

# **1 Лабораторная работа №4. Термическое и электродинамическое действие токов на проводники**

## **1.1 Цель работы**

- Исследовать процесс нагрева и охлаждения однородного проводника прямоугольного сечения: при длительном протекании по нему рабочего тока; при кратковременном протекании тока короткого замыкания (КЗ).
- Исследовать зависимость электродинамических сил взаимодействия двух параллельных проводников прямоугольного сечения от их геометрических размеров и параметров цепи.
- Ознакомиться с методом замера электродинамической силы.

## **1.2 Основные понятия и определения, методы расчета**

### **1.2.1 Общие сведения**

Электрические аппараты и элементы распределительных устройств (РУ) обтекаются токами, близкими по величине к нормальным, и токами КЗ, во много раз превышающими нормальные. Токоведущие части электрического оборудования и РУ при протекании по ним тока подвергаются механическим (электродинамическим) и тепловым (термическим) воздействиям. Способность аппаратов, проводников и изоляторов противостоять электродинамическим и термическим воздействиям, возникающим при прохождении через них наибольших токов КЗ, называют соответственно электродинамической и термической стойкостью.

### **1.2.2 Нагрев токоведущих частей при длительном протекании тока**

Если через проводник, имеющий температуру окружающей среды  $\theta_0$ , проходит ток, то температура проводника постепенно повышается, так как энергия потерь при протекании тока переходит в тепло. Скорость нарастания температуры зависит от соотношения между количеством выделяющегося тепла и интенсивностью его отвода, а также от теплоемкости проводника. Неустановившийся тепловой процесс описывается следующим уравнением теплового баланса [1, с. 95]

$$dQ = dQ_1 + dQ_2, \quad (1.1)$$

где  $dQ$  – энергия, выделяемая током в проводнике в течение времени  $dt$ ;  $dQ_1$  – энергия, идущая на нагрев проводника;  $dQ_2$  – энергия, отводимая с поверхности проводника за счет теплоотдачи в течение времени  $dt$ .

Выражению (1.1) соответствует уравнение

$$I^2 R dt = C d\theta + k S_{\pi} (\theta - \theta_0) dt, \quad (1.2)$$

где  $I$  – действующее значение тока, проходящего по проводнику, А;  $R$  – активное сопротивление проводника при переменном токе, Ом;  $C$  – теплоемкость проводника, Дж/°С;  $(\theta - \theta_0)$  – превышение температуры проводника  $\theta$  над температурой окружающей среды  $\theta_0$ , °С;  $k$  – коэффициент теплоотдачи, учитывающий все виды теплообмена, Вт/(м²·°С);  $S_{\pi}$  – площадь поверхности охлаждения проводника, м².

Для условий нормального режима температура проводника изменяется в небольших пределах, поэтому можно принять, что  $R$ ,  $C$ ,  $k$  не зависят от температуры. Тогда решением дифференциального уравнения нагрева проводника (1.2) будет

$$\theta = \theta_0 + \frac{I^2 R}{k S_{\pi}} \left( 1 - e^{-\frac{t}{T}} \right), \quad (1.3)$$

где  $T = \frac{C}{k S_{\pi}}$  – постоянная времени нагрева проводника, с.

Из уравнения (1.3) следует, что нагрев проводника происходит по экспоненциальной кривой (Рис. 1.1).

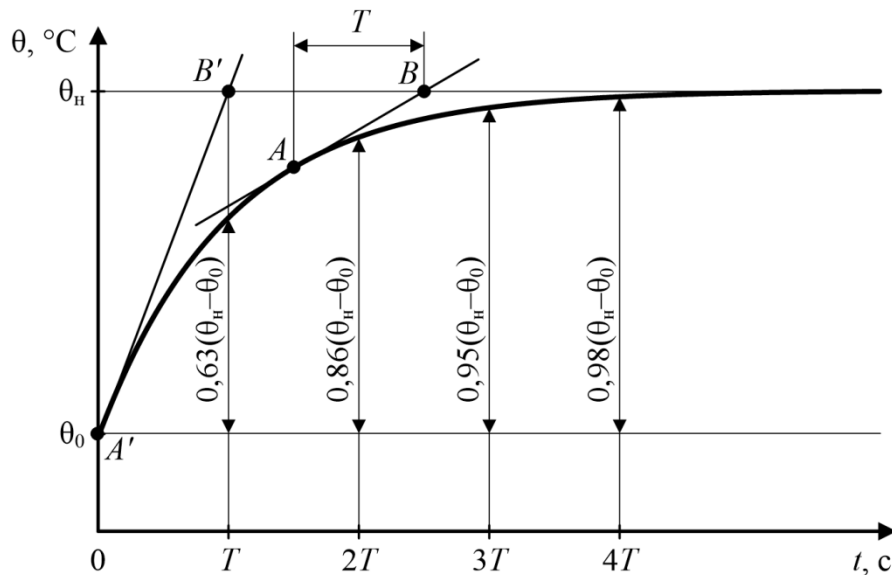


Рис. 1.1. Кривая нагрева проводника

Если в уравнение нагрева (1.3) подставить значение  $t \rightarrow \infty$ , то получим установившуюся температуру подводника

$$\theta_n = \theta_0 + \frac{I^2 R}{k S_{\pi}}. \quad (1.4)$$

Постоянная времени нагрева  $T$  характеризует скорость изменения температуры шин и аппаратов при их нагреве. Из уравнения (1.3) следует, что  $T$  – это время, за которое отклонение температуры от установившегося значения  $(\theta_n - \theta)$  уменьшается в  $e$  раз. Несмотря на то, что установившийся режим наступает через неограниченно длительное время ( $t \rightarrow \infty$ ), на практике время достижения установившейся температуры принимают равным  $(3...4)T$ , так как к этому моменту отклонение температуры от установившейся  $(\theta_n - \theta)$  не превышает  $(2...5)\%$  начального отклонения  $(\theta_n - \theta_0)$ .

