 \cdot 10^{-4} \ O_{M};$$

$$I = \sqrt{\frac{(105 - 40) \cdot 2 \cdot 3,14 \cdot 12(0,035 + 0,002) \cdot 0,114}{1,118 \cdot 0,23 \cdot 10^{-4} \left(0,114 \cdot 2 + 12 \cdot 0,037 \ln \frac{0,037}{0,035}\right)}} = 1690 \ A.$$

При отсутствии изоляции D = d и допустимый ток равен 1760 A.

В данном случае отдача тепла с наружной поверхности происходит в основном за счет излучения и конвекции. Уточним значение допустимого тока для неизолированного провода, учитывая раздельно эти виды теплоотдачи.

Тепло, отдаваемое излучением на длине 1 м,

$$\Phi_{u3} = c_0 \varepsilon \left[\left(\frac{T_2^4}{1000} \right) - \left(\frac{T_1^4}{1000} \right) \right] S;$$

 $T_2 = 105 + 273 = 378 \ K; \ T_1 = 40 + 273 = 313 \ K; \ c_0 = 5,7 \cdot 10^4 \ Bm/m^2 K;$ для окисленной меди $\varepsilon = 0,78;$

$$S = \pi dl = \pi \cdot 0,035 \cdot 1 = 1100 \ cm^2$$
;

$$\Phi_{u_3} = 5,7 \cdot 0,78 \left[\left(\frac{378^4}{1000} \right) - \left(\frac{317^4}{1000} \right) \right] 0,11 \cdot 10^4 = 49 \ Bm/m;$$

$$\Phi_{\kappa} = 3,5 \cdot 10^{-4} \left(\frac{1}{d} \right)^{0,25} \left(\Theta_{npo\theta} - \Theta_0 \right)^{1,25} S =$$

$$= 3,5 \cdot 10^{-4} \left(\frac{1}{3,5} \right)^{0,25} (105 - 40)^{1,25} 1100 = 46,3 \ Bm/m.$$

Полная мощность, отдаваемая с единицы длины стержня,

$$I^{2}Rk_{\partial o\delta} = \Phi_{u3} + \Phi_{\kappa o \mu} = 49 + 46,3 = 95,3 \ Bm / M;$$
$$I = \sqrt{\frac{\Phi_{u3} + \Phi_{\kappa o \mu}}{Rk_{\partial o\delta}}} = \sqrt{\frac{95,3}{1,18 \cdot 0,23 \cdot 10^{-4}}} = 1860 \ A.$$

Таким образом, расчет по формуле Ньютона дает результат (1690 *A*), который на 5,4 % ниже результата по более точным формулам (1860 *A*).

Определение допустимого тока КЗ:

$$k_{\partial o \delta} \frac{I^2}{q^2} l = A_{\Theta_k} - A_{\Theta_{HOM}}; \ \Theta_{\kappa} = 250 \ {}^{0}C; \ \Theta_{HOM} = 75 \ {}^{0}C.$$



Рис. 2.15. К определению температуры проводников при КЗ

Используя рисунок 2.15, получаем

$$A_{\Theta_{k}} = 3,65 \cdot 10^{4}; \quad A_{\Theta_{HOM}} = 2 \cdot 10^{4}; \quad \Theta_{cp} = \frac{\Theta_{HOM} - \Theta_{\kappa}}{2} = 177,5 \ ^{0}C \quad \text{при}$$
$$\Theta_{cp} = 177,5 \ ^{0}C \quad \text{и} \quad k_{\mathcal{I}} = 1,1;$$
$$I = \sqrt{\frac{(A_{\Theta_{k}} - A_{\Theta_{HOM}})q^{2}}{k_{\mathcal{I}}t}} = \sqrt{\frac{(3,65 - 2)10^{4} \cdot 960^{2}}{1,1 \cdot 5}} = 51500 \quad A.$$

2.5. Тепловой расчет электрических аппаратов и их частей с учетом совместного действия теплопроводности, конвекции и излучения

4. Определить допустимый ток для алюминиевой круглой шины, изолированной слоем бумажной изоляции $\delta = 3 \, mm$. Диаметр шины $d = 30 \, mm$. Максимальная допустимая температура наружной поверхности изоляции $\mathcal{P}_{hap} = 50 \, {}^{0}C$, шина расположена горизонтально в спокойном воздухе, температура которого $\mathcal{P}_{0} = 35 \, {}^{0}C$.

Решение. Составим эквивалентную схему замещения для данного случая. В результате большой теплопроводности алюминия по сравнению с теплопроводностью бумажной изоляции тепловым сопротивлением шины пренебрегаем. Схема замещения изображена на рисунке 2.16. Тепловые сопротивления на единицу длины шины определяем из таблицы 2.3.



Рис. 2.16. Схема замещения изолированной шины

№ п/п	Наименование	Эскиз	Тепловое сопротивление, <i>К/Вт</i>		
1	2	3	4		
1	Плоская стенка без внутренних источников теплоты	Ф Ф	$R_r = \frac{\delta}{\lambda S}$		
2	Слоистая плоская стенка без внутренних источников теплоты	$\delta_1 \delta_2 \delta_n$	$R_r = \frac{1}{S} \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i}$		
3	Цилиндрическая стенка без внутренних источников теплоты	r P	$R_r = \frac{\ln(R/r)}{2\pi\lambda l}$		
4	Слоистая цилиндриче- ская стенка без внутрен- них источников теплоты	¢ R ₁ R ₂ R _{n+1}	$R_r = \frac{1}{2\pi l} \sum_{i=1}^n \frac{ln \frac{R_{i+1}}{R_i}}{\lambda_i}$		
5	Плоская стенка с рав- номерно распределен- ными источниками теплоты	S S O	$R_r = \frac{\delta}{2\lambda S}$		

Формулы для определения тепловых сопротивлений в некоторых частных случаях

Окончание табл. 2.16

1	2	3	4
6	Цилиндрическая стен- ка с равномерно распре- деленными источниками теплоты (теплоотдача с наружной поверхности)	r q t	$R_r = \frac{1}{2\pi\lambda} \left[\frac{1}{2} - \frac{r^2 \ln(R/r)}{a^2 - r^2} \right]$
7	Цилиндрическая стен- ка с равномерно распре- деленными источниками теплоты (теплоотдача с внутренней поверхно- сти)		$R_r = \frac{1}{2\pi\lambda} \left[-\frac{1}{2} + \frac{R^2 \ln(R/r)}{R^2 - r^2} \right]$
8	Сплошной цилиндр с равномерно распреде- ленными в нем источни- ками теплоты		$R_r = \frac{1}{4\pi\lambda l}$
9	Между твердой по- верхностью площади <i>F</i> и газообразной или жидкой средой	→	$R_r = \frac{1}{k_r F}$
10	Однородный стержень без внутренних источ- ников теплоты	¢ S I	$R_{r} = \frac{1 + pe^{-2al}}{(1 + pe^{-2al})\sqrt{k_{r}f\lambda S}};$ $a = \sqrt{\frac{k_{r}f}{\lambda S}};$ $p = \frac{a - m}{a + m}; m = \frac{k_{r}}{\lambda};$ где f — периметр поперечного сечения

$$R_{r1} = \frac{1}{2\pi\lambda} ln \frac{R}{r} = \frac{1}{2 \cdot 3, 14 \cdot 0, 14} ln \frac{18}{15} = 0,207 \ K / Bm;$$
$$R_{r2} = \frac{1}{k_{m,\kappa}F} = \frac{1}{k_{m,\kappa}\pi(d+2\delta)} = \frac{1}{k_{m,\kappa} \cdot 3, 14 \cdot 36 \cdot 10^{-3}} = \frac{8,9}{k_{m,\kappa}}.$$

