Методы анализа электрических машин

Процесс теплопередачи и температурное поле

МА-06

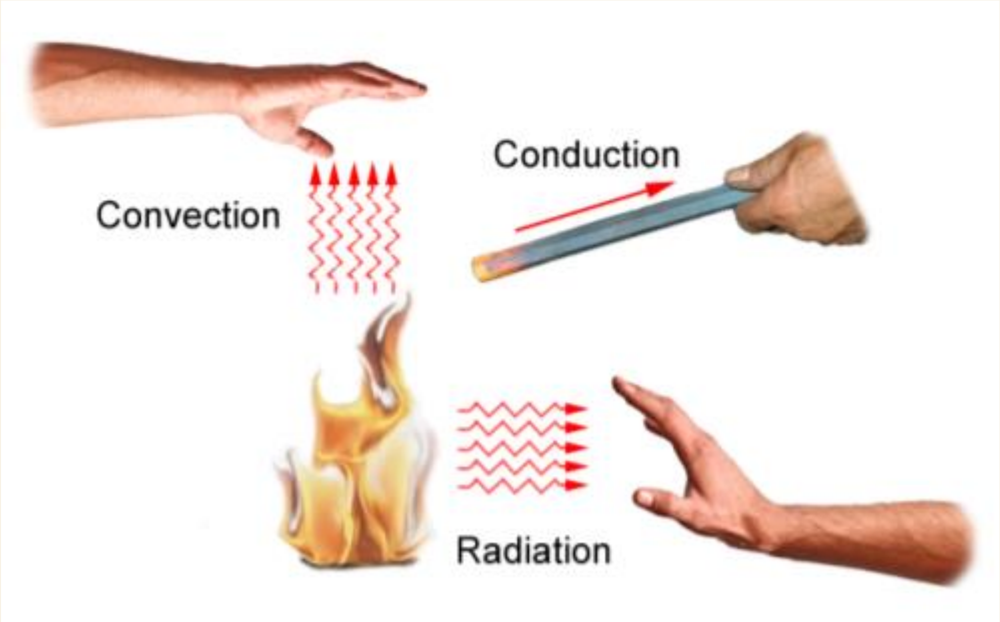
2023

Основные процессы передачи теплоты

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

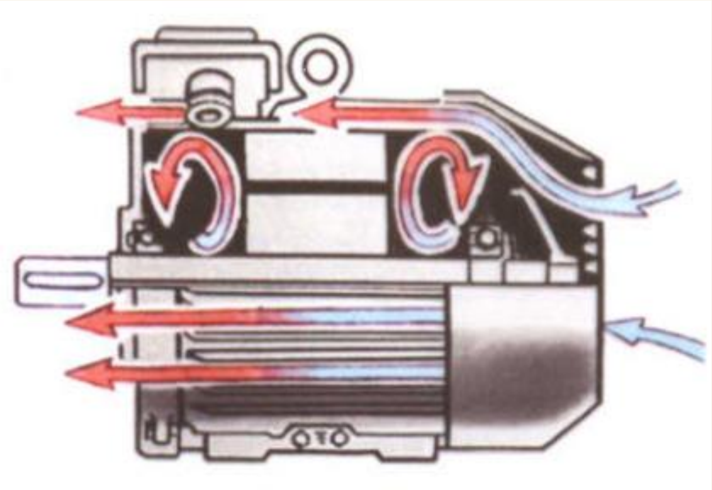
Виды теплообмена:

- 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)



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

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

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 1м^2 при $\Delta\theta = 1°$
Электрические машины:

- воздушное охлаждение
  - естественное: α = 8…20 Вт/м^2·°С
  - форсированное: α = десятки…сотни
- водяное охлаждение: α > тысячи

