

Методы анализа электрических машин

Процесс теплопередачи и температурное поле

МА-06

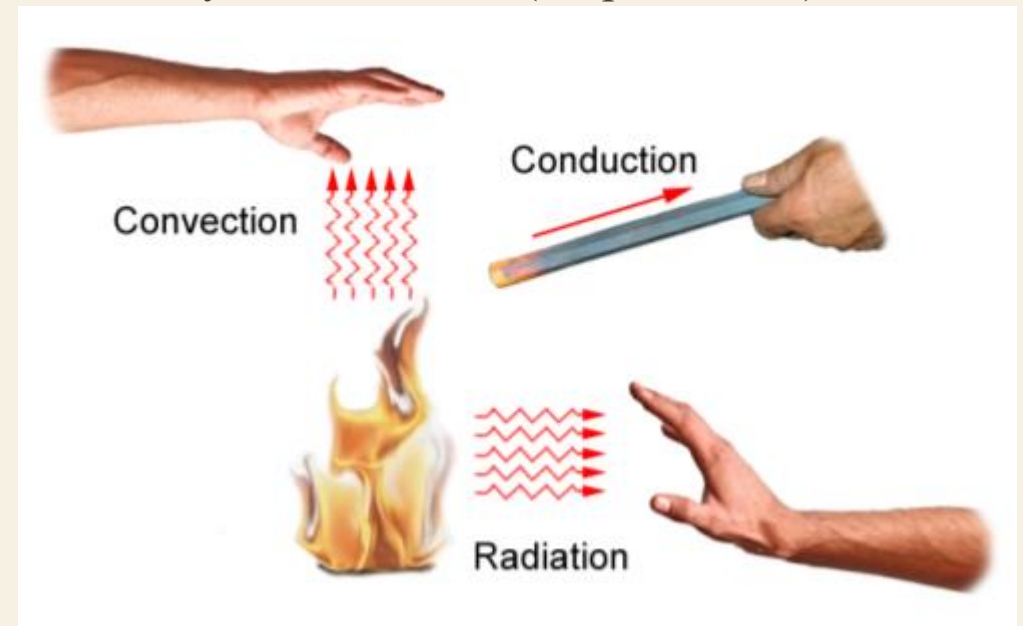
2023

Основные процессы передачи теплоты

Теплообмен – процесс переноса теплоты вследствие неравномерности распределения температуры, т.е. теплообмен обусловлен характером температурного поля

Виды теплообмена:

- Теплопроводность – передача тепловой энергии посредством взаимодействия частиц
 - передача энергии тепловых колебаний между соседними молекулами/атомами (твердые тела)
 - движение свободных электронов (металлы)
 - обмен энергией и диффузия молекул (жидкости)
 - диффузия молекул (газы)
- Конвекция – теплоперенос путем перемещения объемов жидкости/газа
 - естественная: меньшая плотность нагретых объемов – всплывание (сила Архимеда)
 - вынужденная – под действием вентилятора, насоса
- Лучистый теплообмен – излучение электромагнитных волн (обычно инфракрасных)



Основные процессы передачи теплоты

Электрические машины: выделение тепловой энергии (потери мощности), перенос и отвод теплоты (охлаждение)

Самой важное – условия теплоотдачи с охлаждающих поверхностей
Характеризуются тепловым потоком Q , т.е. тепловой энергией, отводимой за 1 с участка поверхности S (размерность – Вт)

$$Q = \alpha S (\theta - \theta_0)$$

где α – коэффициент теплоотдачи (КТО)

θ – температура поверхности

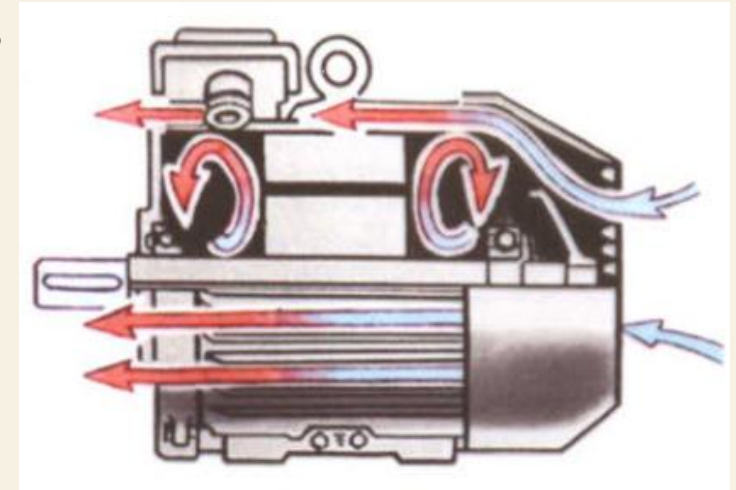
θ_0 – температура окружающей среды

Отводимая энергия
пропорциональна S и $\Delta\theta$

КТО = мощность теплового потока, отводимая с 1 м^2 при $\Delta\theta = 1^\circ$

Электрические машины:

- воздушное охлаждение
 - естественное: $\alpha = 8 \dots 20 \text{ Вт/м}^2 \cdot ^\circ\text{С}$
 - форсированное: $\alpha = \text{десятки} \dots \text{сотни}$
- водяное охлаждение: $\alpha > \text{тысячи}$



Тепловые, гидравлические и аэродинамические расчеты в электрических машинах.
Г.А.Сипайлов, Д.И.Санников,
В.А.Жадан. – М.: Высш.шк., 1989

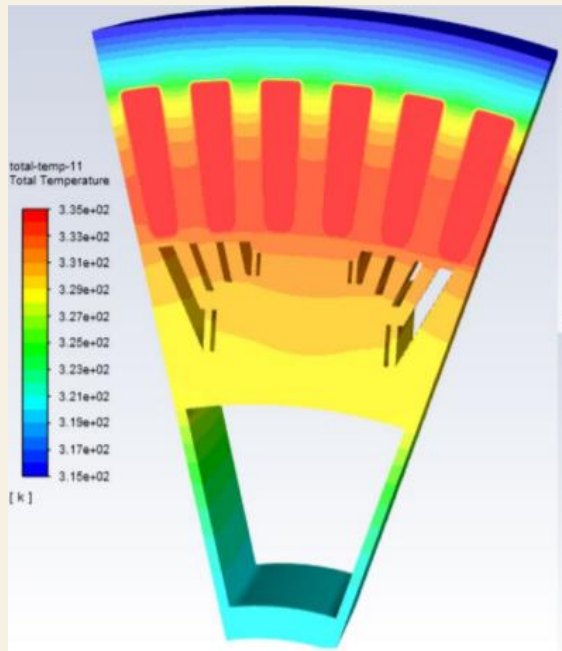
Теплопроводность в твердом теле

Тепловое состояние твердого тела характеризуется температурным полем

$\theta = f(x, y, z, t)$ – распределение температуры в пространстве и ее изменение во времени

Варианты упрощения:

- стационарное температурное поле (в установившемся режиме)
- двумерное поле $\theta = f(x, y)$ – температура не меняется по оси z
- одномерное поле $\theta = f(x)$ – температура не меняется по оси y и оси z



Картина поля – ряд изотермических поверхностей, соединяющих точки с одинаковыми температурами (иногда – заливка цветом пространства между ними)

Передача теплоты – в направлении скорейшего понижения температуры (для изотропных тел) – против градиента температуры

$$\text{grad } \theta = i \frac{\partial \theta}{\partial x} + j \frac{\partial \theta}{\partial y} + k \frac{\partial \theta}{\partial z}$$

или относительно нормали к поверхности

$$\text{grad } \theta = n_0 \frac{\partial \theta}{\partial n}$$

Теплопроводность в твердом теле

Градиент температуры определяет не только направление, но и количество передаваемой теплоты

Закон Фурье для теплопроводности:

Тепловая энергия dQ_T (Дж), проходящая через элемент изотермической поверхности dS за промежуток времени dt

$$dQ_T = -\lambda \frac{\partial \theta}{\partial n} dS dt$$

λ – коэффициент теплопроводности (КТП) [Вт/м·К]

Тепловой поток Q (количество тепловой энергии, передаваемой через изотермическую поверхность за единицу времени)

$$Q = \frac{dQ_T}{dt} = -\lambda \frac{\partial \theta}{\partial n} dS$$

Плотность теплового потока (тепловой поток на единицу площади изотермической поверхности)

$$q = -\lambda \frac{\partial \theta}{\partial n} = -\lambda \text{grad } \theta$$

Вектор плотности теплового потока для изотропной среды

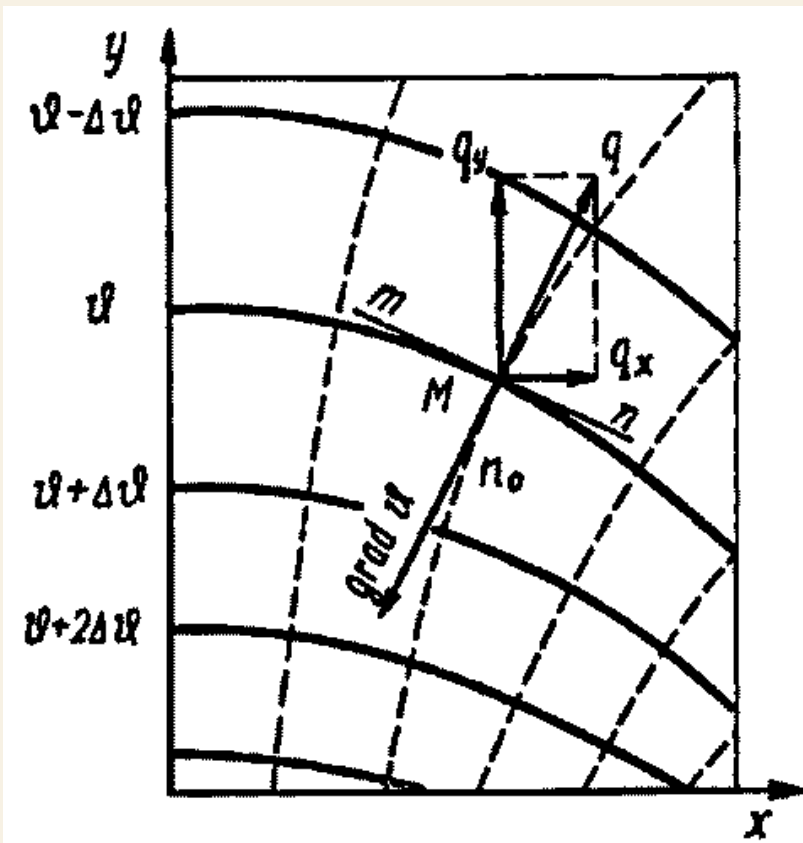
$$\bar{q} = -\lambda \left(i \frac{\partial \theta}{\partial x} + j \frac{\partial \theta}{\partial y} + k \frac{\partial \theta}{\partial z} \right)$$