Постоянную времени нагрева для простых токоведущих частей можно вычислить, а для машин и аппаратов она определяется путем тепловых испытаний и последующих графических построений (Рис. 1.1). Постоянная времени определяется как подкасательная  $AB$ , построенная по кривой нагрева. Касательная  $A'B'$  к точке  $(0; \theta_0)$  характеризует подъем температуры проводника при отсутствии теплоотдачи с его поверхности.

Величина постоянной времени нагрева для электрического оборудования колеблется от нескольких минут (у шин) до нескольких часов (у мощных трансформаторов и генераторов). Установившуюся температуру нагрева проводника  $\theta_n$  в условиях длительного режима можно найти следующей формуле, полученной из выражения (1.4):

$$\theta_n = \theta_0 + (\theta_{н.доп} - \theta_{0.т}) \frac{I_{нагр}^2}{I_{доп}^2}, \quad (1.5)$$

где  $I_{нагр}$  – ток нагрузки, А;  $I_{доп}$  – длительно допустимый ток через проводник (табличное значение), А [2, табл. 7.3-7.6, табл. 7.10-7.16];  $\theta_{0.т}$  – расчетная (табличная) температура окружающей среды, °С;  $\theta_{н.доп}$  – допустимая температура нагрева проводников в длительном режиме, °С [2, табл. 1.12].

Для неизолированных проводников в справочных данных [2] приводятся длительно допустимые токи, соответствующие температуре окружающей среды  $\theta_{0.т} = 25^\circ\text{С}$ .

Допустимая температура нагрева неизолированных проводников в нормальном режиме  $\theta_{н.доп}$  определяется нагревом контактных соединений. Обычно контактные соединения не позволяют повысить температуру нагрева проводников выше  $70^\circ$ , так как при более высокой температуре повышается интенсивность окисления их поверхностей, в результате чего значительно возрастает электрическое сопротивление в месте соединения проводников.

Увеличение электрического сопротивления контактных соединений ведет к дальнейшему росту их температуры, и может наступить лавинообразный процесс нарастания температуры, который приведет к повреждению контактов.

### 1.2.3 Охлаждение проводников

При отключении тока прекращается подвод энергии к проводнику, и, начиная с момента отключения, проводник охлаждается. Уравнение теплового баланса (1.2) для этого случая имеет вид

$$CdQ + kS_{\pi}(\theta - \theta_0)dt = 0. \quad (1.6)$$

Решением уравнения (1.6) является

$$\theta = \theta_0 + (\theta_n - \theta_0)e^{-\frac{t}{T}}. \quad (1.7)$$

Как видно из Рис. 1.2, кривая охлаждения есть та же кривая нагрева, но обращенная выпуклостью к оси абсцисс. Постоянная времени нагрева  $T$  также может быть получена из кривой охлаждения.

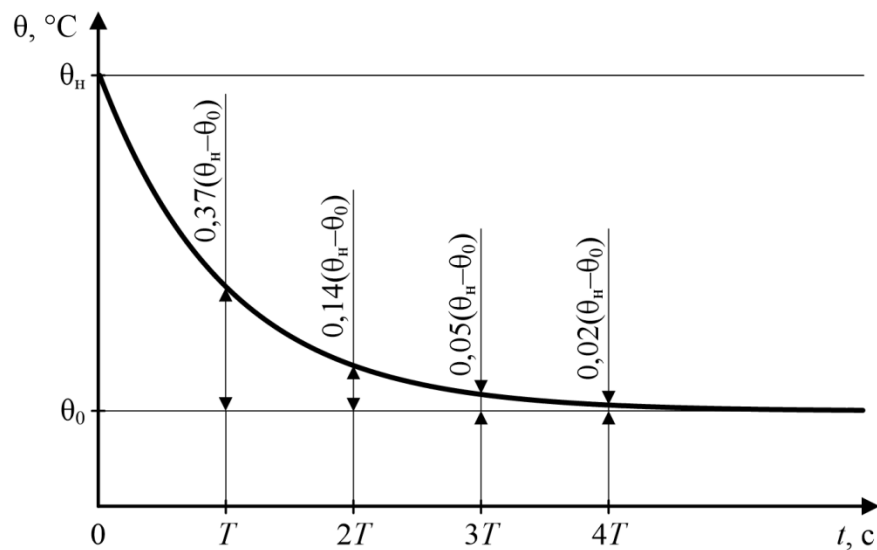


Рис. 1.2. Кривая охлаждения проводника

### 1.2.4 Нагрев проводников при коротких замыканиях

При возникновении короткого замыкания через токоведущие части начинают протекать токи КЗ, во много раз превышающие рабочие токи. Они вызывают дополнительный нагрев проводников сверх температур, достигнутых к моменту наступления КЗ. Длительность существования КЗ ограничена действием релейной защиты и составляет от долей секунды до нескольких секунд. Повышение температуры при этом является кратковременным (пиковым), после чего температура падает в связи с отключением цепи. Несмотря на кратковременность КЗ, температура

проводников за время его существования может достигать больших и опасных значений.

