



Курс: «Электрические аппараты»

Лекция №3 Нагрев электрических аппаратов

Преподаватель: Сарсенбаев Е.А., ассоц.проф. кафедры
«Энергетика»

y.sarsenbayev@satbayev.university

Алматы 2025

Содержание

- 1. Источники теплоты в ЭА*
- 2. Эффект близости*
- 3. Тепловое излучение. Тепловой закон Ома.*
- 4. Конвекция*
- 5. Режимы нагрева ЭА*
- 6. Нагрев аппаратов в переходных режимах*
- 7. Постоянная нагрева*
- 8. Нагрев при кратковременном режиме работы*
- 9. Термическая стойкость электрических аппаратов*

По завершению урока Вы будете знать:

- 1. Тепловое излучение. Тепловой закон Ома.*
- 2. Конвекция*
- 3. Режимы нагрева ЭА*
- 4. Нагрев аппаратов в переходных режимах*
- 5. Постоянная нагрева*
- 6. Нагрев при кратковременном режиме работы*

Источники теплоты в ЭА

Электрическими аппаратами- являются сложными электротехническими устройствами, содержащими много элементов, один из которых являются проводниками электрических токов, другие – проводниками магнитных потоков, а третьи служат для электрической изоляции. Часть элементов может перемещаться в пространстве, передавая усилия другим узлам и блокам.

Работа большей части аппаратов связана с преобразованием одних видов энергии в другие. При этом, как известно, неизбежны потери энергии и превращение ее в тепло. При протекании тока по электрическому проводнику в нем выделяется мощность:

$$P = I^2 R \quad \text{где} \quad R = \rho \frac{l}{S}$$

Удельное электрическое сопротивление материала проводника зависит от температуры θ и в большинстве случаев (до температуры 150-200°C) вычисляется:

$$\rho = \rho_0 (1 + \alpha \theta)$$

где ρ_0 – удельное сопротивление при $\theta = 0^\circ\text{C}$; α – температурный коэффициент сопротивления.

Эффект близости

При работе на переменном токе проявляется поверхностный эффект. Это явление неравномерного распределения плотности переменного тока по поперечному сечению одиночного проводника. Оно приводит к возникновению дополнительных по сравнению с постоянным током потерь мощности, которые учитываются коэффициентом поверхностного эффекта:

$$K_{\Pi} \geq 1$$

Установлено, что этот коэффициент для немагнитных проводников зависит от формы и геометрических размеров проводника. С ростом частоты и уменьшением удельного сопротивления проводника поверхностный эффект проявляется сильнее. Чем больше диаметр проводника, тем больше поверхностный эффект (коробчатое сечение).

Эффект близости – явление неравномерного распределения плотности тока (переменного), обусловленное влиянием друг на друга близко расположенных проводников с токами. Коэффициент близости K_{δ} также, как и K_{Π} зависит от геометрических размеров, формы проводников и δ_1 расстояния между ними. В отличие от K_{Π} , K_{δ} может принимать различные значения или быть равная единице.

Таким образом:

$$P = K_{\Pi} K_{\delta} P_{=} = K_{\Pi} K_{\delta} I^2 R$$

Эффект близости

Эффект близости усиливается с ростом частоты, электропроводимости, зависит от взаимного расположения проводников, их формы и направления токов в них. Чем ближе проводники друг к другу, тем более эффект близости.

В проводниках из ферромагнитных материалов явления поверхностного эффекта и эффекта близости проявляется значительно сильнее и коэффициенты K_n и K_δ в этих случаях существенно больше, чем в немагнитных проводниках.

В ферромагнитных нетоковедущих частях ЭА, находящихся в переменном магнитном поле, также имеют место источники теплоты, которые обусловлены вихревыми токами, возникающими тогда, когда переменный во времени магнитный поток пронизывает ферромагнитные части аппарата.

Для сплошных замкнутых магнитопроводов расчет потерь мощности проводится по формуле:

$$P = (2,9 - 3,25) \cdot 10^{-4} \left(\frac{IN}{l_{cp}} \right)^{5/3} \cdot S_{охл} \sqrt{f}$$

где I – ток; N – число витков; l_{cp} – средняя длина магнитопровода; $S_{охл}$ – площадь поверхности охлаждения; f – частота переменного тока.