Материал	λ [Вт/м·К]
серебро	418
медь	400
сталь	82
вода	0,6
воздух	0,026

Теплопроводность в твердом теле

Пример процесса теплопроводности для двумерного поля (симметричного относительно оси y)

- тепловой поток поступает снизу
- направление передачи теплоты – вверх и вправо



Сплошные линии – изотермы (линии равной температуры) через равные промежутки $\Delta\theta$
В точке M : градиент температуры и вектор плотности теплового потока – вдоль нормали к изотерме (перпендикулярно касательной mn)
Пунктирные линии – линии [равной] плотности теплового потока (касательные к ним совпадают с направлением q)
Вместе – ортогональная сетка поля температур

В векторном поле $\mathbf{q}(x, y, z)$ поверхностный интеграл $Q_S = \int_S (\mathbf{q} \cdot \mathbf{n}_s) dS$ равен потоку вектора \mathbf{q} через поверхность S

Физический смысл Q_S – тепловой поток = мощность тепловой энергии, передаваемой через любую поверхность S (в том числе через наружную поверхность тела)

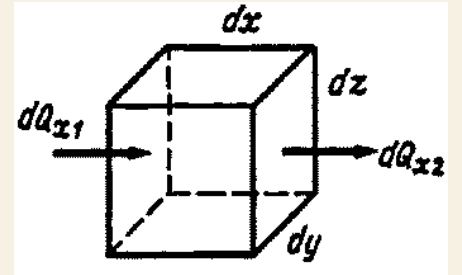
Интегрирование можно проводить в скалярной форме, если использовать не вектор \mathbf{q} , а его проекцию на нормаль к поверхности

Дифференциальное уравнение теплопроводности

Рассмотрим нестационарное трехмерное температурное поле в однородном твердом теле с распределенными внутренними источниками теплоты (обмотка или сердечник ЭМ)

Для элементарного объема $dV = dx \cdot dy \cdot dz$ составим тепловой баланс за элементарный промежуток времени dt

(в малом объеме параметры постоянны, источники потерь распределены равномерно)



- притекающий тепловой поток $dQ_{x1} = -\lambda \frac{\partial \theta}{\partial x} dydz$
- вытекающий тепловой поток $dQ_{x2} = -\lambda \left(\frac{\partial \theta}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial \theta}{\partial x} \right) dx \right) dydz$
- всего по оси x $dQ_x = dQ_{x1} - dQ_{x2} = -\lambda \left(\frac{\partial \theta}{\partial x} - \frac{\partial \theta}{\partial x} - \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} dx \right) dydz = \lambda \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} dx dy dz = \lambda \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} dV$
- аналогично по оси y $dQ_y = \lambda \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} dV$
- по оси z $dQ_z = \lambda \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} dV$
- собственное тепловыделение $p_0 dV$ (p_0 – плотность тепловыделения = мощность потерь в единице объема)

Повышение энтальпии (теплосодержания) в объеме dV вещества с уд.теплоемкостью c и плотностью ρ за время dt

$$\frac{c\rho d\theta dV}{dt} = dQ_x + dQ_y + dQ_z + p_0 dV$$

здесь c – удельная теплоемкость вещества [Дж/(кг·К)], ρ - плотность вещества [кг/м³]

Дифференциальное уравнение теплопроводности

Подставив тепловые потоки и сократив dV , получим дифференциальное уравнение теплопроводности

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{\lambda}{c\rho} \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \right) + \frac{p_0}{c\rho}$$

– описывает нестационарное трехмерное температурное поле в теле с распределенными источниками теплоты в декартовой с.к.

$\frac{\lambda}{c\rho} = a$ – коэффициент температуропроводности [м²/с] (свойство материала – скорость распространения изменений температур) $\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} = \Delta = \nabla^2$ – оператор Лапласа

Тогда дифференциальное уравнение теплопроводности

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = a \nabla^2 \theta + \frac{p_0}{c\rho}$$

Частный случай – стационарное поле ($\partial \theta / \partial t = 0$)

запишем $\lambda \nabla^2 \theta + p_0 = 0$ или $\nabla^2 \theta = -p_0 / \lambda$ (уравнение Пуассона)

Если нет источников тепла ($p_0 = 0$) $\nabla^2 \theta = 0$ (уравнение Лапласа)

Иногда можно упростить до двумерного поля (или одномерного)

Дифференциальное уравнение теплопроводности

Для решения ДУ нужны граничные и начальные условия (краевая задача)

- **Граничные условия 1-го рода** – задание температуры на поверхности тела (например, $\theta_{\text{пов.}} = \text{Const}$)
- **Граничные условия 2-го рода** – задание плотности теплового потока через поверхность тела (т.е. производной по нормали к поверхности $(\partial\theta/\partial n)_{\text{пов.}} = \text{Const}$)
При равномерном распределении теплового потока его плотность $q_{\text{пов.}} = Q / S_{\text{пов.}}$
Для поверхности с идеальной теплоизоляцией $(\partial\theta/\partial n)_{\text{пов.}} = 0$
Также на линии симметрии поля $(\partial\theta/\partial n)_0 = 0$
- **Граничные условия 3-го рода** – для теплообмена поверхности со средой путем конвекции или излучения
В силу непрерывности теплового потока через граничную поверхность $q_{\text{пов.}} = -\lambda(\partial\theta/\partial n)_{\text{пов.}} = \alpha(\theta_{\text{пов.}} - \theta_0)$ (здесь α - коэффициент теплоотдачи с поверхности, θ_0 – температура среды)
получаем линейную зависимость температуры тела и ее производной $(\partial\theta/\partial n)_{\text{пов.}} = -(\alpha/\lambda)(\theta_{\text{пов.}} - \theta_0)$
- **Граничные условия 4-го рода** – для теплообмена между телами с разными коэф. теплопроводности λ
Для обеспечения непрерывности теплового потока $\lambda_1(\partial\theta_1/\partial n)_{\text{пов.}} = \lambda_2(\partial\theta_2/\partial n)_{\text{пов.}}$
(производная имеет разрыв на границе)

Методы расчетов температурных полей в ЭМ

Задача теплового расчета ЭМ – определение температур активных частей ЭМ
(проверка допустимых уровней нагрева)

- обычно – для номинального режима работы при установившемся состоянии
- иногда – для нестационарного нагрева при перегрузке

Результат расчета – температурные поля в наиболее нагретых частях ЭМ
чаще – средние температуры / превышения температур в отдельных частях

- Активные части ЭМ – твердые тела с внутренними распределенными источниками теплоты (потери)
Они контактируют друг с другом и конструктивными частями при граничных условиях 4-го рода
- На границе с теплоносителем или окружающей средой – граничные условия 3-го рода

Самое сложное – определить условия теплоотвода

- непосредственное охлаждение: перепад температур $\Delta\theta_\alpha = P / (\alpha S)$
- охлаждение через изоляцию: $\Delta\theta = \Delta\theta_\lambda + \Delta\theta_\alpha$
- теплопередача через несколько материалов $\Delta\theta = \Delta\theta_{\lambda_1} + \Delta\theta_{\lambda_2} + \Delta\theta_{\lambda_3} + \Delta\theta_\alpha$
- часто – несколько путей теплопередачи

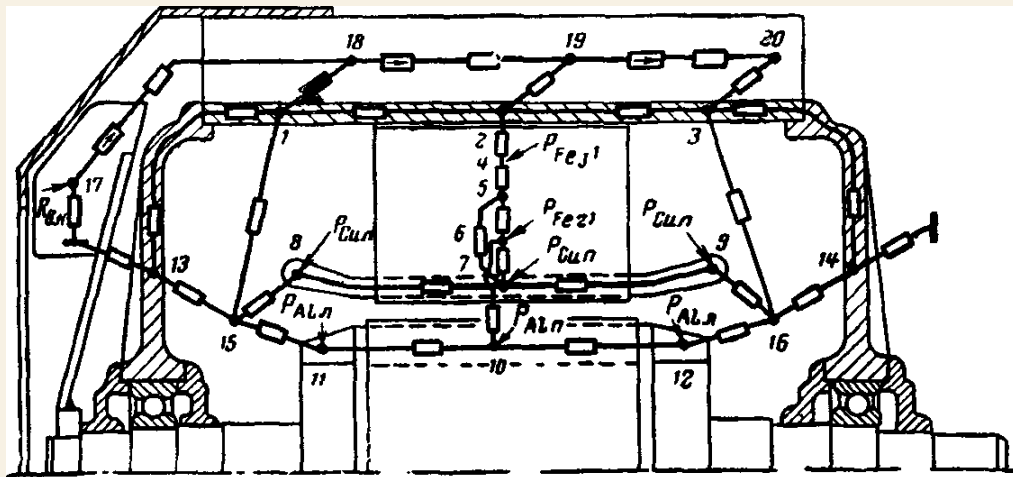
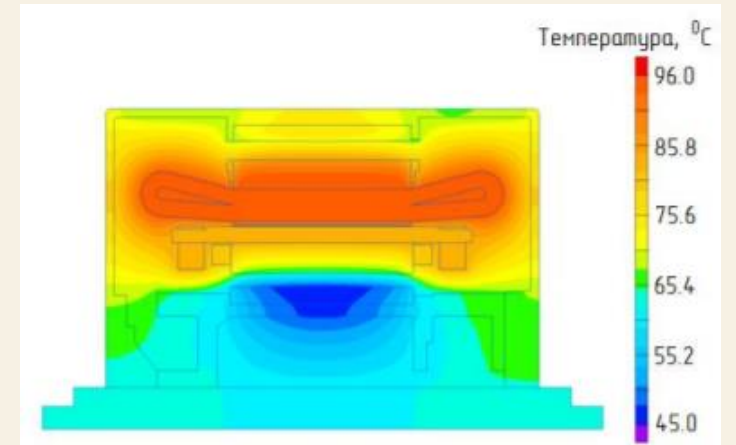
Методы расчетов температурных полей в ЭМ