Исследования работы неизолированных проводников и шин [1] показали, что их нагрев при КЗ ограничивается в большинстве случаев снижением их механической прочности. Однако при кратковременном нагреве снижение механической прочности начинается при большей температуре, чем при длительном. Поэтому в режиме КЗ допускаются значительно более высокие температуры, чем при длительном нагреве в условиях нормального режима. Нормируемые допустимые температуры нагрева проводников при КЗ ( $\theta_{\text{к.доп}}$ ) приведены в [2, табл. 1.14] (Таблица 1.1).

Таблица 1.1

Нормируемые допустимые температуры нагрева проводников при КЗ, °С

|                                                                                 |     |
|---------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Шины медные                                                                     | 300 |
| Шины алюминиевые                                                                | 200 |
| Шины стальные, не имеющие непосредственного соединения с аппаратом              | 400 |
| Шины стальные с непосредственным присоединением к аппаратам                     | 300 |
| Кабели с бумажно-пропитанной изоляцией до 10 кВ с медными и алюминиевыми жилами | 200 |

Ввиду кратковременности процесса нагрева при КЗ теплоотдачей в окружающую среду можно пренебречь и считать, что все выделяющееся тепло в проводнике идет только на нагрев самого проводника. Тогда уравнение нагрева будет следующим [3]:

$$i_k^2 R(\theta) dt = C(\theta) d\theta, \quad (1.8)$$

где  $i_k$  – мгновенное значение тока КЗ, А.

Так как при КЗ проводник нагревается до значительных температур, необходимо учитывать изменение его активного сопротивления и теплоемкости в процессе нагрева. При этом активное сопротивление и теплоемкость можно определить по формулам:

$$R(\theta) \approx \frac{\rho_0(1 + \alpha\theta)l}{S}, \quad C(\theta) \approx \gamma S l C_0(1 + \beta\theta), \quad (1.9)$$

где  $\rho_0$  – удельное сопротивление проводника при 0°С, Ом·м;  $C_0$  – удельная теплоемкость при 0°С, Дж / (кг·°С);  $\alpha, \beta$  – температурные коэффициенты, учитывающие изменение удельного сопротивления и удельной теплоемкости соответственно, 1/°С;  $S$  – площадь поперечного сечения проводника, м<sup>2</sup>;  $l$  – длина проводника, м;  $\gamma$  – плотность проводника, кг/м<sup>3</sup> (Таблица 1.2).

Таблица 1.2

Характеристики материалов, использующихся для изготовления  
токоведущих частей

|          | $\gamma$ , кг / м <sup>3</sup> | $\rho_0$ , Ом · мм <sup>2</sup> / м | $C_0$ , Дж / (кг · °С) |
|----------|--------------------------------|-------------------------------------|------------------------|
| Алюминий | 2700                           | 0,027                               | 920                    |
| АД31Т    | 2710                           | 0,027                               | 920                    |
| Медь     | 8900                           | 0,018                               | 400                    |
| Сталь    | 7800                           | 0,12                                | 500                    |

Подставим (1.9) в (1.8) и, разделив переменные (влево переносим переменные, зависящие от  $t$ , вправо – зависящие от  $\theta$ ), проинтегрируем левую часть в пределах от нуля (начало КЗ) до момента отключения  $t_{\text{отк}}$ , а правую – от начальной температуры  $\theta_{\text{н}}$  до конечной  $\theta_{\text{к}}$ :

$$\frac{1}{S^2} \int_0^{t_{\text{отк}}} i_{\text{к}}^2 dt = \gamma \int_{\theta_{\text{н}}}^{\theta_{\text{к}}} \frac{C_0(1 + \beta\theta)}{\rho_0(1 + \alpha\theta)} d\theta. \quad (1.10)$$

После интегрирования имеем:

$$\begin{aligned} \frac{B_{\text{к}}}{S^2} = \frac{\gamma C_0}{\rho_0} \left[ \frac{\alpha - \beta}{\alpha^2} \ln(1 + \alpha\theta_{\text{к}}) + \frac{\beta}{\alpha} \theta_{\text{к}} \right] - \\ - \frac{\gamma C_0}{\rho_0} \left[ \frac{\alpha - \beta}{\alpha^2} \ln(1 + \alpha\theta_{\text{н}}) + \frac{\beta}{\alpha} \theta_{\text{н}} \right] = A_{\text{к}} - A_{\text{н}}, \end{aligned} \quad (1.11)$$

где  $A_{\text{к}}$  – функция, зависящая от материала проводника, соответствующая конечной температуре нагрева,  $\text{А}^2 \cdot \text{с} / \text{м}^4$  (Рис. 1.3);  $A_{\text{н}}$  – такая же функция, соответствующая начальной температуре нагрева;  $B_{\text{к}} = \int_0^{t_{\text{отк}}} i_{\text{к}}^2 dt$  – интеграл Джоуля,  $\text{А}^2 \cdot \text{с}$ , численно равный количеству энергии, выделенной током в проводнике сопротивлением 1 Ом в течение времени  $t_{\text{отк}}$ .

Методы определения интеграла Джоуля  $B_{\text{к}}$  подробно изложены в [3, с.48-56]. Поскольку лабораторную установку можно рассматривать как электроустановку, питаемую от источника неограниченной мощности (мощность системы  $S_{\text{с}} = \infty$ ), то интеграл Джоуля допустимо определять по выражению

$$B_{\text{к}} = I_{\text{п0}}^2 (t_{\text{отк}} + T_{\text{а}}), \quad (1.12)$$

где  $I_{\text{п0}}$  – действующее значение периодической составляющей тока КЗ в начальный момент КЗ, А;  $T_{\text{а}}$  – постоянная времени затухания аperiodической составляющей тока КЗ, с.

