



# «Электрические аппараты»

## Нагрев электрических аппаратов

### Ч. 1



## Тепловые процессы в электрических аппаратах

Электрический аппарат – сложное электромеханическое устройство. Главная часть аппарата – контакты, к ним подсоединяются подводящие провода, по которым течет ток; почти во всех аппаратах есть электромагниты, по магнитопроводу замыкается магнитный поток, при переменном потоке есть магнитные потери. Так как провода катушек изолированы, то каждый виток обмотки имеет емкость по отношению к соседним виткам и к заземленной части аппарата. Поэтому имеют место потери в изоляции.

Активные потери  $P$  при протекании тока  $i$  по проводнику:

$$P = i^2 R;$$
$$W = \int_0^t i^2 R dt,$$

где  $R$  – активное электрическое сопротивление однородного проводника длиной  $l$  и поперечным сечением  $S$ ;  $W$  – энергия, выделяющаяся в проводнике;  $t$  – длительность протекания тока в проводнике.

Если известен ток (он определяется не аппаратом, а нагрузкой и генератором), то основная задача, заключающаяся в нахождении активных потерь в аппарате, в самом простом случае, при постоянном токе, сводится к нахождению сопротивления по формуле

$$R = \frac{\rho l}{S} = \frac{l}{\gamma S},$$

где  $\rho$  – удельное электрическое сопротивление материала проводника;  $\gamma$  – удельная проводимость материала.

Удельное электрическое сопротивление материала проводника зависит от температуры  $\theta$  и в большинстве случаев (до температуры  $150 \div 200$  °С) вычисляется по формуле

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

где  $\rho_0$  – удельное сопротивление материала при температуре  $0$  °С;  $\alpha$  – температурный коэффициент сопротивления.

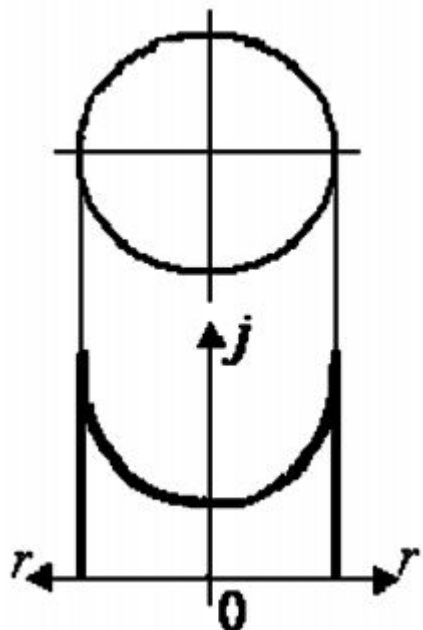
## Поверхностный эффект

При переменном токе и высоких частотах сечение проводника используется не полностью, и степень использования определяется глубиной проникновения электромагнитной волны в тело стержня

Как известно из курса теоретических основ электротехники, *поверхностным эффектом* называется явление неравномерного распределения плотности переменного тока  $j$  по поперечному сечению одиночного проводника. Неравномерность распределения плотности тока при поверхностном эффекте приводит к возникновению дополнительных по сравнению с постоянным током потерь мощности, которые учитываются коэффициентом поверхностного эффекта  $K_{\text{п}} \geq 1$ .

## Поверхностный эффект

Коэффициент поверхностного эффекта для немагнитных проводников зависит от формы и геометрических размеров проводника, а также от соотношения



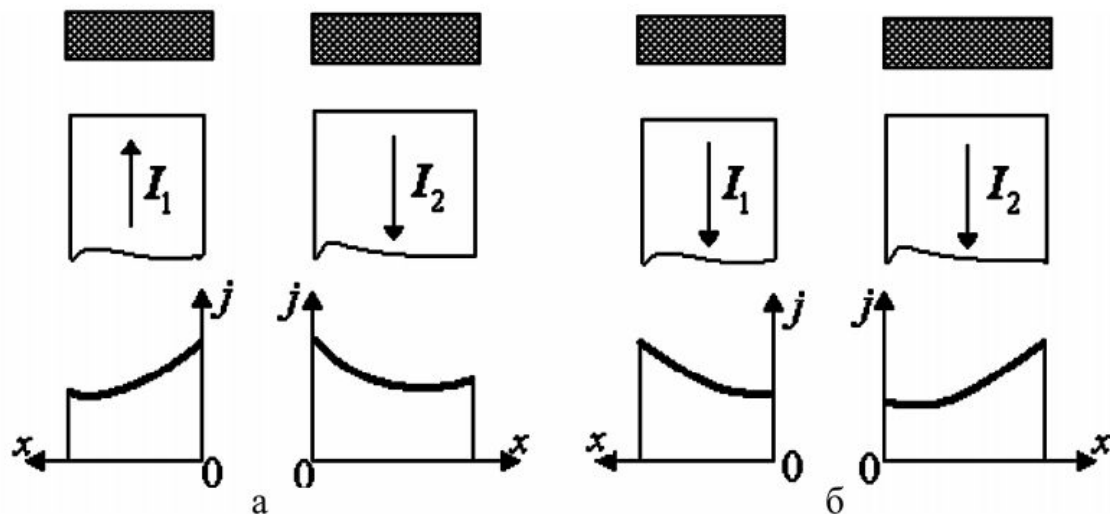
$$\sqrt{\frac{f}{R_{100}}},$$

где  $f$  – частота переменного тока,  
 $R_{100}$  – активное сопротивление постоянному току проводника длиной 100 метров.