Метод расчета тепловых полей (точно или приближенно)

- Аналитическое решение (для упрощенных задач)
- Численное решение

Метод одномерного температурного поля

- приведение многомерного поля к одномерному
- часто возможно аналитическое решение
- пример – расчет распределения температуры по длине обмотки / сердечника



Метод тепловых схем

- имитация реальных путей передачи тепловых потоков (тепловая сеть)
- использование тепловых сопротивлений для участков с равномерным потоком
- результат расчета – средние значения температур элементов схемы

Численный расчет температурного поля

Математическое описание поля

- магнитное $\nabla^2 A = -j\mu_0$
- электрическое $\nabla^2 \phi = -\rho / \epsilon_0$
- температурное $\nabla^2 \theta = -p_0 / \lambda$



Облако МЭИ

- ANSYS
- Elcut Pro
- Matlab
- MathCAD
- ...

- Магнитостатика
- Синусоидальное магнитное поле
- Нестационарное магнитное поле

- Стационарная теплопередача
- Нестационарная теплопередача

- Электростатика
- Электрическое поле постоянных токов
- Электрическое поле переменных токов
- Нестационарное электрическое поле

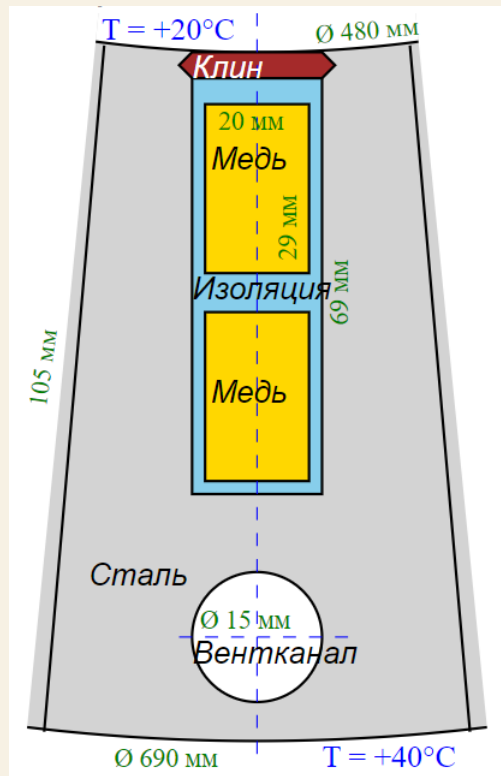
- Анализ упругих деформаций

- Связанные задачи

WMware → Облако МЭИ → Elcut
Передача файлов – USB drive

Численный расчет температурного поля

Пример: температурное поле в зубцовой зоне статора электродвигателя мощностью 500 кВт при включении в сеть, и после отключения



Плоско-параллельная задача нестационарной теплопередачи

Источники тепла – эл. потери в проводниках (объемная мощность тепловыделения – 360 000 Вт/м³)

Охлаждение – обдув в вент.канале, в зазоре и по наружной поверхности статора

Свойства материалов	λ (Вт/К·м)	c (Дж/кг·К)	ρ (кг/м ³)
Сталь	25	465	7833
Проводник	380	380	8950
Изоляция	0,15	1800	1300
Клин	0,25	1500	1400

Условия охлаждения	включен		выключен	
	α (Вт/К·м ²)	θ_0 (°C)	α (Вт/К·м ²)	θ_0 (°C)
Воздушный зазор	250	20	20	20
Поверхность статора	70	20	70	20
Вентиляц. канал	150	20	20	20



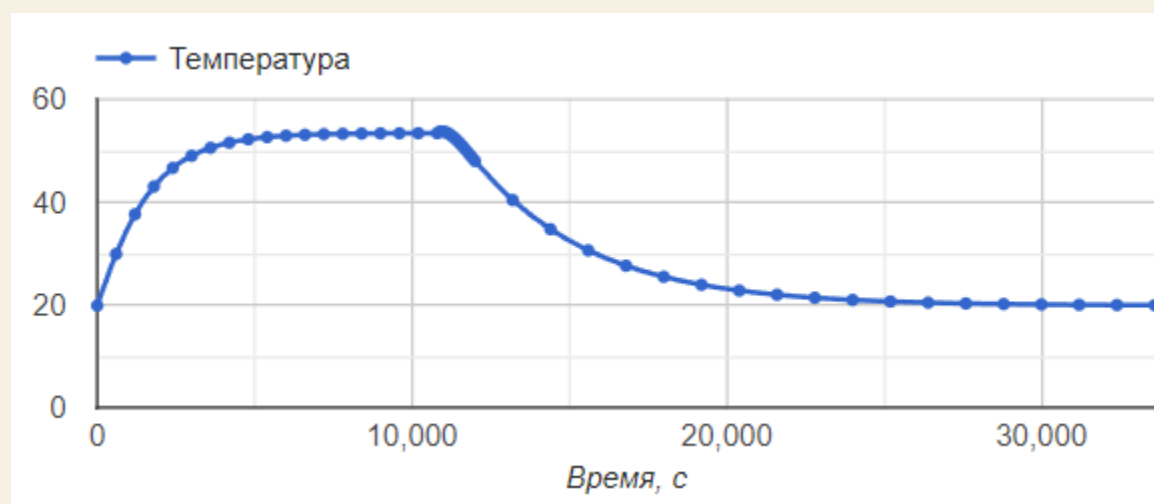
Численный расчет температурного поля

Пример: температурное поле в зубцовой зоне статора электродвигателя мощностью 500 кВт при включении в сеть, и после отключения

Решение:

- расчет переходного процесса нагрева от 20° до установившихся температур
- расчет переходного процесса охлаждения до установившихся температур

Результат:

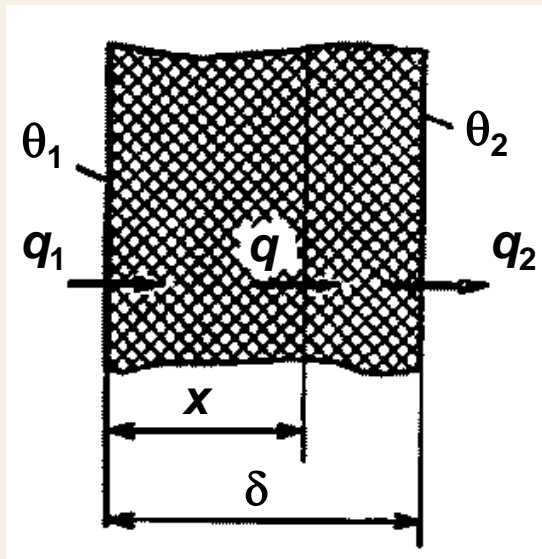


Время (с)	T (°C)	G (K/m)	Gx (K/m)	Gy (K/m)
0	44.3871	0.14187	-0.0055651	0.141761
1200	36.9228	0.106591	-7.47276e-4	0.106588
2400	32.1181	0.0798773	-5.01567e-4	0.0798757
3600	28.7368	0.0582935	-3.56503e-4	0.0582924
4800	26.3083	0.0422159	-2.56623e-4	0.0422151
6000	24.5562	0.0305125	-1.85233e-4	0.0305119

Расчет одномерного температурного поля

Одномерное поле – изменяется только по одной координате

Рассмотрим поле в плоской стенке



- внутри – равномерно распределенные источники теплоты p_0
- слева – входящий тепловой поток с плотность q_1 (гр.условия 2 рода)
- справа – задана температура θ_2 (гр.условия 1 рода)

Дифференциальное уравнение теплопроводности

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} = -\frac{p_0}{\lambda}$$

интегрируем: $\frac{\partial \theta}{\partial x} = -\frac{p_0}{\lambda} x + C_1$

интегрируем: $\theta = -\frac{p_0 x^2}{2\lambda} + C_1 x + C_2$

Постоянные находим из граничных условий

- на левой границе $x = 0$ $q_1 = -\lambda \left. \frac{\partial \theta}{\partial x} \right|_{x=0} = -\lambda C_1 \rightarrow C_1 = -\frac{q_1}{\lambda}$
- на правой границе $x = \delta$ $\theta_2 = -\frac{p_0}{2\lambda} \delta^2 - \frac{q_1}{\lambda} \delta + C_2 \rightarrow C_2 = \theta_2 + \frac{p_0}{2\lambda} \delta^2 + \frac{q_1}{\lambda} \delta$

Решение диф.уравнения

$$\theta = \frac{p_0}{2\lambda} (\delta^2 - x^2) + \frac{q_1}{\lambda} (\delta - x) + \theta_2$$

Плотность теплового потока

$$q = -\lambda \frac{d\theta}{dx} \rightarrow q = p_0 x + q_1$$

Расчет одномерного температурного поля

Для заданных граничных условий q_1 и θ_2 получили

Распределение температуры Плотность теплового потока

$$\theta = \frac{p_0}{2\lambda}(\delta^2 - x^2) + \frac{q_1}{\lambda}(\delta - x) + \theta_2 \quad q = -\lambda \frac{d\theta}{dx} \rightarrow q = p_0 x + q_1$$

Теперь можно определить:

Температура слева ($x = 0$)