где $\lambda = 0.14 \ BT / M \cdot K$ – теплопроводность бумаги (см. табл. 2.4); $R = d / 2 + \delta = 18 \ MM;$

 $k_{m.u}$, $k_{m.\kappa}$ – соответственно коэффициенты теплоотдачи излучением и конвекцией с поверхности бумажной изоляции к окружающей среде;

$$R_{r3} = \frac{1}{k_{m.u}F} = \frac{8,9}{k_{m.u}}.$$

Таблица 2.4

Значение коэффициента теплопроводности изоляции различных обмоточных проводников

Марка провода	пож	ПСМДК-1	псдк	псд	ПДА	пэл
λ , Вт/м К	0,2	0,2	0,157	0,222	0,104	0,08
⁰ C	300-500	250-350	150-350	100-250	50-200	50-140
Марка провода	ПЭВ	ПЭВТЛ	ПЭТВ	ПЭЛШО	ПЭТЛО	ПБД, ПОБД (пропи- таны)
λ , Вт/м К	0,122	0,134	0,120	0,078	0,097	0,13
⁰ C	50-140	50-140	50-140	50-140	50-140	50-140

Общее сопротивление тепловому потоку $R_{r.\Sigma} = 0,207 + \frac{8,9}{k_{m.\kappa} + k_{m,u}}$.

Тепловой поток на единице длины шины:

$$P = I^{2} \rho_{0} \frac{1 + a \mathcal{G}_{_{GH}}}{S} = I^{2} \frac{2,62 \cdot 10^{-8} \cdot 4}{3,14 \cdot 10^{2} \cdot 10^{-6}} (1 + 4,2 \cdot 10^{-3} \mathcal{G}_{_{GH}}) = 3,7 \cdot 10^{-5} I^{2} (1 + 4,2 \cdot 10^{-3} \mathcal{G}_{_{GH}}),$$

где $\rho_0 = 2,62 \times 10^{-8} OM M$ (см. табл. 2.5);

 $\mathcal{G}_{_{GH}}$ – температура внутренней поверхности изоляции; $a = 4,2 \cdot 10^{-3} K^{-1}$ (см. табл. 2.5).

Коэффициент теплопередачи конвекцией определяется по формуле

$$k_{m.\kappa} = \frac{N_{u_{\phi}} \lambda_{\phi}}{L} = 6.3 \ Bm / M^2 K.$$

Коэффициент теплоотдачи излучением определяется по формуле

$$k_{m.u} = \frac{p_u}{\vartheta_{hap} - \vartheta_0} = 0,65 \ Bm / M^2 K,$$

где $N_{u_{\phi}} = C(G_r P_r)_{\phi}^n$ определяем из формулы критериального уравнения для свободной конвекции в неограниченном пространстве при $P_{r_{\phi}} = P_{r_c}$ и $N_{u_{\phi}} = C(G_r P_r)_{\phi}^n (P_{r_{\phi}} / P_{r_c})^{0.25}$, которая, в общем виде, представляется как

$$N_u = f(G_r, P_r, R_e, F_0),$$

где N_u, G_r, P_r, R_e, F_0 – соответственно критерии Нуссельта, Грасгофа, Прандтля, Рейнольдса, Фурье:

$$N_{u} = k_{m,\kappa} L / \lambda;$$

$$G_{r} = \beta g L^{3} (\vartheta - \vartheta_{0}) / v^{2};$$

$$P_{r} = \mu g c_{p} / \lambda;$$

$$R_{e} = w L / v;$$

$$F_{0} = a t / L^{2};$$

где $k_{m_{K}}$ – коэффициент теплопередачи конвекцией, $Bm/(M^{2}K)$;

- L характерный геометрический размер, *м*;
- λ коэффициент теплопроводности, Bm/(MK);
- β коэффициент объемного расширения, K^{1} ;
- \mathscr{G} температура поверхности, ^{θ}С;
- \mathcal{G}_0 температура окружающей среды, ${}^{\theta}C$;
- v кинетическая вязкость жидкости или газа, m^2/c ;
- *μ* динамическая вязкость жидкости или газа, *Hc/м*²;
- g ускорение силы тяжести, m/c^2 ;

 c_p – удельная теплоемкость жидкости или газа при постоянном давлении, $Д \mathscr{K} / (\kappa \Gamma K)$;

w – скорость, M/c;

 $a - коэффициент температуропроводности, <math>m^2/c$;

t – время, c.

Таблица 2.5

Физические постоянные проводников и реостатных матер	алов,
применяемых в электрических аппаратах	

Материал	Шлотность, кг/м ²	Удельное сопротивлени при 0 ⁰ С, 10 ⁻⁸ Ом м	Температурный коэф- фициент сопротивления 10 ⁻³ К ⁻¹	Теплопроводность при 0 ⁰ С, Вт/м К ⁻¹	Температурный коэффициент теплопро- водности , 10 ⁻⁴ К ⁻¹	Теплоемкость, Дж/кг К ⁻¹	Температурный коэффициент теплоемкости, 10 ⁻⁴ К ⁻¹	Температура плавления, ⁰ С	Температура испарения, ⁰ С	Модуль упругости, 10 ¹⁰ Н/м ²
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Алюминий твердотяну- тый	2700	2,62	4,2	210	4,5	950	4,7	660	1800	7,06
Бронза оло- вянистая твердотянутая	8700	14-16	0,6-0,7	64	17-20	360	-	900- 950	-	10,8- 11,8
Бронза берил- лиевая литая	8220	7,2-9	I	84,0	-	140		I	-	-
Бронза берил- лиевая твер- дотянутая	_	5,3	_	170	_	_	_	-	-	10,3
Вольфрам	19300	5,1	4,2	170	3	140	0,3	3410	5900	34,3

Окончание табл. 2.5

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Графит	1700-	700-	-1,3	160	-510	650-	35	-	3650	0,3-0,9
	1800	1400				850				
Дюралюмин	2750	3,3	2,2	160	-	930	-	650	-	7,0
Железо	7900	9-10	6,5	79,5	-3,9	640	6,5	1530	2450	19,6-
										21,6
Кадмий	8640	7,0	4,3	92	-1,2	230	1	321	770	4,9-6,7
Латунь Л68	8500	7,0	1,5	100	-	380	1,1	900	-	10,8
твердотянутая										
Латунь Л62	-	7,2	-	-	-	-	-	900	-	9,8
твердотянутая										
Латунь Л59	8900	7,2	-	-	-	-	-	900	-	10,9-
отожженная										9,8
Медь твер-	8700-	1,62	4,3	390	-	390	1,0	1083	2600	10,8-
дотянутая	8900									8,12
Нихром	8200	100-112	0,14	-	-	-	-	1390	-	-
(X201180)										
(1000-1100)										
Сталь	7800	10-13	9,0	40	-4	470	7,3	1300-	-	20,6-
								1400		21,6
Серебро твер-	10500	1,5	4,0	420	-9,5	234	0,77	960	1955	7,4
дотянутое										
Олово	7300	11,0	4,5	64	-4,7	230	1,3	232	2270	3,9-6

Индекс у критерия подобия обозначает, что при вычислении соответствующего критерия физические параметры необходимо вычислять при температуре с тем же индексом.