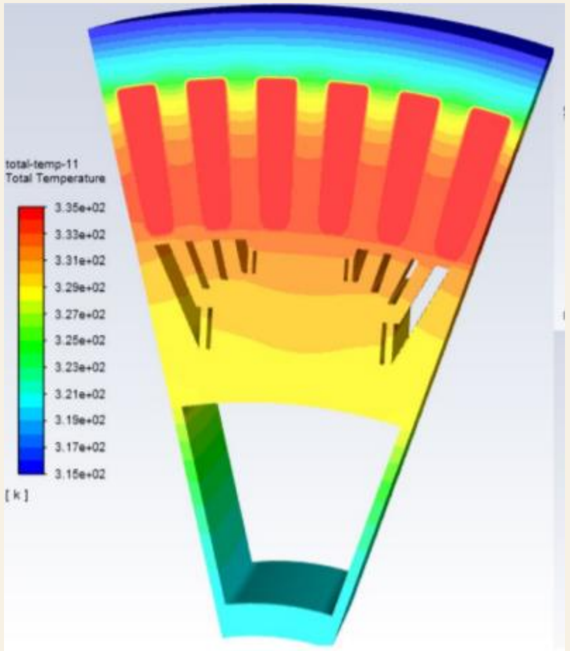
Тепловые, гидравлические и аэродинамические расчеты в электрических машинах. Г.А.Сипайлов, Д.И.Санников, В.А.Жадан. – М.: Высш.шк., 1989

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

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

или относительно нормали к поверхности

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

Теплопроводность в твердом теле

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

Закон Фурье для теплопроводности:

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

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

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

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

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

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

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

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

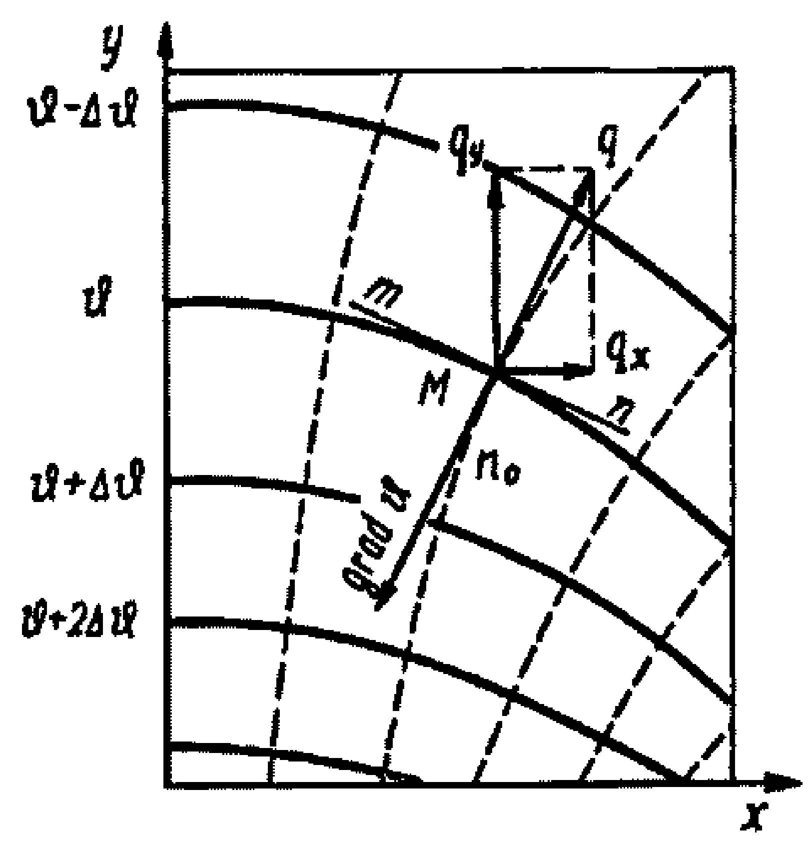
Вектор плотности теплового потока для изотропной среды

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

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

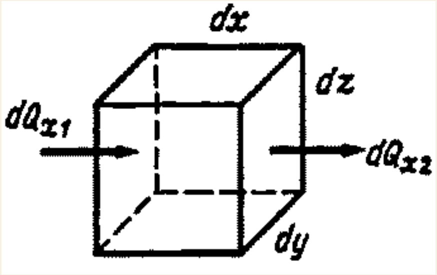
В векторном поле $\boldsymbol{q}(x,y,z)$ поверхностный интеграл $Q_S = \int_S (q \cdot n_s)\, dS$ равен потоку вектора $\boldsymbol{q}$ через поверхность *S*