Плотность теплового потока справа ($x = \delta$)

Связь θ_1 с θ_2 и q_1 с q_2

→ решение для любых ГУ

$$\theta_1 = \frac{p_0}{2\lambda} \delta^2 + \frac{q_1}{\lambda} \delta + \theta_2$$

$$q_2 = p_0 \delta + q_1$$

Если заданы только температуры θ_1 и θ_2 (гр.условия 1 рода)

Распределение температуры

Плотность теплового потока

$$\theta = \theta_1 \frac{\delta - x}{\delta} + \theta_2 \frac{x}{\delta} + \frac{p_0}{2\lambda} x(\delta - x) \quad q_1 = (\theta_1 - \theta_2) \frac{\lambda}{\delta} - \frac{p_0 \delta}{2} \quad q_2 = (\theta_1 - \theta_2) \frac{\lambda}{\delta} + \frac{p_0 \delta}{2}$$

Если слева q_1 , а справа теплоотвод с КТО α_2 и температурой среды θ_0

Из граничного условия $q_2 = \alpha_2(\theta_2 - \theta_0)$ выразим температуру θ_2

$$\theta_2 = \frac{q_2}{\alpha_2} + \theta_0 = \frac{p_0 \delta + q_1}{\alpha_2} + \theta_0 \quad \text{и подставим в общее решение, чтобы получить}$$

распределение температуры θ

Частный случай – плоская стенка без потерь

При $p_0 = 0$

Распределение температуры

Плотность теплового потока

$$\theta = \frac{q_1}{\lambda}(\delta - x) + \theta_2$$

$$q = q_1 = \text{Const}$$

Температура в стенке изменяется линейно

Перепад температур в стенке $\Delta\theta = \theta_1 - \theta_2 = q \frac{\delta}{\lambda}$

При равномерном распределении теплового потока Q через стенку площадью S

плотность теплового потока $q = \frac{Q}{S}$ и перепад температур $\Delta\theta = \frac{Q\delta}{\lambda S}$

Т.е. перепад температур зависит от размеров и материала стенки

(и пропорционален Q)

$$\Delta\theta = QR_\lambda$$

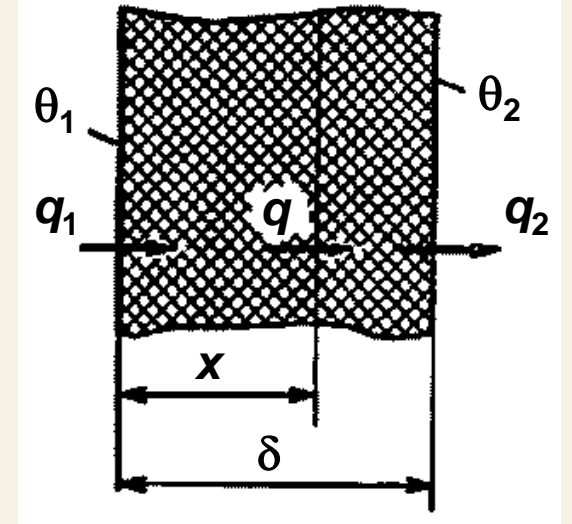
где R_λ – тепловое сопротивление $R_\lambda = \frac{\delta}{\lambda S}$

Прямая аналогия:

- $R_\lambda \rightarrow$ электрическое сопротивление
- $Q \rightarrow$ электрический ток
- $\theta \rightarrow$ электрический потенциал
- $\Delta\theta \rightarrow$ падение напряжения

Закон Ома для тепловой цепи

$$Q = \frac{\Delta\theta}{R_\lambda} = \frac{\theta_1 - \theta_2}{R_\lambda}$$

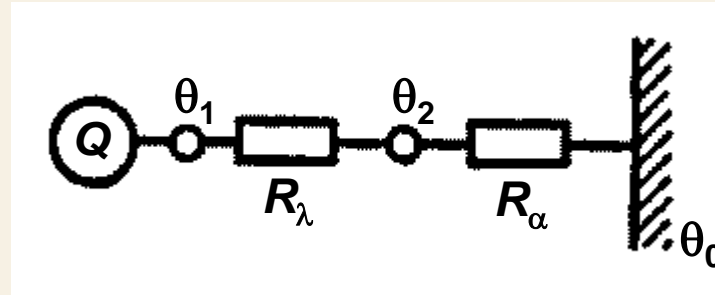
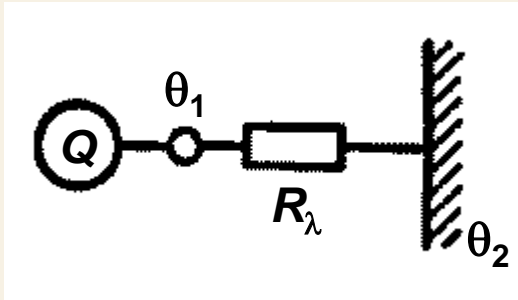


Тепловая схема плоской стенки без потерь

Исходя из прямой аналогии (электро- и тепло-) составим эквивалентную схему замещения (стенка без источника теплоты p_0)

а) гранич. условия 1 рода (θ_2)

б) гранич. условия 2 рода (α_2)



Здесь тепловой поток в виде источника тока \rightarrow схема может быть не замкнутой

Из закона Ома при заданной θ_2

$$\theta_1 = QR_\lambda + \theta_2$$

где тепловое сопротивление теплопроводности

$$R_\lambda = \frac{\delta}{\lambda S}$$

В случае теплоотдачи к среде с θ_0 можно записать

$$\theta_1 = Q(R_\lambda + R_\alpha) + \theta_0$$

где тепловое сопротивление теплоотдачи

$$R_\alpha = \frac{\theta_2 - \theta_0}{Q} = \frac{1}{S\alpha_2}$$

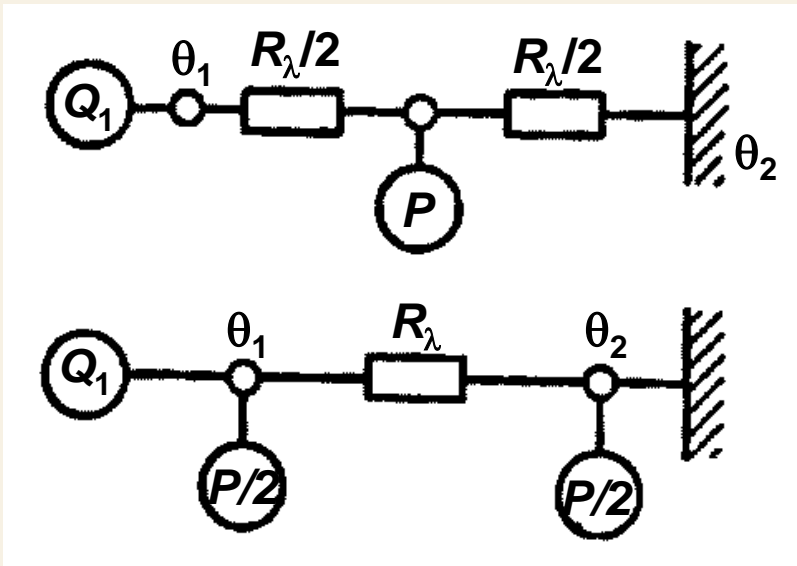
Тепловая схема плоской стенки с собственными потерями

График изменения температуры в стенке:

1. есть q_1 , но нет p_0 ($= 0$)
2. нет $q_1 = 0$, но есть p_0
3. общий случай q_1 и p_0
4. При $q_1=0$, одинаковых $\theta_1 = \theta_2$ и наличии p_0

Выразим общую мощность тепловых потерь в стенке $P = p_0 V = p_0 S \delta$

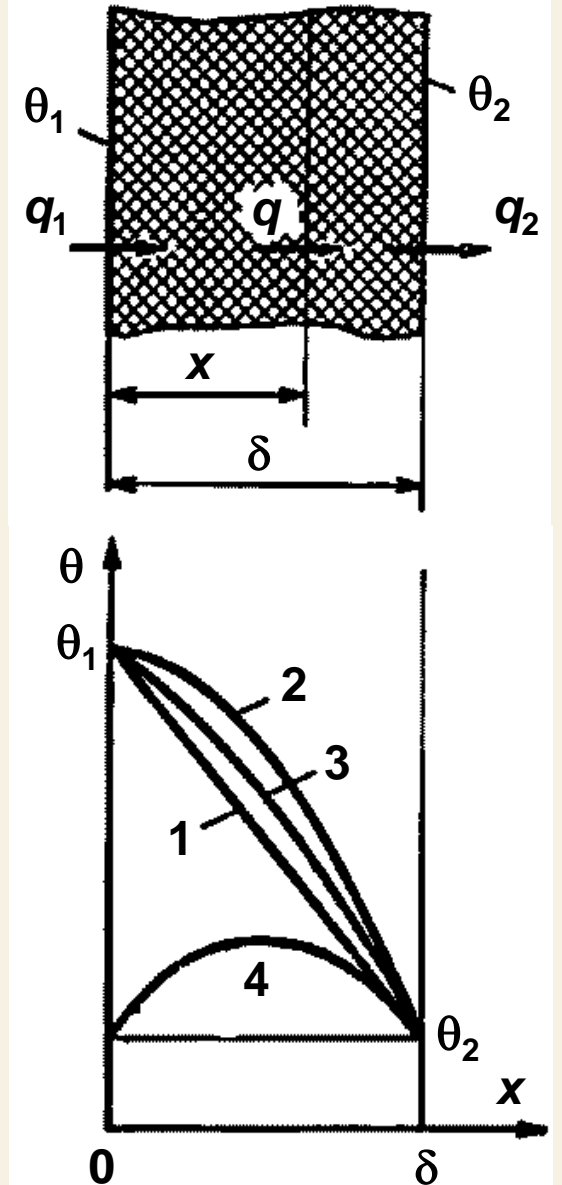
Тогда при входящем потоке слева $Q_1 = q_1 S$
 перепад температур в стенке $\Delta\theta = \theta_1 - \theta_2 = \frac{P}{2\lambda S \delta} \delta^2 + \frac{Q_1}{\lambda S} \delta = P \frac{R_\lambda}{2} + Q_1 R_\lambda$