 \mathcal{G}_c – температура поверхности тела.

$$\mathcal{G}_{\phi} = \left(\mathcal{G} + \mathcal{G}_0\right)/2.$$

Таблица 2.6

Значения величин С и П

Значения величин $(CU)n \cdot (G_r P_r)_m$	с	п	$(G_r P_r)_{cp}$	A	r
Меньше 10 ⁻³	0,5	0,0	Меньше 10 ³	1	0
$10^{-3} - 5 \cdot 10^2$	1,18	0,125	$10^3 - 10^6$	0,105	0,3
$5 \cdot 10^2 - 2 \cdot 10^7$	0,54	0,25	10^{6} - 10^{10}	0,4	0,2
$2 \cdot 10^7 - 10^{13}$	0,135	0,33			

Для случая, когда тело находится на достаточном удалении от других тел (в окружающей среде с температурой T₀, *K*) тепло-

вой поток излучением с его поверхности определяется по формуле

$$p_u = 5,67\varepsilon \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_0}{100} \right)^4 \right].$$

Тогда уравнениями для решения задачи будут

$$PR_{r.\Sigma} = \mathcal{G}_{_{6H}} - \mathcal{G}_{_{0}};$$

$$PR_{r.1} = \mathcal{G}_{_{6H}} - \mathcal{G}_{_{hap}}, \text{ t.e.}$$

$$3,7 \cdot 10^{-5} I^{2} (1 + 4,2 \cdot 10^{-3} \mathcal{G}_{_{6H}}) [0,207 + 8,9/(6,3 + 0,65)] = \mathcal{G}_{_{6H}} - \mathcal{G}_{_{0}};$$

$$3,7 \cdot 10^{-5} I^{2} (1 + 4,2 \cdot 10^{-3} \mathcal{G}_{_{6H}}) 0,207 = \mathcal{G}_{_{6H}} - \mathcal{G}_{_{hap}}.$$

Ответ: $\mathcal{P}_{_{GH}} = 55,6 \ ^{0}C; I = 350 A.$

Решение. Исходными уравнениями для решения задачи будут

$$I^{2}R_{0}(1+a\vartheta_{_{\theta H}})R_{_{\Gamma\Sigma}}=\vartheta_{_{\theta H}}-\vartheta_{_{0}}; \quad I^{2}R_{0}(1+a\vartheta_{_{\theta H}})R_{_{\Gamma1}}=\vartheta_{_{\theta H}}-\vartheta_{_{Hap}}.$$

Подставляя числовые значения, получим следующую систему уравнений:

$$5 \cdot 10^{-5} I^{2} \left(0,207 + \frac{8,9}{k_{m,\kappa} + k_{m,\mu}} \right) = 45;$$

$$5 \cdot 10^{-5} I^{2} \cdot 0,207 = 80 - 9_{\mu ap},$$

решая которую имеем

$$\frac{80 - \mathcal{9}_{\mu a p}}{0,207} \left(0,207 + \frac{8,9}{k_{m,\kappa} + k_{m,\mu}} \right) = 0,45.$$

В последнем уравнении температура $\mathcal{G}_{\mu a p}$ входит в неявном виде в член $k_{m,\kappa} + k_{m,u}$, который зависит от температуры наружной поверхности. Построив зависимость $y = f(\mathcal{G}_{\mu a p})$ решим это уравнение графически:

$$y = \frac{80 - 9_{_{Hap}}}{0.207} \left(0.207 + \frac{8.9}{k_{_{m.\kappa}} + k_{_{m,u}}} \right).$$

В точке, где график этой функции пересечет прямую y = 45, получим искомое значение $\mathcal{9}_{nap} = 68.3 \ ^{0}C$ (рис. 2.17).



Рис. 2.17. График для определения температуры наружной поверхности шины

Подставляя это значение в одно из уравнений системы, получаем $I_{don} = 1040 \ A$.

Ответ: $I_{\partial on} = 1040 \ A.$

6. Определить допустимый ток для медной шины прямоугольного сечения, заключенной в прямоугольный короб, изготовленный из текстолита толщиной $\delta = 4$ *мм*. Шина расположена горизонтально в спокойном воздухе, температура которого $\mathcal{9}_0 = 35 \ ^0C$, ее поперечные размеры 50×6 *мм*. Зазор между коробом и шиной $\Delta = 1$ *мм*. Шина окислена, степень черноты излучения текстолита $\varepsilon = 0.8$, а допустимая температура наружной поверхности текстолита $9_{don} = 80$ ⁰*C*.

Решение. Эквивалентная схема замещения изображена на рисунке 2.18 а.



Рис. 2.18. Схема замещения (*a*) и зависимость мощности источника теплоты от максимальной температуры (б)

Тепловые сопротивления на единицу длины шины определяем по формулам таблицы 2.3, т.е. $R_{r4} = \frac{1}{k_{m,\nu}F}$ и $R_{r5} = \frac{1}{k_{m,\kappa}F}$.

Общее сопротивление теплоотдачи с поверхности короба в окружающую среду

$$R_{r6} = R_{r4}R_{r5}(R_{r4} + R_{r5}) = \frac{1}{F(k_{m.u} + k_{m.\kappa})} = \frac{1}{152 \cdot 10^{-3}(7,05 + 6,55)} = 0,485 \ K / Bm,$$

где $k_{m.\kappa} = 7,05 \ Bm / M^2 K$ определяется по критериальному уравнению $N_{u_{\phi}} = C(G_r P_r)_{\phi}^n (P_{r_{\phi}} / P_{r_c})_{c}^{p.25};$

$$k_{m.u} = 6,55 \ Bm / M^2 K$$
 – из уравнения теплоотдачи излучени-
ем $p_u = 5,67 \varepsilon \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_0}{100} \right)^4 \right];$

 $F = 2(50 + 2 + 8 + 6 + 2 + 8)152 \cdot 10^{-3} \ m^2$ — площадь охлаждающей поверхности наружной части короба длиной 1 *м*.