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 $\boldsymbol{q}$, 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 $dQ_{x1} = -\lambda \dfrac{\partial\theta}{\partial x} dydz$
- вытекающий тепловой поток $dQ_{x2} = -\lambda \left(\dfrac{\partial\theta}{\partial x} + \dfrac{\partial}{\partial x}\left(\dfrac{\partial\theta}{\partial x}\right) dx \right) dydz$
- всего по оси x $dQ_x = dQ_{x1} - dQ_{x2} = -\lambda \left(\dfrac{\partial\theta}{\partial x} - \dfrac{\partial\theta}{\partial x} - \dfrac{\partial^2\theta}{\partial x^2} dx \right) dydz = \lambda \dfrac{\partial^2\theta}{\partial x^2} dxdydz = \lambda \dfrac{\partial^2\theta}{\partial x^2} dV$
- аналогично по оси y $dQ_y = \lambda \dfrac{\partial^2\theta}{\partial y^2} dV$
- по оси z $dQ_z = \lambda \dfrac{\partial^2\theta}{\partial z^2} dV$
- 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/м^3]

Дифференциальное уравнение теплопроводности

Подставив тепловые потоки и сократив dV, получим дифференциальное уравнение теплопроводности

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

– 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)

$$\partial^2/\partial x^2+\partial^2/\partial y^2+\partial^2/\partial z^2=\Delta=\nabla^2$$

– оператор Лапласа

Тогда дифференциальное уравнение теплопроводности

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

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

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, $\theta_{\text{пов.}}$ = Const)
- ***Граничные условия 2-го рода*** – задание плотности теплового потока через поверхность тела (т.е. производной по нормали к поверхности $(\partial\theta/\partial n)_{\text{пов.}}$= 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 $q_{\text{пов.}} = -\lambda\left(\partial\theta/\partial n\right)_{\text{пов.}} = \alpha\left(\theta_{\text{пов.}} - \theta_0\right)$

  (здесь α - коэффициент теплоотдачи с поверхности, θ_0 – температура среды)

  получаем линейную зависимость температуры тела и ее производной $\left(\partial\theta/\partial n\right)_{\text{пов.}} = -\left(\alpha/\lambda\right)\left(\theta_{\text{пов.}} - \theta_0\right)$
- ***Граничные условия 4-го рода*** – для теплообмена между телами с разными коэф. теплопроводности λ

  Для обеспечения непрерывности теплового потока $\lambda_1\left(\partial\theta_1/\partial n\right)_{\text{пов.}} = \lambda_2\left(\partial\theta_2/\partial n\right)_{\text{пов.}}$

  (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

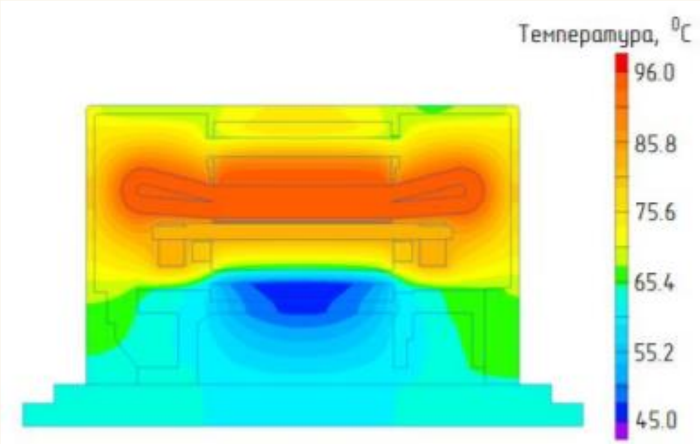
Результат расчета – температурные поля в наиболее нагретых частях ЭМ
чаще – средние температуры / превышения температур в отдельных частях