Чему соответствует любая из двух схем замещения

По схеме замещения находят θ_1 и θ_2
 Распределение θ внутри стенки

$$\theta = \theta_1 \left(1 - \frac{x}{\delta}\right) + \theta_2 \frac{x}{\delta} + P \frac{R_\lambda}{2} \frac{x}{\delta} \left(1 - \frac{x}{\delta}\right)$$



Многослойная стенка без собственных источников теплоты

Рассмотрим три слоя разных материалов (с разными λ)
без собственных источников теплоты p_0

Тепловой поток Q последовательно проходит через 3 стенки,
чему соответствует тепловая схема с последовательным
соединением тепловых сопротивлений

$$R_1 = \frac{\delta_1}{\lambda_1 S} \quad R_2 = \frac{\delta_2}{\lambda_2 S} \quad R_3 = \frac{\delta_3}{\lambda_3 S}$$

(соответствует граничным условиям 4 рода)

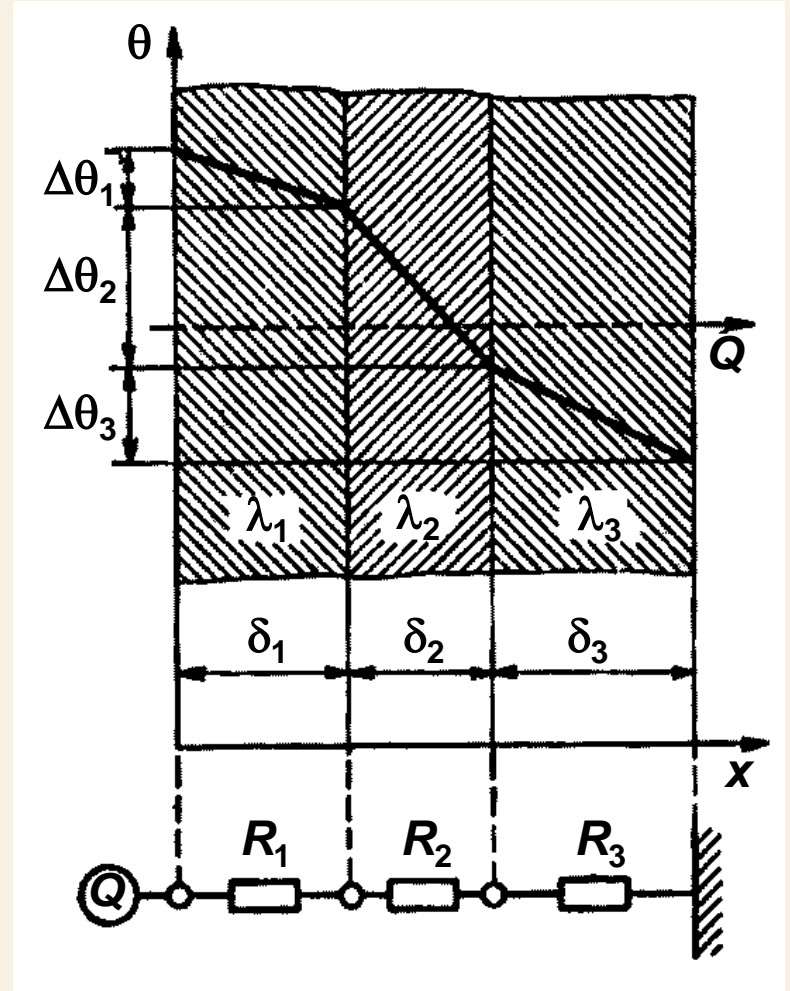
Общий перепад температур $\Delta\theta = \Delta\theta_1 + \Delta\theta_2 + \Delta\theta_3 = Q(R_1 + R_2 + R_3)$

$$= \frac{Q}{S} \left(\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} \right) = \frac{Q}{S} \frac{\delta_1 + \delta_2 + \delta_3}{\lambda_{\text{ЭКВ}}}$$

где эквивалентный (средний)
коэффициент теплопроводности
многослойной стенки

$$\lambda_{\text{ЭКВ}} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i}}{\sum_{i=1}^n \delta_i}$$

Тепловая
схема
замещения

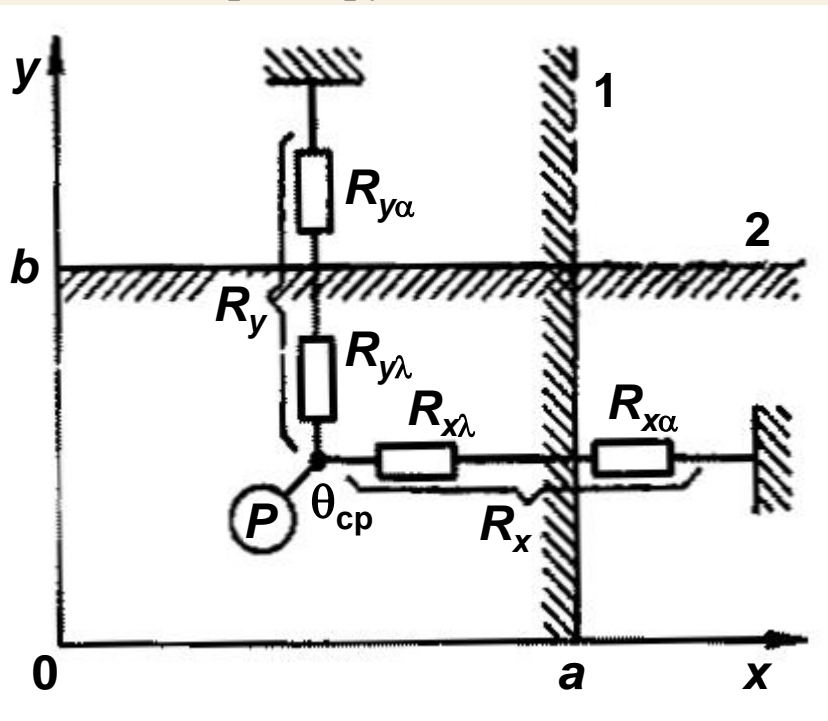


Тепловая схема при двухмерном поле

Принцип приближенного расчета двухмерного поля (Р.Зодерберг, 1931):

- основное допущение $\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} = \text{Const}$, $\frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} = \text{Const}$, тогда диф.уравнение $\nabla^2 \theta = -p_0 / \lambda$ распадается на два обыкновенных с известными решениями
(в которых распределенные источники теплоты $p_{0x} + p_{0y} = p_0$)

Рассмотрим брус с источниками теплоты p и симметричными условиями охлаждения,



но разными α_x , α_y и λ_x , λ_y (на рисунке один квадрант размером $a \times b$)

По каждой оси решение известно, как и схема замещения

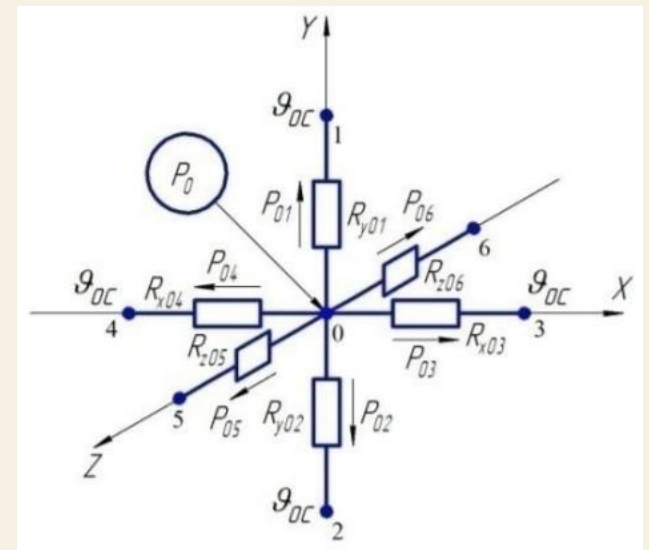
Для двумерной области – комбинация схем замещения по осям x и y