Тогда тепловой поток через сопротивление R_{r6}

$$P = (9_{\partial on} - 9_0) / R_{r.6} = (80 - 35) / 0.485 = 93 Bm.$$

Тепловое сопротивление стенки короба толщиной $\delta = 4$ мм

$$R_{r3} = \frac{\delta}{\lambda S} = \frac{4 \cdot 10^{-3}}{0.17 \cdot 120 \cdot 10^{-3}} = 0.196 \ K / Bm,$$

где $\lambda = 0,17 \ BT / M \cdot K$ (см. табл. 2.7); $S = 2(50 + 2 + 6 + 2) = 120 \cdot 10^{-3} \ M^2$.

Таблица 2.7

Физические характеристики изоляционных материалов

Наименование материала	Плотность <i>γ</i> , <i>кг/м</i> ³	Теплопроводность λ, Вт/м·К	Удельная теплоемкость С, Дж/кг·К
1	2	3	4
Аминопласт	1600-1800	0,126-0,314	1670
Асбест листовой	770	0,117	815
Бакелит	150-1080	0,12-0,25	1250-1670
Битум (температура размягче- ния 100 ⁰ C)	1000-1400	0,1	_
Бумага обыкновенная	-	0,14	1510
Бумага, пропитанная маслом	700-800	0,21	-

Окончание табл. 2.7

1	2	3	4
Винипласт	1300-1400	0,163-0,167	-
Гетинакс	1250-1400	0,17-0,173	1250-1650
Картон	900-1100	0,12-0,16	1500
Лакоткани	900-1200	0,12-0,26	-
Песок речной сухой	1500	0,3-0,38	790
Полихлорвинил	1250-1400	0,09	-
Полиэтилен	920-960	0,25-0,33	2100-2900
Прессшпан	900-1150	0,22-0,26	-
Резина	1200	0,16	1380
Слюда	2800-3000	0,43-0,48	-
Стеклоткани на кремнийорганике	1250-1350	0,2-0,26	_
Текстолит	1300-1400	0,17-0,175	1250-1670
Фарфор изоляторный	2400	1,0-1,5	1090
Фторопласт-4	2100-2300	0,247-0,253	1050
Шелк	100	0,043-0,058	-
Эбонит	1150-1250	0,125-0,167	1400

Температура внутренней стенки короба

$$\mathcal{P}_1 = PR_{r3} + \mathcal{P}_{oon} = 93 \cdot 0.196 + 80 = 98.2 \ ^{0}C.$$

В воздушном зазоре $\Delta = 1$ *мм* имеет место теплопередача стесненной конвекцией и излучением. Так как расчет стесненной конвекции в конечном итоге сводится к расчету распространения теплоты теплопроводностью, то вычисления тепловых сопротивлений $R_{r1} = \frac{\Delta}{\lambda_{1_9}F_1}$ и $R_{r2} = \frac{\Delta}{\lambda_{2_9}F_1}$ производим как расчет тепловых сопротивлений плоской стенки без внутренних источников теплоты. Здесь λ_{1_9} определяем из формулы $\lambda_{_{9\kappa}} = \varepsilon_{\kappa}\lambda$, где $\lambda_{1_9} - 3\kappa$ ви-

валентный коэффициент теплопроводности, $Bm/M \cdot K$; λ – коэффициент теплопроводности при определенной температуре, $Bm/M \cdot K$; ε_{κ} – коэффициент конвекции,

$$\varepsilon_{\kappa} = A \left(G_{\gamma} P_{\gamma} \right)_{cp}^{\kappa};$$
$$g_{cp} = \left(g_{1} + g_{2} \right) / 2.$$

Величины A и r определяются из таблицы 2.6, а λ_{23} определяется из приведенных ниже соображений. Если \mathcal{G}_{uu} – температура поверхности шины, то количество теплоты, передаваемое от шины к коробу путем излучения с поверхности шины, определится из формулы

$$p_{u} = 5,67 \left[\left(\frac{9_{u} + 273}{100} \right)^{4} - \left(\frac{9_{1} + 273}{100} \right)^{4} F_{1} / \left[\frac{1}{\varepsilon_{1}} + \frac{F_{1}}{F_{2}} \left(\frac{1}{\varepsilon_{2}} - 1 \right) \right] \right]$$

Если предполагать, что теплопередача идет теплопроводностью, то $p_u = \lambda_{2\varepsilon} (g_u - g_1) F_1 / \Delta$, откуда находим $\lambda_{2\nu} R_{r7} = R_{r1} R_{r2} / / (R_{r1} + R_{r2}) \frac{\Delta}{(\lambda_1 + \lambda_2)}$.

Примем $F_1 = F_2$, тогда $p = (\mathcal{G}_u - \mathcal{G}_1) / R_{\gamma 7}$.

Поскольку \mathcal{G}_{u} входит неявно в λ_{1_9} , а, следовательно, и в $R_{\gamma7}$, задачу следует решать подбором. Задаваясь произвольными значениями \mathcal{G}_{u} , построим график функций $p = p(\mathcal{G}_{u})$ (рис. 2.18 б). В точке пересечения кривой $p = p(\mathcal{G}_{u})$ с прямой p = 93 Bm определим искомое значение $\mathcal{G}_{u} = 123 \ ^{0}C$. Из выражения $I^{2}\rho_{0}(1 + a\mathcal{G}_{u})/S = p$ допустимый ток

$$I_{\partial on} = \sqrt{\frac{ps}{\rho_0 (1 + a \,\vartheta_{uu})}} = \sqrt{\frac{93 \cdot 50 \cdot 6 \cdot 10^{-6}}{1,62 \cdot 10^{-8} (1 + 0,0043 \cdot 123)}} = 1060 \quad A.$$

Значения ρ_0 и *а* приведены в таблице 2.5; $S = 50 \cdot 6 \cdot 10^{-6} M^2 -$ площадь поперечного сечения шины.

Omsem: $I_{don} = 1060 \ A.$

7. Определить допустимый ток для медной трубы с диаметрами $d_{_{6H}} = 12 \ MM$, $d_{_{Hap}} = 15 \ MM$, по которой протекает вода со скоростью $w = 0.5 \ M/c$. Температура воды на входе в трубу $\mathcal{G}_{_{6x}} = 20 \ ^{0}C$, на выходе $\mathcal{G}_{_{6bx}} = 30 \ ^{0}C$. Труба расположена горизонтально в спокойном воздухе, ее поверхность окрашена масляной краской. В результате длительной эксплуатации внутренняя поверхность трубы покрылась слоем накипи, толщина которой $\delta = 1 \ MM$, а теплопроводность $\lambda = 0.8 \ Bm/M \cdot K$. Допустимая температура наружной поверхности трубы $\mathcal{G}_{_{don}} = 50 \ ^{0}C$, температура окружающего воздуха $\mathcal{G}_{_{0}} = 35 \ ^{0}C$.



Решение. Схема замещения показана на рисунке 2.19.

Рис. 2.19. Схема замещения

Здесь $R_{\gamma 1} = \delta / \lambda S = 1 \cdot 10^{-3} / 0.8 \cdot 3.14 \cdot 10 \cdot 10^{-3} = 0.04 \ K / Bm$ – тепловое сопротивление слоя накипи; $R_{\gamma 2} = 1 / k_{m.вн} F_{вH} = 1 / 2800 \cdot 3.14 \cdot 10 \cdot 10^{-3} = 0.0113 \ K / Bm$ – тепловое сопротивление теплоотдачи в воду; $k_{m.вH} = 2800 \ Bm / M^3 \cdot K$ определяем из критериальных уравнений при протекании жидкости в гладких трубах.