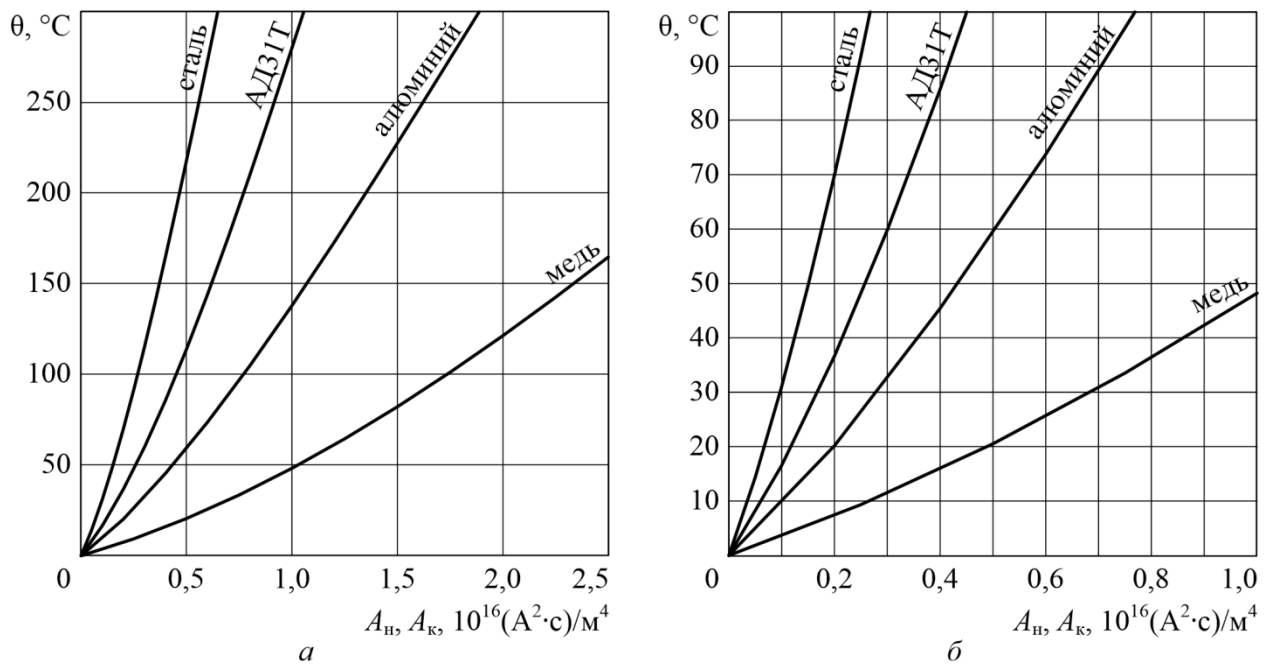


Рис. 1.3. Кривые для определения температуры нагрева при КЗ

В случаях, когда  $t_{\text{отк}} > 1\text{с}$ , доля энергии, выделенной апериодической составляющей тока КЗ в общем балансе невелика, и ею можно пренебречь, а интеграл Джоуля определять по упрощенному выражению

$$B_k \approx I_{\text{п0}}^2 t_{\text{отк}}.$$

Для определения конечной температуры нагрева проводника при КЗ  $\theta_k$  следует вычислять значение  $A_k$ :

$$A_k = A_n + \frac{B_k}{S^2}. \quad (1.13)$$

По найденному значению  $A_k$  с использованием кривой, соответствующей материалу проводника (Рис. 1.3), определяют значение  $\theta_k$ . Проводник термически стоек, если соблюдается условие  $\theta_k \leq \theta_{\text{к.доп}}$ .

### 1.2.5 Электродинамические усилия в токоведущих частях

Электродинамические усилия возникают в каждом проводнике с током, находящемся в магнитном поле. Величины этих усилий для прямолинейных элементов РУ могут быть определены на основании законов Био–Савара–Лапласа. Если два параллельных проводника обтекаются током, и проводник с током  $i_1$  находится в магнитном поле тока  $i_2$ , то величина усилия, действующего между ними, будет равна

$$F = 2i_1 i_2 \frac{l}{a} k_{\phi} 10^{-7}, \text{ Н}, \quad (1.14)$$

где  $i_1, i_2$  – токи проводников, А;  $a$  – расстояние между осями проводников, м;  $l$  – длина проводников, м;  $k_\phi$  – коэффициент формы, о.е.

Наибольшая величина электродинамических усилий определяется возможным максимальным током КЗ, т.е. ударным током  $i_y$ . Если токоведущие проводники принадлежат одной цепи, и  $i_1 = i_2 = i_y$ , то наибольшая сила взаимодействия будет равна

$$F = 2i_y^2 \frac{l}{a} k_\phi 10^{-7}, \text{ Н}, \quad (1.15)$$

Коэффициент формы  $k_\phi$  учитывает влияние поперечных размеров проводников на электродинамические усилия и зависит от формы сечения проводников и их взаимного расположения. Определение коэффициента формы производится графическим путем (Рис. 1.4). Если расстояние между проводниками в свету ( $a - b$ ) больше периметра сечения  $2(b + h)$ , то коэффициент формы принимается равным единице.