Источник теплоты $P = p_0 a b l$

Тогда средняя температура в узле

$$\theta_{\text{ср}} = P \frac{R_x R_y}{R_x + R_y}$$

Аналогичный подход применим и к трехмерному полю



Тепловые схемы электрических машин

Цилиндрические обмотки трансформатора

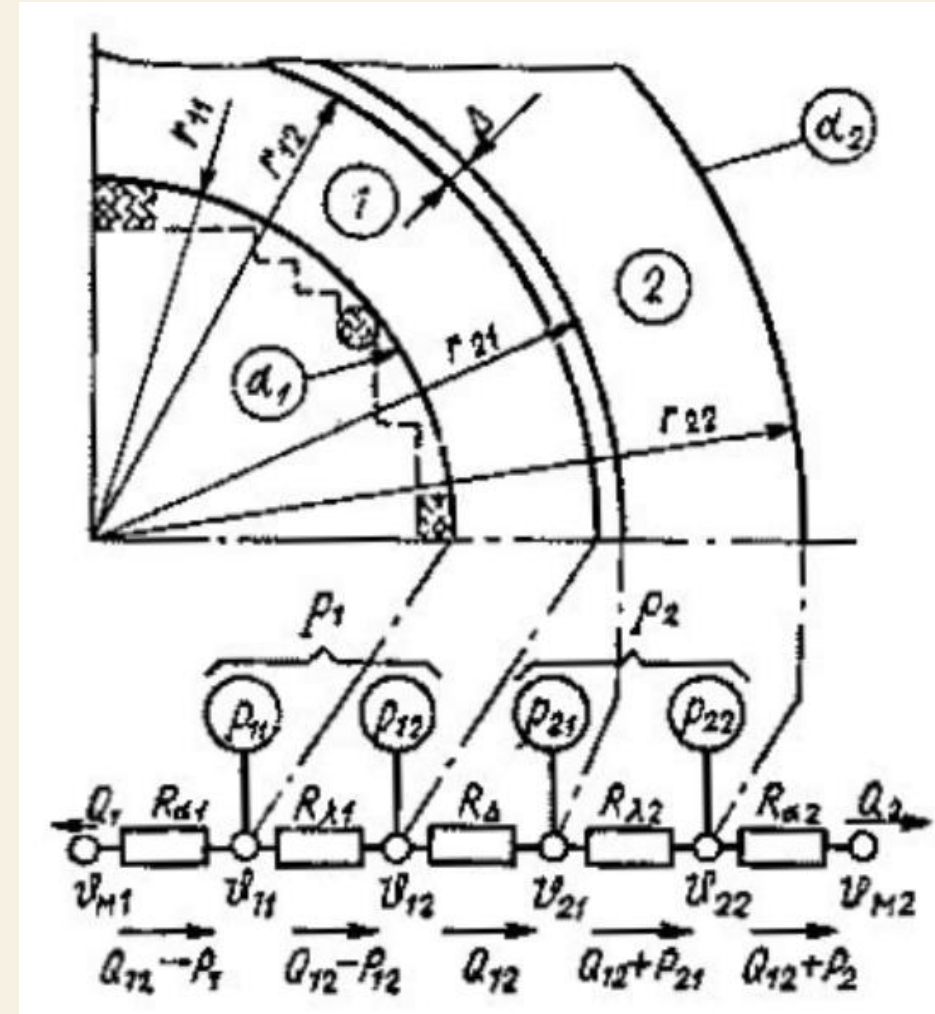
- 1 – катушка низкого напряжения
- 2 – катушка высокого напряжения
- Изоляционный цилиндр между ними

Теплоотдача к маслу

- с внутренней поверхности 1
- с внешней поверхности 2

Тепловое поле одномерное (радиальное)

Тепловая схема (заданы температуры масла внутри θ_{m1} и снаружи θ_{m2})



Тепловые схемы электрических машин

Статор машины переменного тока

Охлаждение

- наружная поверхность
- аксиальные каналы (а)
- радиальные каналы (р)
- зазор

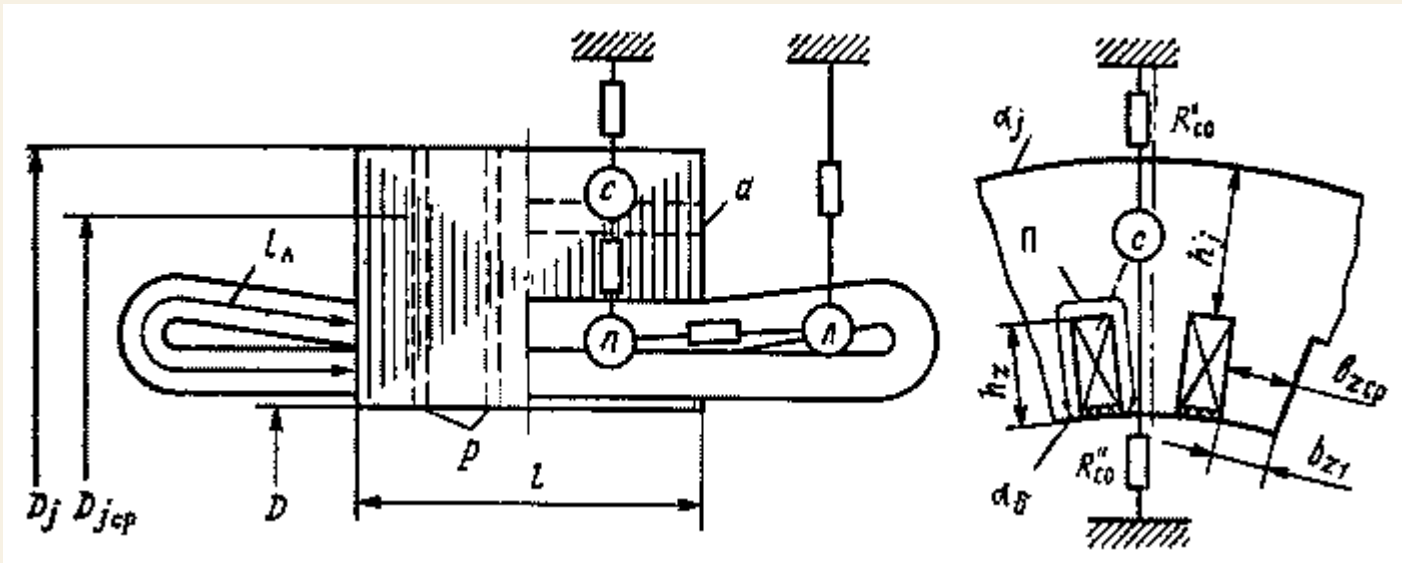
Однородные элементы

- пазовая часть обмотки
- лобовая часть обмотки
- сердечник

$$P_{\pi} = P_{M1} \frac{l}{l+l_{\pi}}$$

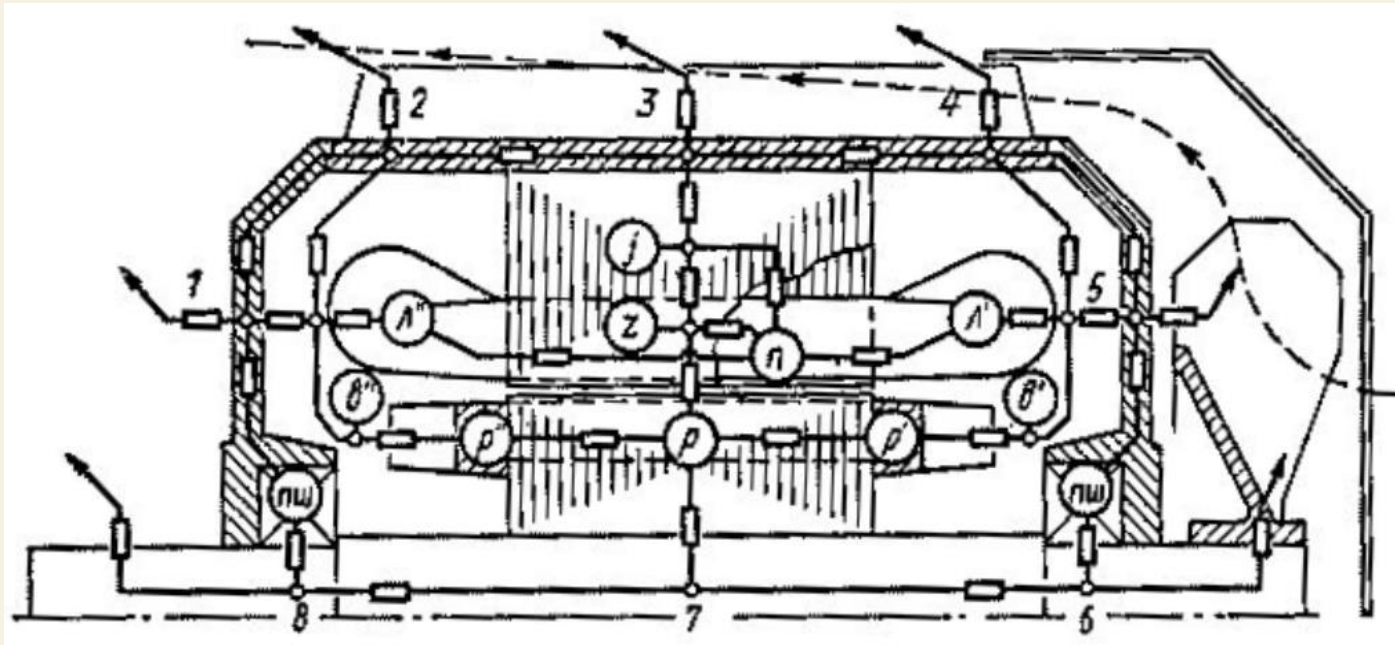
$$P_{\pi} = P_{M1} \frac{l_{\pi}}{l+l_{\pi}} = P_{M1} - P_{\pi}$$