Критериальные уравнения конвективной теплоотдачи при протекании жидкости или газа в гладких трубах (кроме жидких металлов):

-для $R_{e_{\infty}} \le 2200$ (ламинарное движение)

$$N_{u_{\infty}} = 0.15 R_{e_{\infty}}^{0.33} P_{r_{\infty}}^{0.43} G_{r_{\infty}}^{0.1} (P_{r_{\infty}} / P_{r_{c}})^{0.25} \varepsilon_{1}.$$

где \mathscr{G}_{*} и \mathscr{G}_{c} – соответственно средние значения температур жидкости или газа и поверхности трубы;

$$\mathcal{G}_{\mathcal{H}} = \left(\mathcal{G}_{ex} + \mathcal{G}_{eblx}\right)/2,$$

 \mathcal{G}_{ex} и \mathcal{G}_{ebtx} – соответственно температуры жидкости или газа на входе в трубу и на выходе из нее, ⁰*C*.

Таблица 2.8

Значение коэффициента Е1

l/d	1	2	5	10	15	20	30	40	50
\mathcal{E}_1	1,90	1,7	1,44	1,28	1,18	1,13	1,05	1,02	1

Определяющим размером является внутренний диаметр трубы, а коэффициент ε_1 определяется из таблицы 2.8, в которой 1/d – отношение длины трубы к ее внутреннему диаметру.

-для R_{e} >10000 (турбулентное движение)

$$N_{u_{sc}} = 0.02 R_{e_{sc}}^{0.8} P_{r_{sc}}^{0.43} G_{r_{sc}}^{0.1} (P_{r_{cp}} / P_{r_c})^{0.25} \varepsilon_1 \varepsilon_R.$$

$$\varepsilon_R = 1 + 1.8d / R,$$

где d – внутренний диаметр трубы, *м*;

R – радиус закругления трубы.

Значение ε_1 определяется из таблицы 2.9.

Таблица 2.9

R		Значение $ arepsilon_1 $ при отношении I/d									
1 . **	1	2	5	10	15	20	30	40	50		
10 ⁴	1,65	1,50	1,34	1,23	1,17	1,13	1,07	1,03	1		
$2 \cdot 10^4$	1,51	1,40	1,27	1,18	1,13	1,10	1,05	1,02	1		
5·10 ⁴	1,34	1,27	1,18	1,13	1,10	1,08	1,04	1,02	1		
10 ⁶	1,28	1,22	1,15	1,10	1,08	1,06	1,03	1,02	1		
10^{8}	1,14	1,11	1,08	1,05	1,04	1,03	1,02	1,01	1		

Значение коэффициента \mathcal{E}_1

 $R_{\gamma 3} = 1/k_{m.nap}F_{nap} = 1/10,6 \cdot 3,14 \cdot 15 \cdot 10^{-3} = 2 \ K/Bm$ – тепловое сопротивление теплоотдачи с наружной поверхности воздуху; $k_{m.nap} = 10,6 \ Bm/m^2 \cdot K$, определяем из условия теплоотдачи конвекцией и излучением

$$F_{_{\theta H}} = \pi (d_{_{\theta H}} - 2\delta) = 3,14(12 - 2) \cdot 10^{-3} = 3,14 \cdot 10^{-2} \ \text{m}^2;$$

$$F_{_{Hap}} = \pi d_{_{Hap}} = 3,14 \cdot 15 \cdot 10^{-3} = 47,1 \cdot 10^{-3} \ \text{m}^2;$$

Количество теплоты, отдаваемое в воздух,

$$P_{\mu a p} = (\theta_{\partial o n} - \theta_0) / R_{r.3} = (50 - 35) / 2 = 7.5 Bm.$$

Количество теплоты, отдаваемое в воду,

$$P_{_{6H}} = \left(9_{_{\partial on}} - 9_{_{cp}}\right) / \left(R_{_{r.1}} + R_{_{r.2}}\right) = (50 - 25) / (0,04 + 0,0113) = 487 Bm,$$

где $9_{_{cp}} = 0.5(9_{_{6x}} + 9_{_{6blx}}) = 0.5(20 + 30) = 25 \ ^{0}C.$

Суммарное количество теплоты, отведенное от трубы, $P = P_{_{BH}} + P_{_{HAP}} = 487 + 7,5 = 494,5 Bm.$

Теплоту, выделенную в трубе, определим по формуле $I^2 R_0 (1 + a \mathcal{G}_{oon}) / S = P$, откуда допустимый ток

$$I_{\partial on} = \sqrt{\frac{PS}{\rho_0 (1 + a \mathcal{G}_{\partial on})}} = \sqrt{\frac{494, 5 \cdot 3, 14 (15^2 - 12^2) \cdot 10^{-6}}{4 \cdot 1, 62 \cdot 10^{-6} (1 + 0, 0043 \cdot 50)}} = 1400 \ A.$$

Ответ: $I_{don} = 1400 \ A.$

2.6. Неустановившиеся и квазистационарные процессы нагрева и охлаждения частей электрических аппаратов

В данном разделе приведены задачи на вычисление постоянных времени нагрева и охлаждения электрических аппаратов, написание уравнений кривых нагрева, на расчет повторно – кратковременного режима нагрева и наиболее важного режима короткого замыкания с использованием кривых адиабатического нагрева и понятия фиктивного времени КЗ. 8. Написать уравнение кривой нагрева круглого медного проводника диаметром $d = 10 \, \text{мм}$, по которому протекает постоянный ток $I = 400 \, \text{A}$. Известно, что коэффициент теплоотдачи с поверхности проводника $k_T = 10 \, \text{Bm}/\text{M}^2 \cdot \text{K}$, температура окружающей среды, которой является спокойный воздух, $9_0 = 35 \, {}^0C$, а значение удельного сопротивления меди за время нарастания температуры $\rho = 1,75 \cdot 10^{-8} \, O_M \cdot \text{M}$.

Решение. Уравнение кривой нагрева в простейшем случае при $\mathscr{G}_{n} = \mathscr{G}_{0}$ получается из формулы $\mathscr{G} = \mathscr{G}_{ycm} (1 - e^{-t/T}) + \mathscr{G}_{n} e^{-t/T}$, т.е. $\mathscr{G} = \mathscr{G}_{ycm} (1 - e^{-t/T})$, где $\mathscr{G}_{ycm} = P/k_T F$ – установившееся превышение температуры; *P* – мощность источников теплоты при 0 °*C*, *Bm*; *F* – охлаждающая поверхность, M^2 ; *T* – постоянная времени нагрева, *c*; α – температурный коэффициент сопротивления, *1/K*; *c* – теплоемкость электрического аппарата или его части, *Дж/K*.