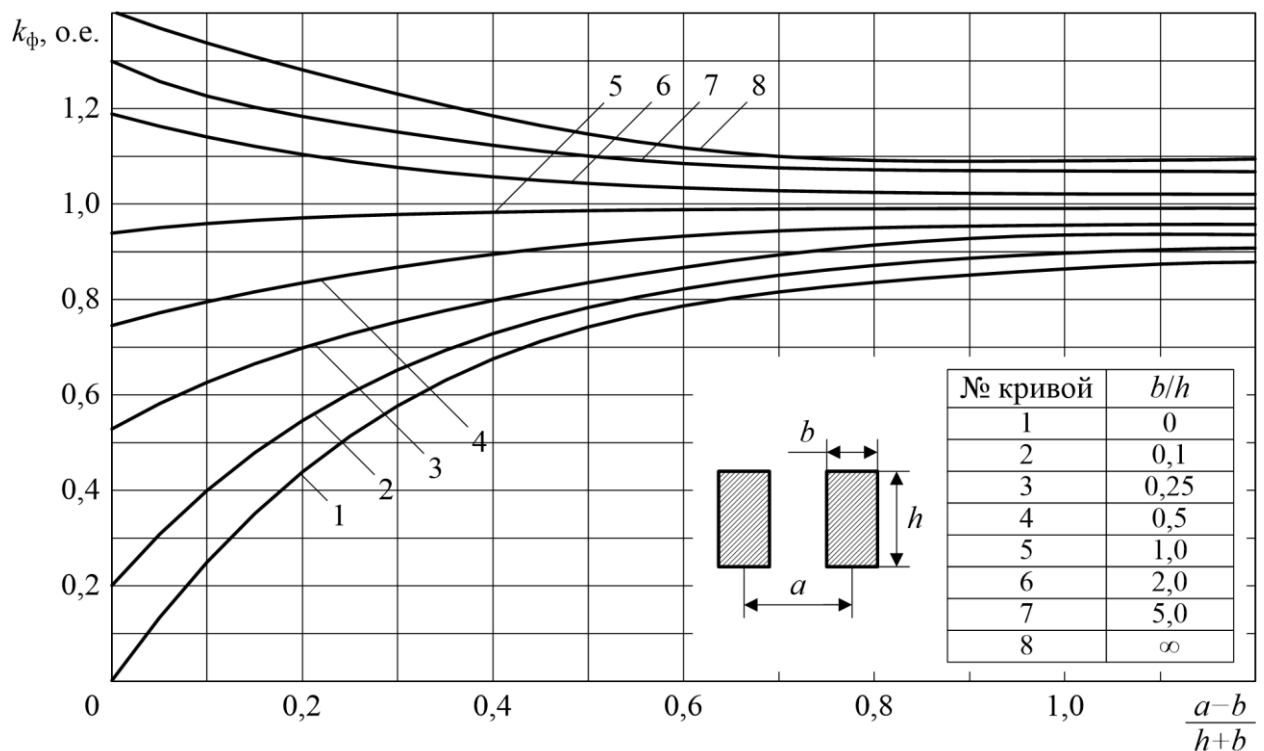


Рис. 1.4. Кривые для определения коэффициента формы шин прямоугольного сечения

Электродинамическая стойкость проводников характеризуется величиной механических напряжений, возникающих в материале проводника под действием электродинамических сил. Условие электродинамической стойкости

$$\sigma_{\text{расч}} \leq \sigma_{\text{доп}},$$

где  $\sigma_{\text{расч}}$  – расчетное механическое напряжение при изгибе;  $\sigma_{\text{доп}}$  – допустимое механическое напряжение.

В ПУЭ [4] указывается величина допустимых механических напряжений. Например, для алюминия марки А0 и А1  $\sigma_{\text{доп}} = 82,3$  МПа, для алюминиевого сплава АД31Т1  $\sigma_{\text{доп}} = 137,2$  МПа, для меди марки МГМ  $\sigma_{\text{доп}} = 175$  МПа.

Расчетное механическое напряжение  $\sigma_{\text{расч}}$  определяется по формуле

$$\sigma_{\text{расч}} = \frac{M}{W} \quad (1.16)$$

где  $M = Fl / 12$  – изгибающий момент, Н·м;  $W$  – момент сопротивления шины, м<sup>3</sup>.

Для шин прямоугольного сечения момент сопротивления определяется по формулам, приведенным на Рис. 1.5 [3, с. 65; 5, с. 223].

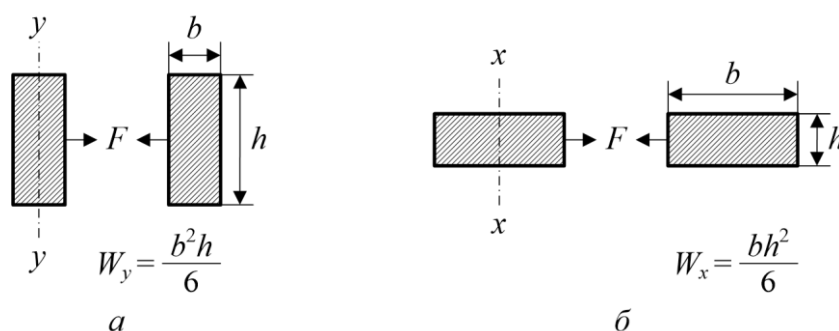


Рис. 1.5. Расчет момента сопротивления для шин прямоугольного сечения при различных вариантах их расположения (а – «на ребро», б – «плашмя»)

## 1.3 Описание стенда

### 1.3.1 Устройство стенда, режимы работы, основные операции

Внешний вид передней панели стенда показан на Рис. 1.6. Включение/отключение питания выполняется при помощи автоматического выключателя SF. Медные шины I и II служат для проведения опытов по замеру электродинамической силы, шина III из алюминиевого сплава АД31Т – для опытов по исследованию нагрева. С правой стороны стенда имеется съемная накладка Н, с помощью которой осуществляется подключение испытываемых шин I и II (положение 2) или III (положение 1) к нагрузочному трансформатору НТ.