$$P_c = P_{cz} + P_{cj} + P_{доб}$$

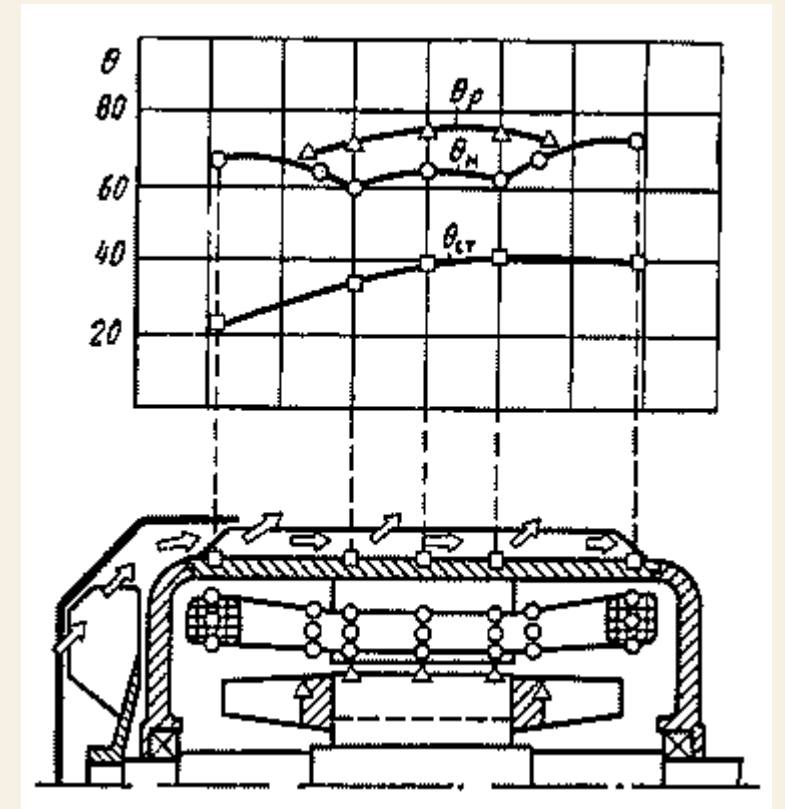


Тепловые схемы электрических машин

Асинхронный двигатель закрытого исполнения



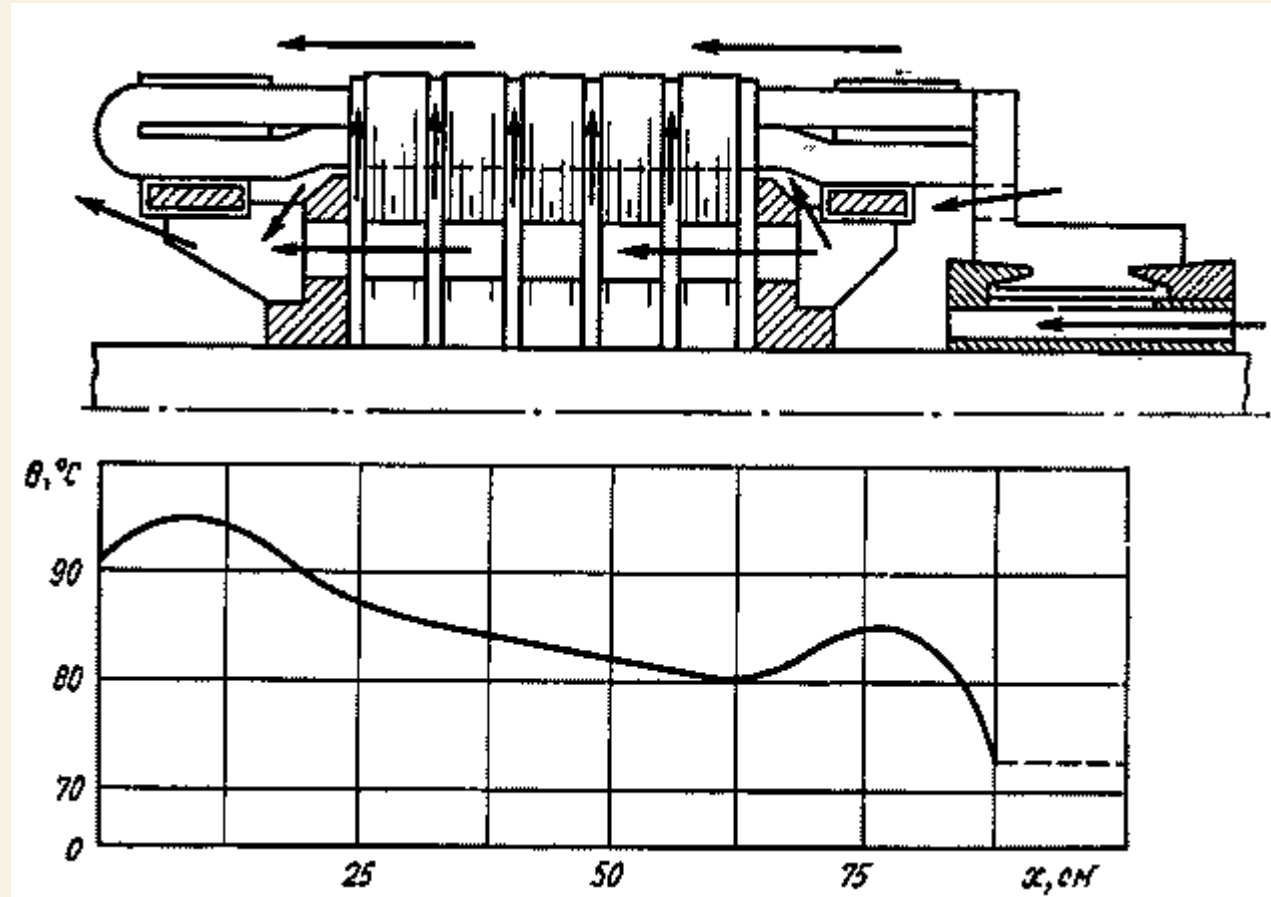
Статор: потери в зубцах и ярме, в пазовой и лобовых частях обмотки
Ротор: потери в роторе (нет изоляции обмотки) и КЗ кольцах
Вентиляционные потери и потери в подшипниках
Отвод тепла в окружающую среду



Превышения температур по длине машины

Тепловые схемы электрических машин

Машина постоянного тока с аксиально-радиальной вентиляцией



Продув охлаждающим воздухом:

- аксиальные каналы в коллекторе
- аксиальные каналы в сердечнике
- радиальные каналы в сердечнике
- поток воздуха в зазоре

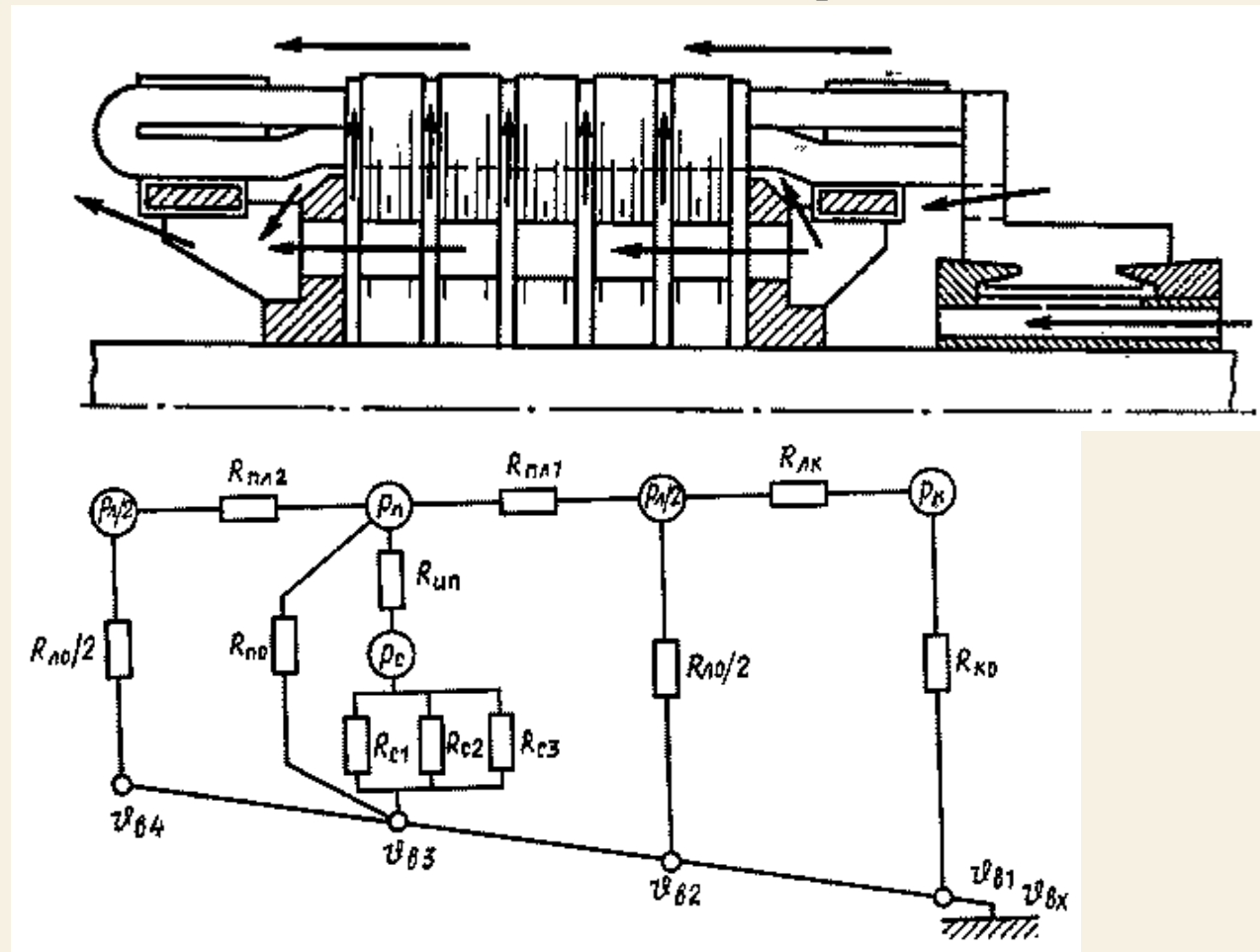
Превышение температуры в обмотке по длине машины

3 участка

- лобовые части справа
- пазовая часть
- лобовые части слева

Тепловые схемы электрических машин

Машина постоянного тока с аксиально-радиальной вентиляцией



Тепловая схема замещения обмотки
Потери

- в коллекторе, в пазовой части, в лобовых частях, потери в сердечнике

Теплопередача

- вдоль обмотки к лобовым частям
- от пазовой части обмотки к сердечнику

Теплоотдача к потоку воздуха

- $R_{\text{ко}}$ – от коллектора
- $R_{\text{ло}}$ – от лобовых частей
- $R_{\text{но}}$ – от пазовой части в каналах
- $R_{\text{с}1}$ – от внешней поверхности сердечника
- $R_{\text{с}2}$ – от поверхности аксиальных каналов
- $R_{\text{с}3}$ – от поверхности радиальных каналов

Классическая теория нагрева однородного тела

Нагрев – нестационарный тепловой режим

Однородное тело – ЭМ или ее часть (статор, якорь, ...) при некоторых допущениях

Рассмотрим процесс нагрева тела

- с собственным тепловыделением мощностью P
- отдающего тепло с поверхности S при коэффициенте теплоотдачи α
- имеющего большую теплопроводность (можно пренебречь $\Delta\theta$ внутри тела)
- имеющего массу M и теплопроводность c (тепловая инерция тела $c \cdot M$)

Теплота, выделяющаяся за время dt , Pdt расходуется на

- повышение собственного теплосодержания тела $cMd\theta$
- отвод тепла к окружающей среде $\alpha S\theta dt$