- 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

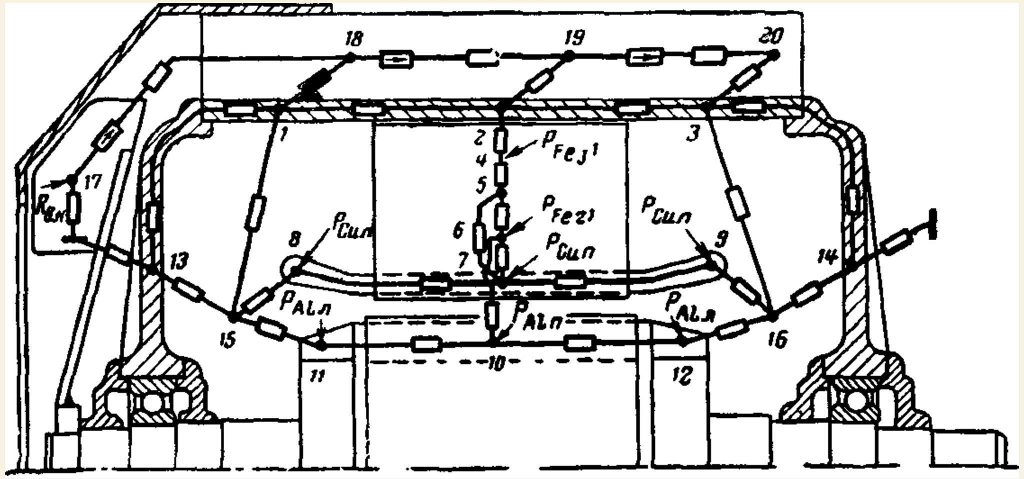


Метод расчета тепловых полей (точно или приближенно)

- Численное решение
- Аналитическое решение (для упрощенных задач)

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

Ширинский С.В., каф. ЭМЭЭА, НИУ "МЭИ"

Численный расчет температурного поля

Математическое описание поля

- магнитное $\nabla^2 A = -j\mu_0$
- электрическое $\nabla^2 \phi = -\rho / \varepsilon_0$
- температурное $\nabla^2 \theta = -p_0 / \lambda$

ELCUT

- Магнитостатика
- Синусоидальное магнитное поле
- Нестационарное магнитное поле

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

- Стационарная теплопередача
- Нестационарная теплопередача

- Анализ упругих деформаций

- Связанные задачи

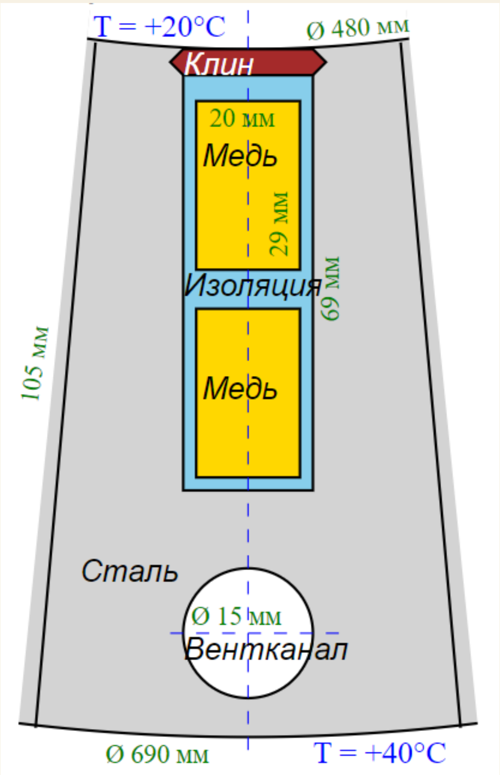
Облако МЭИ

- ANSYS
- Elcut Pro
- Matlab
- MathCAD
- …

WMware $\rightarrow$ Облако МЭИ $\rightarrow$ 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/м^3)