Если магнитопровод выполнен из листовой стали, то потери мощности в нем определяются на основании приведенных в справочной литературе зависимости удельных потерь от амплитудного значения индукции, частоты тока, толщины листа и сорта стали.

Эффект близости

Следует иметь в виду, что ферромагнитные части аппарата могут нагреваться в переменном магнитном поле, даже если они не образуют замкнутую систему для магнитного потока.

Имеется еще ряд источников теплоты, которые в одних аппаратах играют существенную роль, а в других ими можно пренебречь.

Так в электромеханических ЭА, предназначенных для коммутации электрических цепей, мощным источником теплоты является электрическая дуга. В других аппаратах потери на трение или удар составляют большую долю от общих потерь мощности. ЭА, имеющие движущиеся жидкости или газы должны быть рассчитаны с учетом гидравлических потерь, а изоляция высоковольтных и высококачественных аппаратов с учетом диэлектрических потерь.

Способы уменьшения потерь в ферромагнитных деталях

- увеличение расстояния друг от друга;*
- введение немагнитного зазора в магнитопроводе;*
- к.з. виток, создает дополнительное магнитное сопротивление и уменьшает ;*
- применение в конструкциях немагнитных материалов.*

Эффект близости

Различают три способа распространения теплоты в пространстве:

1. теплопроводностью
2. тепловым излучением
3. конвекцией.

Теплопроводность — распространение тепловой энергии при непосредственном соприкосновении отдельных частиц или тел, имеющих разную температуру.

В соответствии с гипотезой Фурье количество теплоты d^2Q проходящее через элементарную площадку изотермической поверхности dS за промежуток времени dt определяется как:

$$d^2Q = -n_0 \lambda \frac{d\theta}{dn} dS \cdot dt$$

где λ - теплопроводность; n_0 – единичный вектор нормали к площадке dS ;
 $\frac{d\theta}{dn}$ – температурный градиент. Отрицательный знак обусловлен тем, что тепло распространяется от точек с большей температурой к точкам с малой температурой, т.е. противоположно градиенту температуры.

Изотермическая поверхность — где все точки имеют одинаковую температуру.

Тепловое излучение. Тепловой закон Ома.

Для большинства веществ в определенном диапазоне температуры теплопроводность зависит от температуры линейно, т.е.

$$\lambda = \lambda_0 [1 + \beta(\theta - \theta_0)]$$

где λ_0 – теплопроводность при $\theta = \theta_0$; β – температурный коэффициент теплопроводности.

Тепловой закон Ома

$$\Delta\theta = \frac{\Phi_0 \delta}{\lambda} = \frac{\Phi_0 \delta}{\lambda S} = \Phi \cdot R_T$$

где $\Phi = \Phi_0 \cdot S$; δ – длина пути потока Φ ; R_m – термическое сопротивление.

Тепловое излучение – распространение внутренней энергии тела путем электромагнитных волн. Совокупность процессов взаимного излучения, поглощения, отражения и пропускания энергии в системе различных тел называют **теплообменным излучением**, лучеиспусканием или радиацией.

В общем случае плотность собственного излучения подчиняется закону Стефана-Больцмана:

$$P = 5,67 \cdot \varepsilon \left(\frac{T}{100} \right)^4$$

где P – плотность теплового потока; ε – коэффициент излучения тепла ($0 \leq \varepsilon \leq 1$); T – температура, $^{\circ}\text{K}$.

Тепло, отдаваемое телом при тепловом излучении, зависит от четверной степени абсолютной температуры нагретой поверхности.

Конвекция

Конвекция – распространение теплоты при перемещении объемов жидкостей или газов в пространстве из областей с одной температурой в области с другой температурой.

Различают **естественную и вынужденную** конвекцию. При естественной конвекции движение происходит за счет выталкивающих (Архимедовых) сил, возникающих из-за различных плотностей холодных и горячих частиц жидкости или газа. При вынужденной конвекции жидкость или газ движется за счет внешних сил (под действием насоса, вентилятора). Охлаждение воздушное, водяное. Движение **ламинарное** (параллельно стени канала), **турбулентное** (хаотическое, неупорядочное). Лучшая отдача тепла от труб с жидкостью при ее турбулентном движении.

$$P = K_T S_{\text{охл}} (\theta - \theta_0)$$

где K_m – коэффициент теплоотдачи – определяется эмпирически.