Уравнение теплового баланса

$$Pdt = cMd\theta + \alpha S\theta dt$$

или

$$\frac{d\theta}{dt} + \frac{\alpha S}{cM} \theta = \frac{P}{cM}$$

Дифференциальное уравнение нестационарного теплового режима

Классическая теория нагрева однородного тела

Дифференциальное уравнение нестационарного теплового режима $\frac{d\theta}{dt} + \frac{\alpha S}{cM} \theta = \frac{P}{cM}$

Запишем в виде $\frac{d\theta}{dt} + \frac{\theta}{T} = \frac{\theta_\infty}{T}$

где $T = \frac{cM}{\alpha S}$ – постоянная времени

$\theta_\infty = \frac{P}{\alpha S}$ – установившееся превышение температуры тела (при $t \rightarrow \infty$ $d\theta/dt \rightarrow 0$ и $\theta \rightarrow \theta_\infty$)

Используя переменную $\vartheta = \theta_\infty - \theta$ (свободная составляющая температуры), перепишем диф.уравнение в однородное диф.уравнение $\frac{d\vartheta}{dt} + \frac{\vartheta}{T} = 0$

Методом разделения переменных $\frac{d\vartheta}{\vartheta} = -\frac{dt}{T}$ получим решение в общем виде $\ln \vartheta = -\frac{t}{T} + C'$ $\vartheta = C e^{-\frac{t}{T}}$

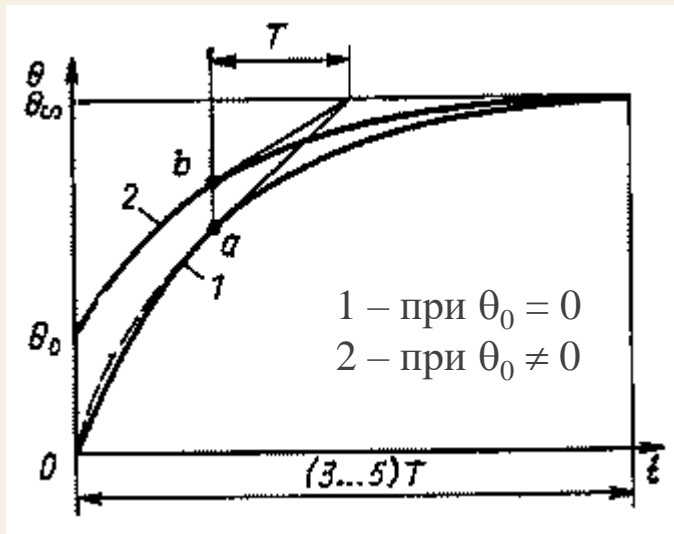
Постоянную C найдем из начальных условий: при $t = 0$ $\theta = \theta_0$, $\vartheta = \theta_\infty - \theta_0 = C$

Тогда превышение температуры тела $\theta = \theta_\infty - (\theta_\infty - \theta_0) e^{-\frac{t}{T}}$ или $\theta = \theta_\infty \left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right) + \theta_0 e^{-\frac{t}{T}}$

Классическая теория нагрева однородного тела

Решение уравнения нестационарного теплового режима

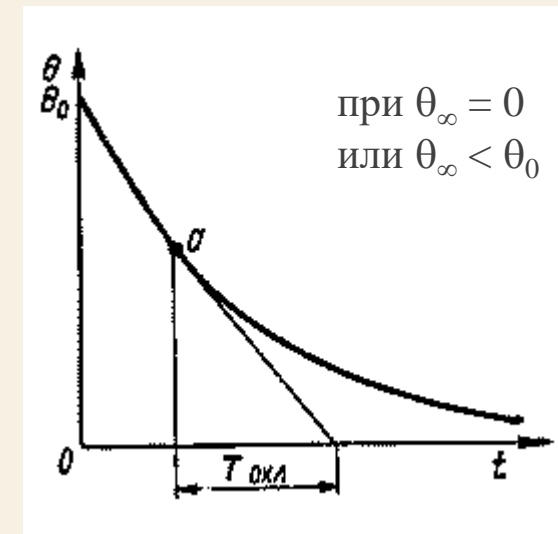
Изменение температуры при нагреве



- Через время $3T$ температура достигнет 95% от θ_∞
- Через время $4T$ температура достигнет 98,2% от θ_∞
- Через время $5T$ температура достигнет 99,3% от θ_∞

$$\theta = \theta_\infty \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right) + \theta_0 e^{-\frac{t}{T}}$$

Изменение температуры при охлаждении



Важно: при включенной ЭМ (идет нагрев) и выключенной ЭМ (охлаждение) коэффициенты теплоотдачи α разные (вентилятор работает или нет) → постоянная времени $T_{\text{охл.}}$ больше

Режимы работы электрических машин

Продолжительный режим S1

При номинальной нагрузке температура достигает установившегося значения
Рассчитывают как стационарный режим

Кратковременный режим S2

За время работы t_p (10, 30, 60, 90 мин) нагрев до θ_m ,
затем охлаждение до температуры окружающей среды

Максимальное превышение температуры

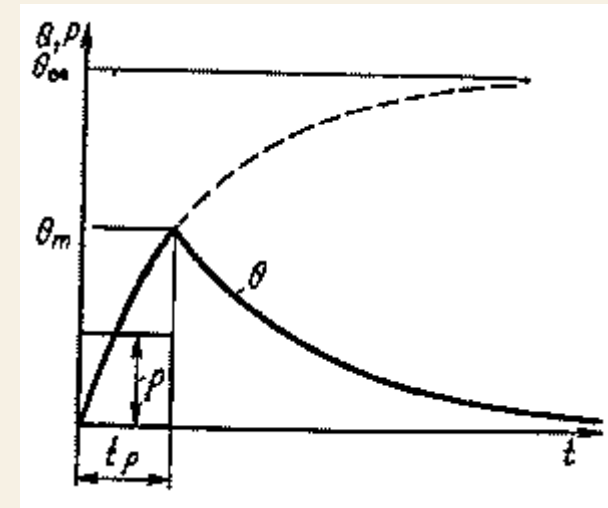
$$\theta_m = \theta_\infty \left(1 - e^{-\frac{t_p}{T}} \right)$$

Условие допустимого нагрева: θ_m не больше допустимой $\theta_{\text{доп}}$

Допустимые потери в режиме S2 определяются θ_∞ , допустимые потери в режиме S1 определяются $\theta_{\text{доп}}$

Соотношение допустимых потерь при S2 и S1

$$\frac{P_{S2}}{P_{S1}} = \frac{\theta_\infty}{\theta_{\text{доп}}} = \frac{1}{1 - e^{-\frac{t_p}{T}}} > 1$$

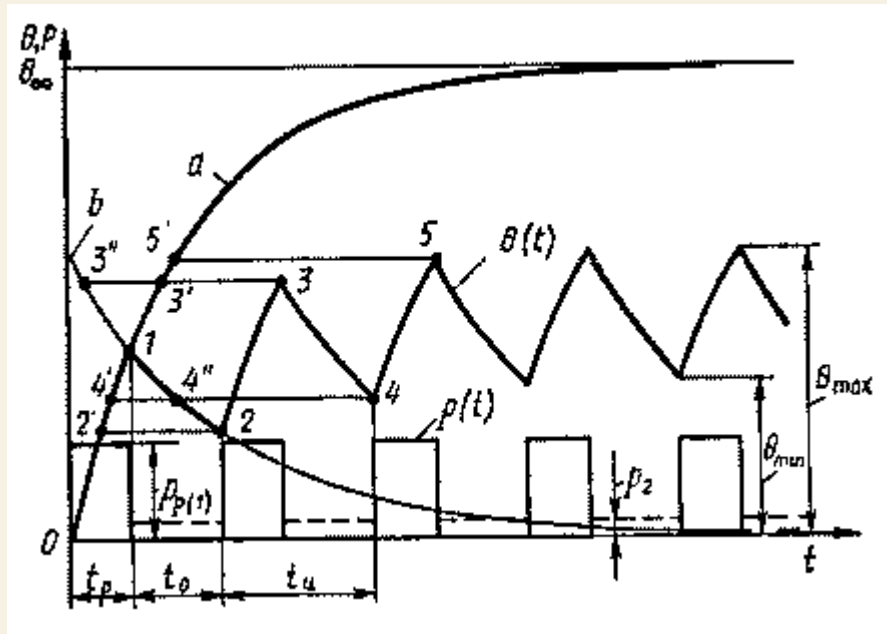


Режимы работы электрических машин

Повторно-кратковременный режим S3

Периодический режим: время цикла $t_{\text{ц}} = \text{время работы } t_p + \text{время паузы } t_0$

Продолжительность включения ПВ% = $(t_p/t_{\text{ц}}) \cdot 100\%$ (15%, 25%, 40%, 60% при $t_{\text{ц}} = 60$ мин)



a – основная кривая нагрева (с постоянной времени T)

b – основная кривая охлаждения (с $T_{\text{охл}} > T$)

После $1,5 \dots 2,5 t_{\text{ц}}$ – установившийся характер изменения θ

между $\theta_{\text{max}} = \theta_{\infty} \left(1 - e^{-\frac{t_p}{T}} \right) + \theta_{\text{min}} e^{-\frac{t_p}{T}}$ и $\theta_{\text{min}} = \theta_{\text{max}} e^{-\frac{t_0}{T_{\text{охл}}}}$

Т.е. максимальный нагрев $\theta_{\text{max}} = \theta_{\infty} \frac{1 - e^{-\frac{t_p}{T}}}{1 - e^{-\frac{t_p}{T}} e^{-\frac{t_0}{T_{\text{охл}}}}$

Тогда соотношение допустимых потерь при S3 и S1

$$\frac{P_{S3}}{P_{S1}} = \frac{1 - e^{-\left(\frac{t_p}{T} + \frac{t_0}{T_{\text{охл}}}\right)}}{1 - e^{-\frac{t_p}{T}}} > 1$$

Выбранный метод расчета должен быть адекватен поставленной задаче

Спасибо за внимание