Распределение тока в уединенном проводнике

## Эффект близости

Если проводников несколько, то кроме поверхностного эффекта появляется эффект близости. *Эффектом близости* называется явление неравномерного распределения плотности тока, обусловленное влиянием друг на друга близко расположенных проводников с токами. Влияние эффекта близости учитывается коэффициентом КБ



Проявление эффекта близости в двух проводниках:  
 а) при разном направлении тока; б) при одинаковом направлении тока

Таким образом,  $P = i^2 R$  приобретает вид

$$P_{\sim} = K_{\Pi} K_{\text{Б}} P_{=},$$

где  $P_{=}$  – потери мощности при постоянном токе;  $P_{\sim}$  – потери мощности при переменном токе.



## **Активные потери в проводниках из ферромагнитных материалов**

В проводниках из ферромагнитных материалов явления поверхностного эффекта и эффекта близости проявляются значительно сильнее, а коэффициенты  $K_p$  и  $K_B$  в этих случаях существенно больше, чем в немагнитных проводниках.

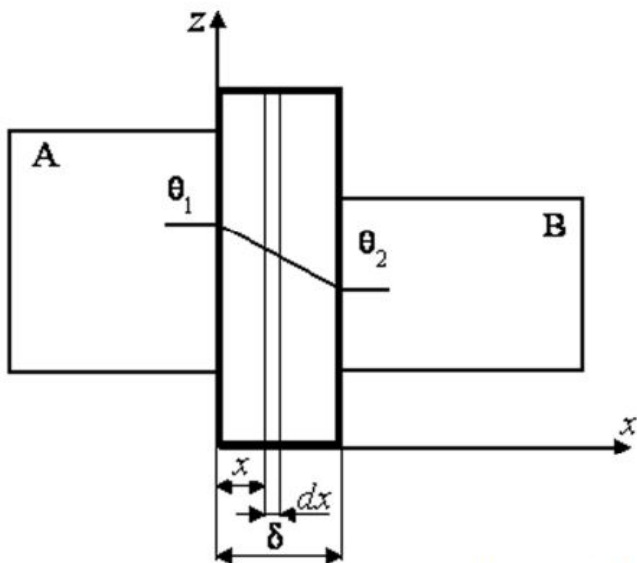
Профессором Н. Е. Лысовым была предложена формула для вычисления потерь мощности при протекании переменного тока по проводнику из ферромагнитного материала

$$P_{\sim} = (2,9 + 3,25) \cdot 10^{-4} \left( \frac{I}{\Pi} \right)^{5/3} S_{\text{охл}} \sqrt{f},$$

где  $\Pi$  – периметр поперечного сечения проводника, м<sup>2</sup>;  $S_{\text{охл}}$  – площадь поверхности охлаждения, м<sup>2</sup>;  $f$  – частота переменного тока, Гц.

## Способы распространения теплоты в электрических аппаратах

**Теплопроводность** – это процесс передачи тепловой энергии от более нагретых частей тела к менее нагретым в результате непосредственного соприкосновения частиц (молекул, атомов, электронов) в их тепловом движении. Наблюдается в одном теле или в телах, имеющих различную температуру. Теплопроводность характерна для передачи тепла в твердом теле.



Распределение температуры в плоской стенке без  
внутренних  
источников теплоты

## Тепловой закон Ома

Термическое сопротивление пропорционально длине пути потока, обратно пропорционально сечению этого пути и коэффициенту теплопроводности:

$$R_T = \frac{\Delta\theta}{P}.$$

**Конвекция** – это распространение теплоты при перемещении объемов жидкостей или газов в пространстве из областей с одной температурой в области с другой температурой, например из более нагретой области в менее нагретую. Таким образом, конвекционный теплоперенос тесно связан с массопереносом и сопровождается теплопроводностью между соседними макрообъемами. Различают естественную и вынужденную конвекции. Естественная конвекция возникает за счет выталкивающих (архимедовых) сил, обусловленных меньшей плотностью нагретых частиц жидкости или газа по сравнению с холодными. При вынужденной конвекции нагреваемая жидкость или газ движутся за счет внешних сил (например, под давлением насоса, вентилятора и т.д.).

**Тепловое излучение** – распространение внутренней тепловой энергии тела путем электромагнитных волн (ультрафиолетовых, световых и инфракрасных лучей), таким образом, тепловая энергия сначала превращается в лучистую, а затем снова в тепловую.

В процессе теплопередачи участвуют обычно все три вида теплообмена, хотя иногда превалирует один из них или два. Например, при протекании тока по изолированной шине имеет место теплопроводность (проводник–изоляция), затем конвекция и лучеиспускание.

## ***Передача тепла конвекцией и излучением с поверхности электрических аппаратов***

В уравнениях для расчета передачи тепла путем конвекции необходимо учитывать массообмен, движение жидкости (уравнение Навье – Стокса), неразрывность потока жидкости или газа. Решение этих уравнений вызывает значительные трудности, поэтому пользуются упрощенным уравнением Ньютона – Рихмана:

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

где  $K_T$  – коэффициент теплоотдачи, который определяют экспериментально;

$\theta$  – температура охлаждаемой поверхности;

$\theta_0$  – температура охлаждающей среды.

### Задание

1. Подготовить конспект.
2. Как зависит удельное электрическое сопротивление проводника от температуры?
3. Как определяются потери мощности при постоянном токе?
4. Как определяются потери мощности при переменном токе?
5. По какой формуле рассчитываются активные потери в проводниках из ферромагнитных материалов?
6. Какими способами распространяется теплота в электрических аппаратах?