Он зависит от многих факторов, в том числе:

- температуры, вязкости и плотности окружающей среды;
- скорости, вынужденного движения среды;
- формы, охлаждаемой поверхности и ее расположения относительно потока охлаждающей среды;
- температуры, охлаждаемой поверхности.

Конвекция

Кроме допустимой температуры стандартами установлена температура окружающей среды. Для большинства ЭА при расчете длительных режимов работы температура окружающей среды (воздуха) принимается равной $+40^{\circ}\text{C}$.

Для уменьшения мощности источников теплоты в ЭА:

- применяют проводниковые материалы с малым удельным сопротивлением;
- при резко выраженном поверхностном эффекте используют трубчатые проводники, чем достигается более равномерное распределение плотности тока по сечению;
- при наличии составных шин их располагают таким образом, чтобы поверхностный эффект и эффект близости оказывали возможно меньшее влияние на мощность источников потерь;
- в конструкции на токоведущих частях вместо ферромагнитных используют неферромагнитные материалы – немагнитный чугун, латунь, бронза;
- применяют к.з. витки на пути магнитного потока в ферромагнитной детали.

После возможного уменьшения мощности источников теплоты следует выявить пути уменьшения максимальной температуры в аппарате за счет увеличения коэффициента теплоотдачи – K_m или площади охлаждения – $S_{\text{охл}}$. Такой способ уменьшения температуры называется **идентификацией охлаждения**.

Режимы нагрева ЭА

Режимы нагрева ЭА. При эксплуатации ЭА могут иметь место следующие режимы работы:

- **продолжительный** – при котором температура аппарата достигает установившегося значения и аппарат при этой температуре остается под нагрузкой сколь угодно длительное время;*

- **прерывисто-продолжительный** – при котором аппарат остается под нагрузкой при установившемся значении температуры ограниченное техническими условиями время;*

- **повторно-кратковременный** – при котором, температура частей ЭА за время нагрузки не достигает установившегося значения, а за время паузы не достигает температуры холодного состояния;*

- **кратковременный** – при котором в период нагрузки температура частей ЭА достигает установившегося значения, а в период отсутствия нагрузки достигает температуры холодного состояния;*

- **короткого замыкания** – это частный случай кратковременного режима работы, когда температура частей ЭА значительно превосходит установившуюся температуру при нормальном режиме работы.*

Нагрев аппаратов в переходных режимах

Нагрев аппаратов в переходных режимах. После включения аппарата температура его элементов на фазу достигает установившегося значения. Тепло, выделяемое в аппарате частично отдается в окружающую среду, частично идет на повышение температуры.

$$\begin{array}{ccccc} Pdt & + & K_T S \tau dt & = & Cd\theta & \text{- уравнение Ньютона} \\ \downarrow & & \downarrow & & \downarrow & \\ \text{мощность} & & \text{количество} & & \text{количество тепла} & \\ \text{тепловых} & & \text{тепла} & & \text{воспринимаемого} & \\ \text{потерь в} & & \text{отдаваемое в} & & \text{телом при измене-} & \\ \text{теле (Вт)} & & \text{окружающую} & & \text{нии его темпера-} & \\ & & \text{среду за время} & & \text{туры на } d\theta & \\ & & dt & & & \end{array}$$

C – теплоемкость тела ($\text{Вт} \cdot \text{с}$);

$C = c M$, c – удельная теплоемкость единицы массы;

M – масса тела (кг).

Нагрев аппаратов в переходных режимах

Возможно **три режима работы** аппарата.

Первый характеризуется постоянством подводимой к нему мощности:

$$P = I_0^2 R_0 = \text{const}$$

Этот случай встречается при последовательном включении его аппарата в цепь и малом изменении его сопротивления R_0 с ростом температуры.