Расчет $\mathcal{G}_{y_{cm}}$ и *T* произведем на единице длины проводника $l = 1 \ M$ по формуле

$$T = c / (k_T F - P_0 a).$$

В случае, когда $k_T F >> P_0 a$,

$$T = c / k_T F;$$

$$\vartheta_{ycm} = P / k_T F + \vartheta_0.$$

Таким образом

$$\mathcal{9}_{ycm} = \frac{I^2 \rho l}{k_T F} = \frac{400^2 \cdot 1.75 \cdot 10^{-8} \cdot 1}{10 \cdot 3.14 \cdot 10^2 \cdot 10^{-6} \cdot 3.14 \cdot 10 \cdot 10^{-3}} = 114 \ ^0C.$$

Постоянная времени нагрева:

$$T = \frac{cm}{k_T F} = \frac{0.39 \cdot 10^3 \cdot 8700 \cdot 3.14 \cdot 10^2 \cdot 10^{-8}}{10 \cdot 3.14 \cdot 10 \cdot 10^{-3} \cdot 4} = 850 c,$$

где с – удельная теплоемкость меди;

 $\gamma V = m$ – масса стержня длиной в 1 *м*;

 γ – плотность меди;

V – объем проводника.

И тогда уравнение кривой нагрева $\vartheta = 114(1 - e^{-1/850}).$

Omeem: $\vartheta = 114(1 - e^{-1/850}).$

9. Определить допустимое число включений в 1 *ч* катушки постоянного тока в повторно-кратковременном режиме нагрева, если время рабочего периода катушки $t_p = 150 \ c$ и по ней протекает ток $I_{n\kappa} = 12 \ A$. Катушка цилиндрическая, намотана круглым медным проводом диаметром $d = 2 \ MM$, имеет 500 витков, ее внутренний диаметр $D_{en} = 70 \ MM$, наружный $D_{nap} = 140 \ MM$, высота катушки $h = 70 \ MM$. Катушка находится в спокойном воздухе, температура которого $\mathcal{9}_0 = 35^{\ 0}C$. С наружных поверхностей катушки коэффициент теплоотдачи $k_T = 20 \ Bm/m^2 \cdot K$. Изоляция провода хлопчатобумажная без пропитки.

Решение. Длительно допустимая величина тока определится из равенства

$$I_{\partial a}^2 \rho_0 (1 + a \, \vartheta_{\partial on}) w \, \pi D_{cp} \, 4 \, / \, \pi d^2 = k_T (\vartheta_{\partial on} - \vartheta_0) F.$$

Для хлопчатобумажной изоляции $\mathcal{G}_{\partial on} = 90 \ ^{0}C$. Подставляя числовые значения и произведя вычисления, получим $I_{\partial n} = 12 \ A$. Тогда коэффициенты перегрузки по току $k_{I} = I_{n\kappa} / I_{\partial n} = 12 / 8 = 1,5$ и мощности $k_{p} = k_{I}^{2} = 2,25$.

Постоянную времени нагрева катушки определим, исходя из предположения, что способностью воспринимать теплоту обладают только ее токопроводящие элементы:

$$T = c \gamma \pi d^2 w \pi D_{cp} / k_T F 4,$$

где *с*, *γ* – соответственно удельная теплоемкость и плотность меди.

После вычисления получим T = 1400 c.

Тогда из равенства для коэффициента перегрузки по мощности при повторно-кратковременном процессе нагрева:

$$k_p = P_{n\kappa} / P_{\partial n} = \left(\frac{1 - e^{\frac{-t_p + t_n}{T}}}{1 - e^{\frac{-t_p}{T}}}\right),$$

где $P_{n\kappa}$ и $P_{\partial n}$ – соответственно мощности источников теплоты при повторно-кратковременном и длительном процессах нагрева, Вт;

 t_p и t_n – соответственно время рабочего периода и пауз,

получим

$$k_p = 2,25 = \left(\frac{1 - e^{\frac{-t_p + t_n}{1400}}}{1 - e^{\frac{-150}{1400}}}\right)$$

и найдем время одного цикла $t_u = t_p + t_n = 372 c$.

Допустимое число включений катушки в час $n = 3600 / t_u = 3600 / 372 = 9,7.$

Ответ: *n* = 9.

10. Найти конечную температуру медного круглого проводника диаметром d = 20 *мм*, который в течение 1,5 *с* нагружается током I = 32000 *А*, если в начальный момент времени проводник находился в спокойном воздухе при температуре $\mathcal{P}_{H} = 0$ ⁰*C*, а коэффициент теплоотдачи с его поверхности $k_T = 17$ *Bm*/ $m^2 \cdot K$.

Решение. Постоянная времени нагрева проводника длиной 1 *м* из формулы $T = c / k_T F = c \gamma \pi d^2 / k_T F 4 = 1000 c.$

Поскольку $t/T = 1/5 \cdot 10^{-3} < 0,1$, процесс нагрева можно считать адиабатическим и температуру проводника определить по кривой адиабатического нагрева для меди (рис. 2.20).

Для данного случая

$$j^{2}t = \left[3200 / (3,14 \cdot 100 \cdot 10^{-6})^{2} \right] \cdot 1,5 = 1,56 \cdot 10^{16} A^{2} \cdot c / M^{4}$$

и, следовательно, $\mathcal{G}_{_{KOH}} = 80^{-0}C$.



Рис. 2.20. Кривые адиабатического нагрева проводниковых материалов: 1 – железо; 2 – сталь; 3 – латунь; 4 – алюминий; 5 – серебро; 6 – медь

Ответ: $\vartheta_{KOH} = 80 \ ^{0}C.$

11. Определить нагрузочную способность и соответствующие ей параметры вводных шин аппарата для проверки возможности работы аппарата в кратковременном пусковом режиме. Шина выполнена из твердой полуотожженной меди *M1* с размерами сечения $3 \times 20 \text{ мм}$. Расчетный рабочий период $t_{cp} = 30 \text{ c}$. Температура окружающей среды $40 \, {}^{0}C$.

Решение. Из таблицы 2.10 шина из меди MI при продолжительном режиме может быть нагружена током $I_{np} = 275 A$.

Электрическое сопротивление 1 *см* шины при температуре $\mathcal{G} = 40 + 50 = 90$ ⁰*C* равно

$$R_{90} = R_{20} [1 + a(9 - 20)] = \rho_{20} \frac{l}{S} [1 + a(9 - 20)] =$$

= 0,01754 \cdot 10^{-4} \frac{1}{0,3 \cdot 2} (1 + 0,0043 \cdot 70) = 0,0293 \cdot 10^{-4} \cdot 0m.