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

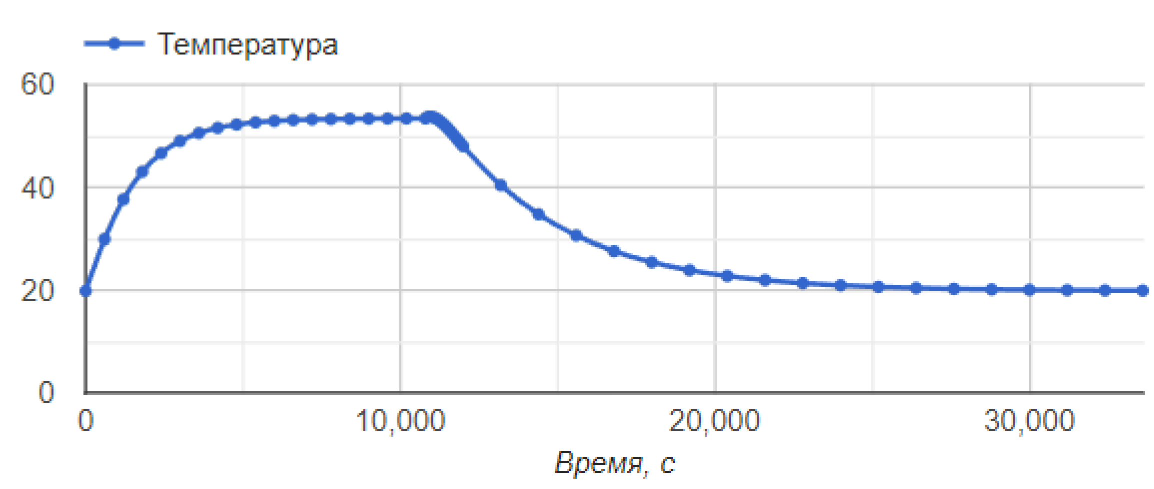
Численный расчет температурного поля

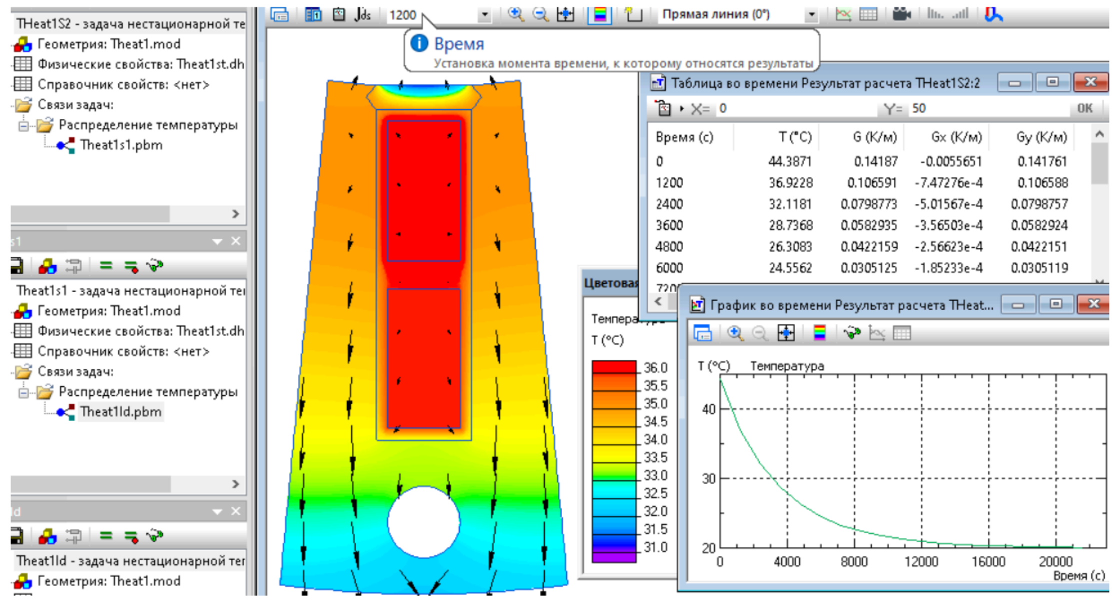
Пример: температурное поле в зубцовой зоне статора электродвигателя мощностью 500 кВт при включении в сеть, и после отключения