Переменное напряжение  $U$ , подаваемое на нагрузочный трансформатор, можно менять с помощью регулируемого автотрансформатора АТ (регулировочная рукоятка АТ находится под столешницей стенда) в пределах

0...220 В, что соответствует изменению тока, протекающего по испытываемым шинам, в пределах 0...1000 А. Для измерения напряжения на выводах АТ установлены два вольтметра: V1 – с пределом измерения 0...30 В и V2 – с пределом измерения 0...250 В.

Подключение АТ к НТ производится при помощи контактора КМ. При этом возможны два режима работы.

- Нормальный режим с длительным действием тока на шины. На панели стенда светится зеленая лампа «НОРМ.»; включение контактора КМ производится нажатием на кнопку «ПУСК», отключение – нажатием на кнопку «СТОП».
- Режим короткого замыкания с кратковременным действием тока на шины. На панели стенда светится красная лампа «КЗ»; включение контактора КМ производится нажатием на кнопку «ПУСК», отключение – автоматически под действием релейной защиты. Время срабатывания релейной защиты составляет  $t_{pz} = 3.2$  с, полное время отключения контактора –  $t_{по} = 0.2$  с.

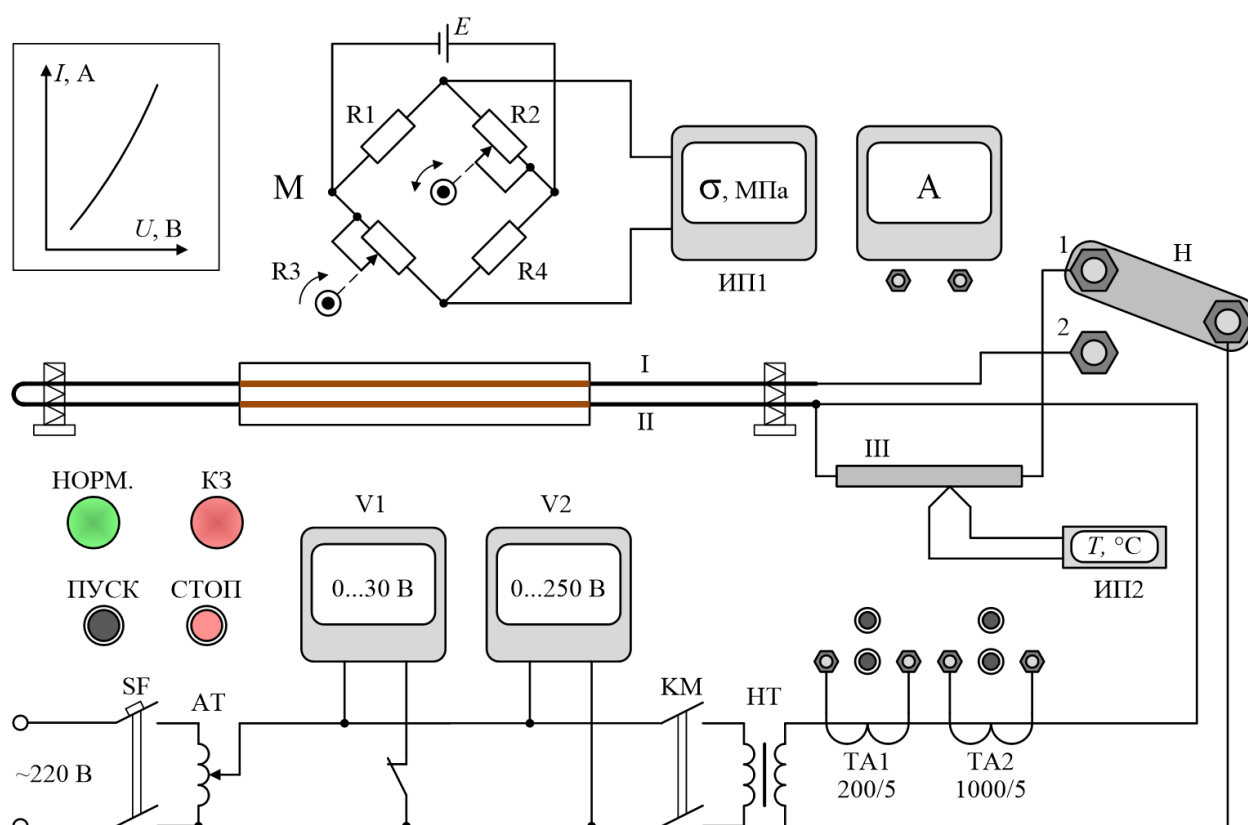


Рис. 1.6. Внешний вид передней панели стенда

Переключение между режимами работы стенда происходит автоматически при изменении напряжения на выводах АТ: нормальный

режим включается при  $U \leq 30$  В, режим КЗ – при  $U > 30$  В. Вольтметр V1 в режиме КЗ автоматически отключается.

Для получения заданного тока в шине необходимо с помощью АТ поднять напряжение, контролируемое вольтметрами V1 и V2, до величины, определяемой по графику зависимости  $I(U)$  на передней панели стенда, и нажать кнопку «ПУСК».