При **втором** режиме ток через аппарат в процессе нагрева не меняется $I_0 = \text{const}$, так как его сопротивление значительно меньше сопротивления нагрузки и остальной части цепи ($Z_{ан} \ll Z_{цепи}$). Вследствие нагрева сопротивления токоведущей части аппарата изменяется тогда мощность, подводимая к аппарату.

$$P = I_0^2 R = I_0^2 R_0 (1 + \alpha_R \theta) = I_0^2 R_0 [1 + \alpha_R (\theta_0 + \tau)]$$

При **третьем** режиме обмотка аппарата подключена к напряжению и источника бесконечной мощности. Обычно так включается катушка реле напряжения и контактов. В этом случае:

$$P = \frac{U^2}{R_0 (1 + \alpha_R \theta)} = \frac{U^2}{R_0 [1 + \alpha_R (\theta_0 + \tau)]} \quad \tau = \theta - \theta_0$$

Постоянная нагрева

Если $P = \text{const}$, то решение имеет вид (рисунок 1):

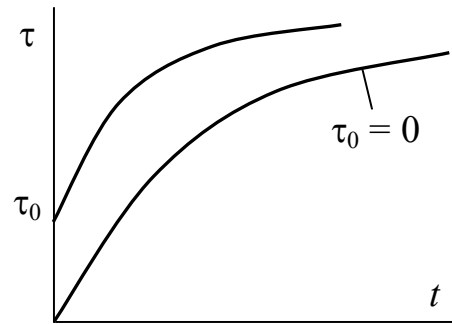


Рисунок 1. $P = \text{const}$.

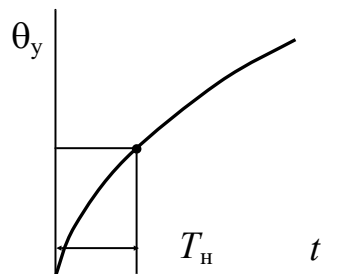
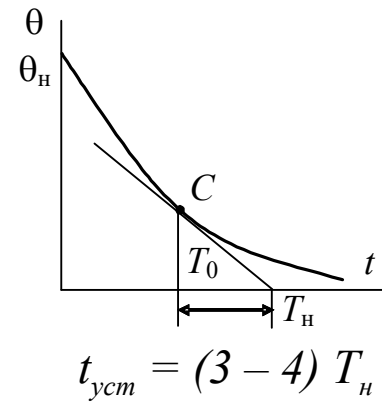
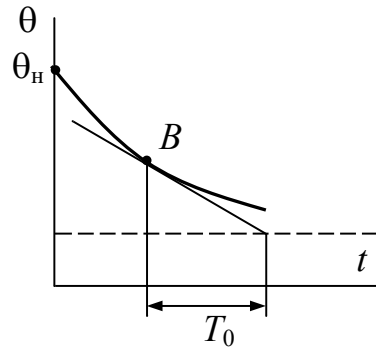
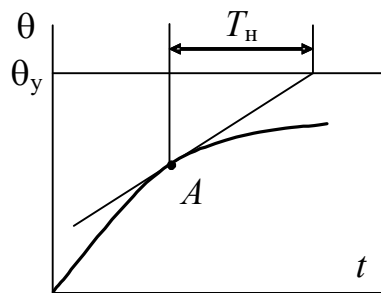
$$\tau = \tau_0 e^{-t/T} + \tau_y (1 - e^{-t/T_n})$$

Чем больше T_n , тем медленнее происходит нагрев. В установившемся режиме все тепло выделяется в окружающую среду.

T_n — постоянная нагрева.

Постоянная нагрева (рисунок 2).

Постоянная нагрева



$$T_H = 0,632 \theta_{уст}$$

Рисунок 2. Постоянная нагрева.

Постоянная нагрева

Постоянная времени – это время, в течение которого тело нагрелось бы до установившейся температуры при отсутствии теплоотдачи тепла в окружающую среду.

При нагреве без отдачи тепла в окружающую среду

$$Pdt = Cd\tau \quad \tau = \frac{P}{C}t \quad P = K_T S \tau_{уст} \quad T_H = C / K_T S \quad \tau = \left(\tau_y / T_H \right) t$$

т.е. рост температуры описывается касательной к кривой $\tau(t)$ в начале координат (рисунок 3).

$$T_H = \frac{C}{K_T S_{охл}} \quad \text{постоянного времени.}$$

$$\theta = \theta_y (1 - e^{-t/T_H}) + \theta_H e^{-t/T_H}, \quad \text{если } \theta_H = \theta_0 \quad \text{то,}$$

$$\theta = \theta_y (1 - e^{-t/T_H}) \quad - \text{нагрев (2)}$$

$$\theta = \theta_H e^{-t/T_0} \quad - \text{охлаждение (1)}$$

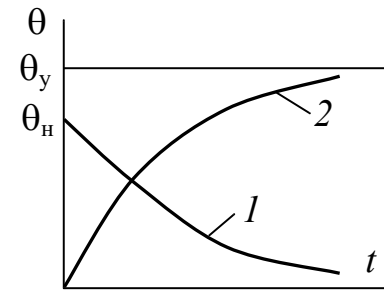


Рисунок 3. Рост температуры.