Таблица 2.10

Размер	Масса 1 м	Размер Масса 1 м Токовая нагрузка при числе полос на фа							
шины, мм	полосы, кг	1	2	3	4				
1	2	3	4	5	6				
			Медные						
15×3	0,399	210	-	-	_				
20×3	0,529	275	_	_	_				
25×3	0,662	340	_	_	_				
30×4	1,185	475	-	-	_				
40×4	1,42	625	-/1090	I	-				
40×5	1,77	700/705	-/1250	I	_				
50×5	2,24	800/870	-/1525	-/1805	-				
50×6	2,67	955/960	-/1700	-/2145	_				
60×6	3,20	1125/1145	1740/1990	2240/2495	-				
80×6	4,26	1480/1510	2110/2630	2730/3220	_				
100×6	5,34	1810/1875	2470/3245	3170/3940	_				
60×8	4,26	1320/1345	2160/2485	2760/3020	_				
80×8	5,69	1690/1755	2620/3095	3370/3850	_				
100×8	7,11	2080/2180	3060/3810	3930/4690	-				
120×8	8,51	2400/2600	3400/4400	4340/5600	-				
60×10	5,34	1475/1525	2560/2725	3390/3530	-				
80×10	7,11	1900/1990	3100/3510	3900/4450	_				
100×10	8,80	2310/2470	3610/4325	4650/5385	5300/6060				
120×10	10,67	2650/2950	4100/5000	5200/6250	5900/6800				
		1	4люминиевые						
	0,122	165	_	_	_				
	0,162	215	-	-	-				
	0,203	265	_	_	_				
	0,324	365/370	_	_	_				
	0,432	480	-/855	_	_				
	0,540	540/545	-/965	-	-				

Значения токовой нагрузки

Окончание табл. 2.10

1	2	3	4	5	6
	0,675	665/670	-/1180	-1470	-
	0,810	740/745	-/1315	-/1470	-
	0,972	870/880	1350/1585	1720/1940	-
	1,296	1150/1170	1630/2055	2100/2460	-
	1,620	1425/1455	1935/2515	2500/3040	-
	1,728	1320/1355	2040/2400	2620/2975	-
	2,160	1625/1690	2390/2945	3050/3620	-
	2,592	1900/2040	2650/3350	3380/4250	-
	2,700	1820/1910	2800/3350	3650/4100	4150/4400
	3,240	2070/2300	3200/3900	4100/4800	4650/5200

Примечание. В числителе приведена токовая нагрузка при переменном, в знаменателе – при постоянном токе.

Допустимые потери мощности в продолжительном режиме:

$$P_{np} = I_{np}^2 R_g = 275^2 \cdot 0,0293 \cdot 10^{-4} = 0,222 \ Bm/cm.$$

Постоянная времени нагрева

$$T = \frac{cM}{k_{m,o}S} = \frac{0.385 \cdot 5.34}{9.6 \cdot 10^{-4} \cdot 4.6} = 466 \ c,$$

где $c = 0,385 \ \partial \mathcal{H} / c \cdot {}^{0}C$ – удельная теплоемкость меди; $S = 2(0,3+2) = 4,6 \ cm^{2}$ – площадь поверхности охлаждения шины длиной $l = 1 \ cm$;

 $M = \gamma Sl = 8,9 \cdot 0,3 \cdot 2 \cdot 1 = 5,34$ г – масса шины.

$$k_{m.o} = \frac{P_{np}}{\tau_v S} = \frac{0.222}{50 \cdot 4.6} = 9.6 \cdot 10^{-4} \ Bm / cm^2 \cdot {}^{0}C.$$

Превышение температуры

$$\tau_{\kappa p} = \tau_{y} = \tau_{y}^{'} \left[1 - exp\left(-\frac{\tau_{\kappa p}}{T} \right) \right] = \tau_{y}^{'} \left[1 - exp\left(-\frac{30}{466} \right) \right] = \tau_{y}^{'} \cdot 0,065.$$

Отсюда τ'_{y} – установившееся превышение температуры при мощности кратковременного режима, которая может быть принята большей, чем мощность продолжительного режима:

$$\tau_{y}^{'} = \frac{\tau_{y}}{0.065} = \frac{50}{0.065} = 770^{-0}C.$$

Для весьма кратковременного режима

$$\tau'_{y} = \tau_{\kappa p} \frac{T}{t_{\kappa p}} = 5 \frac{466}{30} = 776 \ ^{0}C.$$

Мощность допустимая

$$P_{\kappa p} = \frac{P_{np}}{1 - exp\left(-\frac{t_{\kappa p}}{T}\right)} = \frac{0,222}{0,065} = 3,42 \ Bm/cm.$$

Мощность для весьма кратковременного режима

$$P_{\kappa p} = \frac{cM\tau_{\kappa p}}{t_{\kappa p}} = \frac{0.385 \cdot 5.34 \cdot 50}{30} = 3.44 \ Bm/cm.$$

Ток допустимый

$$I_{\kappa p} = \frac{I_{np}}{\sqrt{1 - exp\left(-\frac{t_{\kappa p}}{T}\right)}} = \frac{275}{\sqrt{0,065}} = 1080 \ A.$$

Ток для весьма кратковременного режима

$$I_{\kappa p} = I_{np} \sqrt{\frac{T}{t_{\kappa p}}} = 275 \sqrt{\frac{466}{30}} = 1085 \ A.$$

Коэффициенты перегрузки по мощности при кратковременном и весьма кратковременном режиме

$$k_{n.M} = \frac{P_{\kappa p}}{P_{np}} = \frac{\tau_y}{\tau_y} = \frac{3.42}{0.222} = \frac{770}{50} = 15.4;$$

$$k_{n.M\tau} = \frac{P_{\kappa p}}{P_{np}} = \frac{T}{t_{\kappa p}} = \frac{3.44}{0.222} = \frac{466}{30} = 15.6.$$

Коэффициенты перегрузки по току при вышеуказанных режимах

$$k_{n.m} = \frac{I_{\kappa p}}{I_{np}} = \sqrt{k_{n.M}} = \sqrt{15,4} = 3,92;$$

$$k_{n.\tau} = \frac{I_{\kappa p}}{I_{np}} = \sqrt{\frac{T}{T_{\kappa p}}} = \sqrt{k_{n.M\tau}} = \frac{1085}{275} = \sqrt{15,6} = 3,95.$$

Из рисунка 2.21 для ПВ = 0 при $t_{\kappa p}/T = 30/466 = 0,064I_{np}/I_{\kappa p} =$ = 0,255, следовательно $k_{n.m} = \frac{1}{0.255} = 3,92.$



Рис. 2.21. Зависимость нагрузочной способности токоведущих частей от временного параметра при повторно-кратковременном режиме работы

Допустимая длительность при кратковременном и весьма кратковременном режимах

$$t_{\kappa p} = T \ln \frac{\tau_y}{\tau_y' - \tau_y} = 466 \ln \frac{770}{770 - 50} = 31,5 \ c;$$

$$t_{\kappa p} = T \frac{\tau_y}{\tau_y'} = 466 \frac{50}{776} = 30 \ c.$$

Расчет времени является контрольным. Полученные его значения подтверждают правильность расчетов; в задании $t_{xp} = 30 c$.