Решение:

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

Результат:

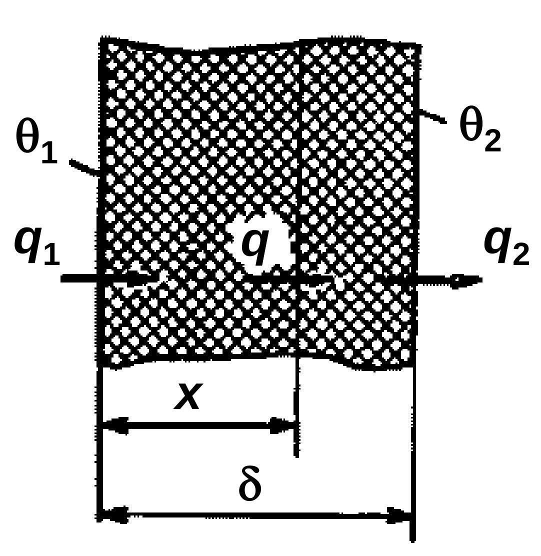




Расчет одномерного температурного поля

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

Решение диф.уравнения

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

Плотность теплового потока

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

Ширинский С.В., каф. ЭМЭЭА, НИУ "МЭИ"

Расчет одномерного температурного поля

Для заданных граничных условий q_1 и θ_2 получили

Распределение температуры

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

Плотность теплового потока

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

Теперь можно определить:

Температура слева (x = 0)

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

Плотность теплового потока справа (x = δ)

$$q_2 = p_0\delta + q_1$$

Связь θ_1 с θ_2 и q_1 с q_2
→ решение для любых ГУ

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

Распределение температуры

$$\theta = \theta_1\frac{\delta - x}{\delta} + \theta_2\frac{x}{\delta} + \frac{p_0}{2\lambda}x\left(\delta - x\right)$$

Плотность теплового потока

$$q_1 = \left(\theta_1 - \theta_2\right)\frac{\lambda}{\delta} - \frac{p_0\delta}{2} \qquad q_2 = \left(\theta_1 - \theta_2\right)\frac{\lambda}{\delta} + \frac{p_0\delta}{2}$$

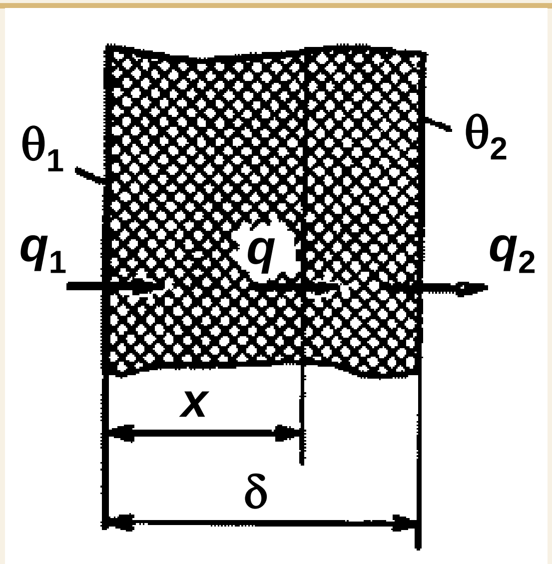
Если слева q_1, а справа теплоотвод с КТО α_2 и температурой среды θ_0

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

$$\theta_2 = \frac{q_2}{\alpha_2} + \theta_0 = \frac{p_0\delta + q_1}{\alpha_2} + \theta_0$$

и подставим в общее решение, чтобы получить
распределение температуры θ

Частный случай – плоская стенка без потерь



При $p_0 = 0$

Распределение температуры

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

Плотность теплового потока

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

Температура в стенке изменяется линейно

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

При равномерном распределении теплового потока Q через стенку площадью S

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

Т.е. перепад температур зависит от размеров и материала стенки (и пропорционален Q) $\Delta\theta = QR_\lambda$