Постоянная нагрева

После отключения аппарата тепло, накопленное в процессе нагрева, отдается в окружающую среду (рисунок 4). При этом энергетический баланс при охлаждении описывается уравнением:

$$Cd\tau = -K_T \cdot S\tau dt \qquad \tau = \tau_y e^{-t/T_0}$$

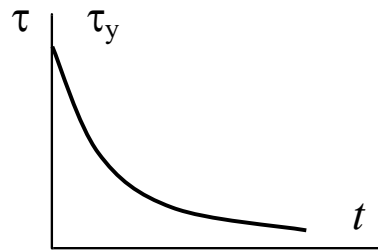


Рисунок 4. Тепло отдается в окружающую среду.

Нагрев при кратковременном режиме работы

Нагрев при кратковременном режиме работы. Такой режим характеризуется тем, что при включении температуры его не достигает установившегося значения. После кратковременного нагрева аппарат отключается и его температура падает до значения температуры окружающей среды (рисунок 5).

$$\tau_{\text{доп}} = \tau_y \left(1 - e^{-t_{\text{кр}}/T_n} \right)$$

$$t_{\text{кр}} = T \ln \frac{1}{1 - \tau_{\text{доп}}/\tau}$$

Чем больше постоянная нагрева T_n , тем больше время нахождения аппарата под током.

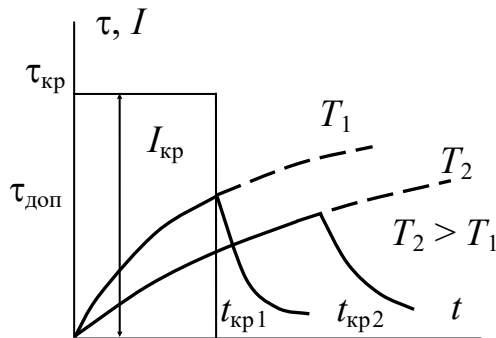


Рисунок 5.

$$\tau_{\text{доп}} = I_{\text{дл}}^2 R / K_T S$$

$$\tau_{\text{кр}} = I_{\text{кр}}^2 R / K_T S$$

$$I_{\text{дл}}^2 = I_{\text{кр}}^2 \left(1 - e^{-t_{\text{кр}}/T} \right)$$

$$I_{\text{кр}} = I_{\text{дл}} / \sqrt{1 - e^{-t_{\text{кр}}/T}}$$

Нагрев при кратковременном режиме работы

Для характеристики кратковременного режима вводится понятие коэффициента перегрузки $K_p = I_{кр} / I_{дл}$, который показывает во сколько раз может возрасти нагрузка (допустимая) по току при кратковременном режиме по сравнению с длительным режимом:

$$K_p = \frac{1}{\sqrt{1 - e^{-t_{кр}/T_n}}}$$

С увеличением постоянной времени нагрева при неизменном значении $t_{кр}$ допускаемый ток $I_{кр}$ и коэффициент K_p – растут. В связи с этим в аппаратах, работающих в кратковременном режиме, рекомендуется увеличивать T_n , что позволяет повысить нагрузку по току. Увеличение T_n достигается в основном за счет увеличения массы материала, участвующего в нагреве.

При $t = 4T_n$ допускаемое превышение температуры достигает $0,98\tau_{уст}$. Поэтому при $t > 4T_n$ режим можно считать длительным.