Величина тока, протекающего по испытываемым шинам, может контролироваться амперметром А, который подключается к одному из трансформаторов тока, ТА1 или ТА2, специальными проводниками (Рис. 1.7). Проводники соединены с пластиной 1, подключаемой к выводам вторичной обмотки одного из трансформаторов тока; выводы второго (неиспользуемого) трансформатора тока должны быть замкнуты между собой при помощи накладки 2. ТА1 имеет коэффициент трансформации  $k_{ТА1} = 200/5$  и предназначен для замера тока в нормальном режиме, ТА2 с  $k_{ТА2} = 1000/5$  – для измерения в режиме КЗ. Стенд имеет защиту от неправильного подключения трансформаторов тока, которая контролирует положение кнопок у выводов вторичных обмоток ТА1 и ТА2. При неправильной установке пластины 1 и/или накладки 2 блокируется включение контактора КМ.

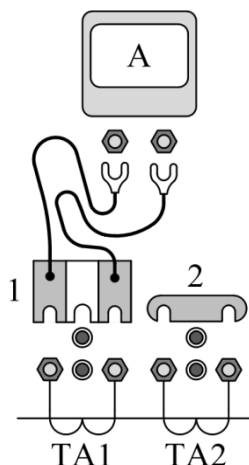


Рис. 1.7. Подключение амперметра к трансформаторам тока

### 1.3.2 Измерение температуры нагрева шины

Для измерения температуры алюминиевой шины III в нее вмонтирован спай термопары, выход которой соединен с измерительным прибором ИП2 (Рис. 1.6). На дисплее ИП2 высвечивается значение температуры в °С.

### 1.3.3 Измерение электродинамической силы

Для измерения электродинамической силы взаимодействия между медными шинами I и II в стенде применена мостовая схема М на четырех

резисторах R1-R4 (Рис. 1.6, Рис. 1.8). В диагональ моста AB (Рис. 1.8) включен источник постоянного напряжения  $U_m = 4,5 \text{ В}$ , в диагональ CD – измерительный прибор ИП1 – вольтметр, шкала которого проградуирована в МПа для удобства измерения механического напряжения в материале шины. Движок резистора R3 механически связан с шиной I через упор Y, тягу и редуктор.

Перед проведением каждого опыта по измерению электродинамической силы необходимо обеспечить соприкосновение упора Y (Рис. 1.8) с шиной I вращением ручки «R3» (Рис. 1.6) по часовой стрелке. **Внимание! Вращение ручки «R3» в обратном направлении или приложение к ней больших механических усилий может привести к выходу из строя механической связи!** Затем, при необходимости, следует выполнить балансировку моста вращением ручки «R2». При правильной балансировке напряжение между точками C и D равно нулю, и стрелка прибора ИП1 находится в нулевом положении.

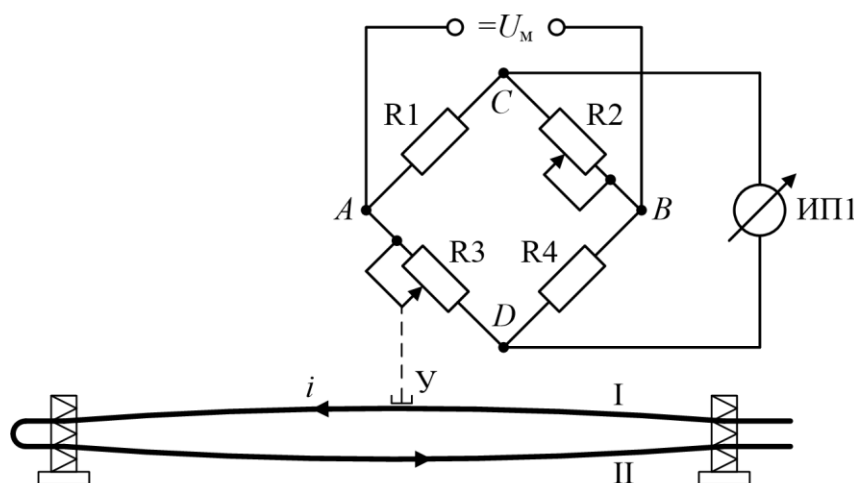


Рис. 1.8. Способ замера электродинамической силы

При протекании по шинам I и II токов разного направления возникают силы, отталкивающие шины в разные стороны. Изгибаясь, шина I смещает упор Y (Рис. 1.8) вверх и заставляет перемещаться движок резистора R3. При этом балансировка моста нарушается, и между точками C и D появляется напряжение, фиксируемое измерительным прибором ИП1. После отключения нагрузочного трансформатора (и исчезновения тока в шинах) положение движка R3 не изменяется, т.е. ИП1 фиксирует максимальное напряжение в ходе опыта.

В стенде имеется окно для визуального наблюдения за шинами I и II при проведении опытов (Рис. 1.6).