При продолжительном режиме плотность тока

$$j_{np} = \frac{I_{np}}{S} = \frac{275}{0.3 \cdot 2} = 4,58 \ A / MM^2;$$

при кратковременном режиме $(t_{\kappa p} = 30 c)$:

$$j_{\kappa p} = \frac{I_{\kappa p}}{S} = \frac{1080}{0.3 \cdot 2} = 180 \ A / MM^2.$$

При односекундной работе плотность тока согласно выражению $I_1^2 t_1 = I_2^2 t_2$

$$j_{1\kappa p} = j_{\kappa p 30} \sqrt{t_{\kappa p}} = 1800 \sqrt{30} = 97 \ A / MM^2.$$

По таблице 2.11 для медных шин допустимой величиной плотности тока является $94\sqrt{3} = 162 \ A/\ Mm^2$, следовательно, плотность тока 97 $A/\ Mm^2$ допустима.

Таблица 2.11

Значения плотности тока термической устойчивости для проводников из различных металлов (для шин, стержней и др.)

Материал	Плотность тока, <i>А/мм²</i> , при продолжительности его действия			
	3 c	4 c	10 c	
Медь	94	82	51	
Латунь	44	38	24	
Алюминий	48	42	27	

12. Определить нагрузочную способность и соответствующие ей параметры вводных шин аппарата при повторно-кратковременном установившемся режиме ПВ = 40 % в условиях примера 11.

Решение. Все значения величин, определенные в решении примера 11, остаются те же.

Необходимо определить следующие дополнительные параметры:

$$t'_{u} = \frac{t_{p}}{\Pi B} = \frac{30}{0.4} = 75 \ c$$

Число включений в час

$$\frac{3600}{75} = 48; \quad \frac{t_u}{T} = \frac{75}{466} = 0.16; \quad \frac{t_u}{T} = \frac{30}{466} = 0.064.$$

Последние два параметра малы, т.е. $t_{\mu} << T$.

Превышение температуры

$$\tau_{y}^{"} = \frac{\tau_{n,kp}}{\Pi B} = \frac{\tau_{y}}{\Pi B} = \frac{50}{0.4} = 125 \ ^{0}C.$$

Мощность

$$P_{n.\kappa p} = \frac{P_{\kappa p}}{\Pi B} = \frac{0.222}{0.4} = 0.555 \ Bm/cm.$$

Ток

$$I_{n.\kappa p} = \frac{I_{np}}{\sqrt{\Pi B}} = \frac{275}{\sqrt{0.4}} = 430 \ A.$$

То же значение тока можно найти по кривым рисунка 2.21.

По
$$\frac{I_{np}}{I_{n.\kappa p}} = \frac{275}{430} = 0,64$$
 и $\Pi B = 40\%$ находится $\frac{t_p}{T} = 0,065$, отку-

да $t_p = 466 \cdot 0,065 = 30 \ c$. Это время соответствует заданному.

Коэффициенты перегрузки:

- по мощности

$$k_{n.M} = \frac{1}{\Pi B} = \frac{1}{0.4} = 2.5;$$

- то току

$$k_{n.m} = \sqrt{k_{n.m}} = \sqrt{2.5} = 1.58.$$
13. Определить предельно допустимый четырехсекундный ток термической устойчивости и плотность тока вводных шин аппарата, рассмотренных в примере 11.

Решение. По условию $\mathcal{G} = 40 + 50 = 90$ ⁰*C*, а допустимая для меди $\mathcal{G}_{m,v} = 300$ ⁰*C*.

По рисунку 2.22 для меди $A_{\mu} = 1,4 \cdot 10^4 A^2 c / M M^4$ и $A_{m,y} = 3,75 \cdot 10^4 A^2 c / M M^4$.



Рис. 2.22. Кривые нагрева проводников при кратковременном протекании тока: 1 – латунь; 2 – алюминий; 3 – серебро; 4 – медь

Эта плотность тока допустима (табл. 2.11).

ЛИТЕРАТУРА

1. *Неклепаев Б.Н.* Электрическая часть электростанций и подстанций: справочные материалы для курсового и дипломного проектирования / Б.Н. Неклепаев, И.П. Крючков. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 608 с.

2. Задачник по электрическим аппаратам: учеб. пособие для вузов по спец. «Электрические аппараты» / Г.Б. Буткевич, В.Г. Дегтярь, А.Г. Славинская. – М.: Высш. шк., 1987. – 232 с.

3. Основы теории электрических аппаратов / Б.К. Буль, Г.В. Буткевич и др.; под ред. Г.В. Буткевича. – М., 1970.

 Залесский А.М. Тепловые расчеты электрических аппаратов / А.М. Залесский, Г.А. Кукеков. – Л., 1967.

5. Холявский Г.Б. Расчет электродинамических усилий в электрических аппаратах / Г.Б. Холявский. – Л., 1972.

6. *Сахаров П.В.* Проектирование электрических аппаратов (Общие вопросы проектирования) / П.В. Сахаров. – М.: Энергия, 1971.

ВВЕДЕНИЕ	3
1. ОСНОВЫ РАСЧЕТА ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ СИЛ	4
1.1. Электродинамические усилия в электрических аппаратах	4
1.2. Методы расчета электродинамических усилий	4
1.3. Усилия между параллельными проводниками	6
 Электродинамические силы между взаимно перпендикулярными проводниками 	9
1.5. Электродинамические силы в кольцевом витке и между кольцевыми витками	. 10
1.6. Электродинамические силы при переменном токе	12
 1.7. Проверка шинных конструкций на электродинамическую стойкость 	. 16
1.8. Механический резонанс	. 19
1.9. Задачи	. 23
2. ПРОВЕРКА ПРОВОДНИКОВ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АППАРАТОВ НА ТЕРМИЧЕСКУЮ СТОЙКОСТЬ	. 53
2.1. Общие сведения	53
2.2. Активные потери энергии в аппаратах	53
2.2.1. Потери в токоведущих частях	53
2.2.2. Потери в нетоковедущих ферромагнитных деталях аппаратов	. 56
2.3. Установившийся режим нагрева	. 57
2.3.1. Расчет сечения неизолированного проводника	57
2.3.2. Нагрев изолированных токоведущих частей	58
2.3.3. Нагрев катушек	60
2.4. Проверка проводников и электрических аппаратов на термическую стойкость при коротких замыканиях	61
Задачи	70
2.5. Тепловой расчет электрических аппаратов и их частей с учетом совместного действия теплопроводности, конвекции и излучения	. 82
2.6. Неустановившиеся и квазистационарные процессы нагрева и охлаждения частей электрических аппаратов	. 97
Литература	109

СОДЕРЖАНИЕ

ГРАЧЕВ Александр Сергеевич

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ

РУКОВОДСТВО ПО РЕШЕНИЮ ЗАДАЧ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Литературный редактор О.А. Егошина

Компьютерная верстка Ю.А. Солуданов

> Дизайн обложки В.В. Смирнова

Тем. план 2009 г. № 64. Подписано в печать 22.05.2009 г. Формат 60×84/16. Усл. печ. л. 5,87. Уч.-изд. л. 3,92. Тираж 100. Заказ № 3484

Оригинал-макет подготовлен к печати в РИЦ и отпечатан ООП ГОУВПО «Марийский государственный университет». 424001, г. Йошкар-Ола, пл. Ленина, 1