Нагрев при кратковременном режиме работы

При перемежающемся режиме ток через аппарат циклически меняется не спадая до нулевого значения. Частный случай – ПКР ($I_{P_2} = 0$)

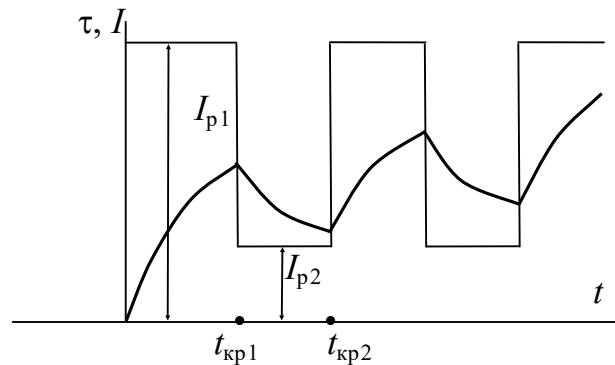


Рисунок 6.

$$I_{дл\text{ ПКР}} = I_P \sqrt{\frac{1 - e^{-t_p/T}}{1 - e^{-(t_p + t_n)T_n}}}$$

ПКР характеризуется продолжительностью включения ПВ:

$$ПВ = \frac{t_p}{t_p + t_n} \cdot 100\%$$

Коэффициент перегрузки при ПКР:

$$K_p = \frac{I_P}{I_{дл}} \sqrt{\frac{1 - e^{-t_p \cdot 100/T_n \cdot ПВ\%}}{1 - e^{-t_p/T_n}}}$$

Нагрев при кратковременном режиме работы

При ПКР максимальная температура ЭА меньше, чем при продолжительном режиме, т.е. в этом режиме возможно тепловая перегрузка по мощности:

$$K_p = \frac{1 - e^{-\left(\frac{t_p + t_n}{T}\right)}}{1 - e^{-\frac{t_p}{T}}}$$

Если $t_p + t_n \leq 0,1T$ то с погрешностью не выше 5 % можно считать:

$$K_p = \frac{t_p + t_n}{t_p} \qquad K_I = \sqrt{K_p}$$

$$K_p = \frac{100}{ПВ\%}$$

- коэффициент перегрузки по току.

При возрастании отношения , тепловая нагрузка аппарата увеличивается, а коэффициент перегрузки по току уменьшается.

Термическая стойкость электрических аппаратов

Нагрев аппаратов при К.З. Ток превышает длительное значение в 10-20 раз. Для ограничения тока, а, следовательно, нагрева, применяются защитные средства при этом длительность протекания тока ограничивается 4-5 секундами.

Термическая стойкость ЭА. Это способность ЭА выдерживать без повреждений, препятствующих дальнейшей работы, термическое воздействие протекающих по токоведущим частям токов заданной длительности.

Количественной характеристикой термической стойкости является ток термической стойкости, протекающий в течение определенного промежутка времени.

Термическая стойкость ЭА зависит не только от режима к.з., но и от теплового состояния, предшествующего этому режиму.

Для большинства ЭА время протекания к.з. $t \leq 0,1 \text{ Т}$, т.е. не превосходит времени нагрева при адиабатическом процессе (нагрев без теплообмена с окружающей средой).

Другими словами режим к.з. можно рассматривать как кратковременный режим работы, при котором температура ЭА может достигать значений, превосходящих допустимую температуру в продолжительном режиме.

Термическая стойкость электрических аппаратов

Существуют ограничения, которые в основном диктуются температурой рекристаллизации материала токоведущих частей. В электроаппаратах высокого напряжения приняты следующие значения максимальной температуры при кратковременном режиме работы:

- неизолированных токоведущих частей из меди или ее сплавов – 300°C ;
- алюминиевых токоведущих частей – 200°C ;
- токоведущих частей (кроме алюминиевых), соприкасающихся с ограниченной изоляцией или маслом – 250°C .

Расчетные времена к.з. стандартизированы и приняты равными 10; 5; 1 с. В соответствии с этими временами и токи термической стойкости носят название 10-ти секундный, 5-ти секундный и 1-секундный ток термической стойкости соответственно, т.е.:

$$I_1^2 = 5I_5^2 = 10I_{10}^2$$

формула пересчета токов термической стойкости.

ГОСТ - $\theta_0 = 40^{\circ}\text{C}$. Если $\theta_0 > 40^{\circ}\text{C}$ необходим пересчет:

$$I_{\text{дон}} = I_n \sqrt{\frac{\theta_{\text{дон}} - \theta_o}{\theta_{\text{дон}} - 40^{\circ}\text{C}}}$$

Если $\theta_0 < 40^{\circ}\text{C}$ – токовую нагрузку можно увеличить.



Спасибо за внимание!!!