## 1.4 Задание на работу

1. Рассчитать постоянную времени нагрева алюминиевой шины III. Размеры шины:  $h = 0,011 \text{ м}$ ,  $b = 0,004 \text{ м}$ ,  $l = 0,20 \text{ м}$ ; теплоемкость шины  $C = 19,03 \text{ Дж / } ^\circ\text{С}$ , коэффициент теплоотдачи  $k = 11,4 \text{ Вт / (м}^2 \cdot ^\circ\text{С)}$ .
2. Рассчитать установившуюся температуру  $\theta_n$  шины III при протекании по ней тока нагрузки. Длительно допустимый ток шины  $I_{\text{доп}} = 100 \text{ А}$  (при температуре окружающей среды  $\theta_{0,\text{т}} = 25^\circ\text{С}$ ).
  - При подготовке к лабораторной работе выполнить расчет, приняв  $\theta_0 = 20^\circ\text{С}$ ,  $I_{\text{нагр}} = 90 \text{ А}$ .
  - В лаборатории произвести перерасчет по реальной температуре, измеренной прибором ИП2, и току нагрузки, заданному преподавателем.
3. Снять кривые нагрева и охлаждения шины III, определить экспериментальные значения установившейся температуры нагрева и постоянной времени и сравнить их с расчетными.
  - Снять кривую нагрева шины III при протекании по ней тока нагрузки.
    - Накладку Н установить в положение 1.
    - Амперметр А подключить к ТА1; выводы ТА2 закоротить металлической накладкой.
    - Выставить напряжение  $U$  на выходе АТ, соответствующее требуемому току  $I_{\text{нагр}}$ .
    - Нажать кнопку «ПУСК» и немедленно начать запись показаний прибора ИП2. Замеры производить через каждые 30 с и продолжать до тех пор, пока температура не достигнет установившегося значения – в течение  $(3...4)T$ .
  - Снять кривую охлаждения шины III.
    - Нажать кнопку «СТОП» и немедленно начать запись показаний прибора ИП2. Периодичность замеров и продолжительность опыта такие же, как при снятии кривой нагрева.
  - Полученную экспериментально установившуюся температуру нагрева сравнить с рассчитанной в п.2.
  - Определить графическим путем постоянную времени нагрева и сравнить ее с рассчитанной в п.1.

4. Расчетным путем определить температуру нагрева шины III при КЗ  $\theta_k$  и сравнить ее с  $\theta_{k, \text{доп}}$ . При расчетах необходимо учесть, что источником питания установки является система неограниченной мощности ( $S_c = \infty$ ), при этом переходный процесс практически отсутствует, и значение периодической составляющей тока КЗ остается постоянным.
- При подготовке к лабораторной работе выполнить расчет для тока КЗ  $I_n = 1000$  А и начальной температуры  $\theta_n$ , найденной в п.2.
  - В лаборатории произвести перерасчет по реальной температуре, измеренной прибором ИП2, и току КЗ, заданному преподавателем.
5. Опытным путем определить температуру нагрева шины III при КЗ и сравнить ее с расчетной.
- Амперметр А подключить к ТА2; выводы ТА1 закоротить металлической накладкой.
  - Выставить напряжение  $U$  на выходе АТ, соответствующее требуемому току КЗ.
  - Нажать кнопку «Пуск» и зафиксировать показания амперметра.  
**Внимание! Ток КЗ отключается автоматически через время 3,4 с. За это время необходимо успеть снять замер тока.**
  - По прибору ИП2 определить температуру нагрева шины. Из-за инерционности процесса теплообмена спай термопары продолжит нагреваться некоторое время после отключения тока. Необходимо зафиксировать максимальное показание прибора ИП2.
  - Сравнить измеренное значение  $\theta_k$  с рассчитанным в п.4.
6. Расчетным путем определить механическое напряжение  $\sigma_{\text{расч}}$  в медных шинах I и II при токе КЗ 1000 А и сравнить с допустимым  $\sigma_{\text{доп}}$ . Параметры шин:  $h = 0,015$  м,  $b = 0,004$  м,  $a = 0,008$  м,  $l = 1$  м.
7. Опытным путем определить механическое напряжение в медных шинах I и II при токе КЗ 1000 А и сравнить его с расчетным.
- Накладку Н установить в положение 2.
  - Обеспечить соприкосновение упора У (Рис. 1.8) с шиной I и проверить балансировку моста М (см. п.1.3.3).
  - Нажать кнопку «ПУСК» и снять показания приборов А и ИП1.  
**Внимание! Повторное проведение опыта возможно через 2-3 мин во избежание перегрева шин и контактных соединений!**

- Сравнить измеренное значение  $\sigma$  с рассчитанным в п.6.

## 1.5 Вопросы для самоконтроля

1. Куда расходуется энергия, выделяемая в проводнике:
  - во время неустановившегося теплового процесса в нормальном режиме;
  - во время неустановившегося теплового процесса в режиме КЗ;
  - во время установившегося теплового процесса в нормальном режиме?
2. Как записывается уравнение теплового баланса проводника для нормального режима?
3. Что характеризует постоянная времени нагрева, и как она определяется (аналитическим и графическими путями)?
4. Как рассчитывается установившаяся температура нагрева  $\theta_n$ ?
5. Какой материал шины следует выбрать для уменьшения  $\theta_n$ : алюминий или медь (при постоянных размерах, токе нагрузки и коэффициенте теплоотдачи)?
6. Чему равна длительно допустимая температура нагрева для неизолированных шин? Чем определяется это значение?
7. Каково уравнение нагрева проводника при КЗ?
8. Как определяется конечная температура нагрева  $\theta_k$  проводника при КЗ?
9. Какие температуры нагрева при КЗ допустимы для неизолированных шин: алюминиевых, медных? Чем определяются эти значения?
10. Объясните, почему  $\theta_{n, \text{доп}}$  не равна  $\theta_{k, \text{доп}}$ .
11. Для шины из какого материала  $\theta_k$  будет меньше: алюминия или меди (при одинаковых размерах шин, токе КЗ и времени его действия)?
12. Запишите выражение для определения силы взаимодействия между параллельными проводниками конечной длины.
13. Как определить направление сил, действующих на параллельные проводники при их электродинамическом взаимодействии?
14. Какое расположение шин обеспечивает большую электродинамическую стойкость: «на ребро» или «плашмя»?
15. При каком виде КЗ электродинамические силы, действующие на шины электроустановки, больше: однофазном или трехфазном?