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

Прямая аналогия:

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

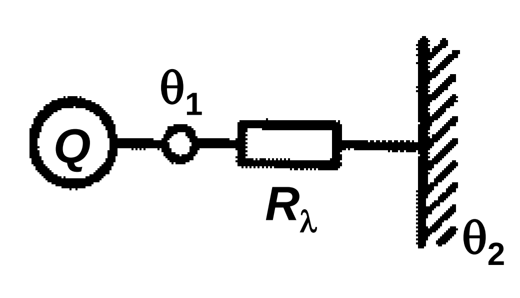
Закон Ома для тепловой цепи

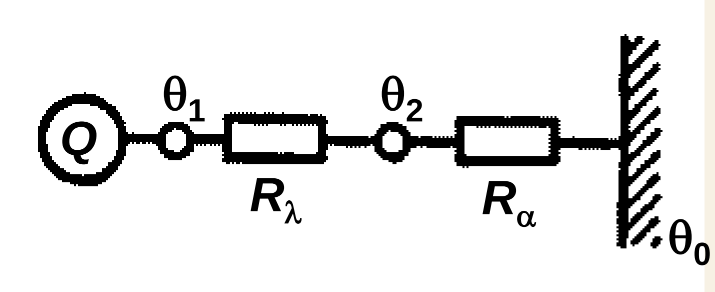
$$Q = \frac{\Delta\theta}{R_\lambda} = \frac{\theta_1 - \theta_2}{R_\lambda}$$

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 → 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

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

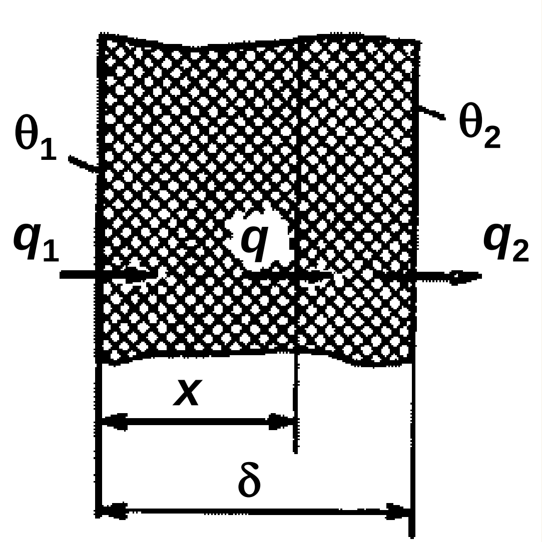
где тепловое сопротивление теплоотдачи

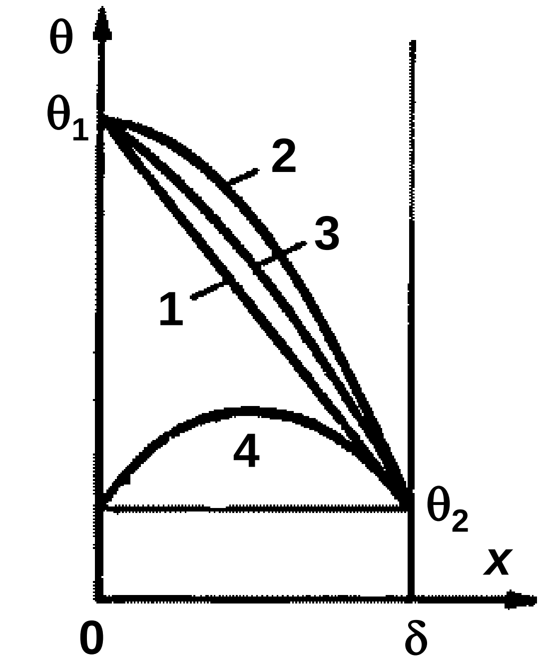
$$R_\alpha = \frac{\theta_2 - \theta_0}{Q} = \frac{1}{S\alpha_2}$$

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

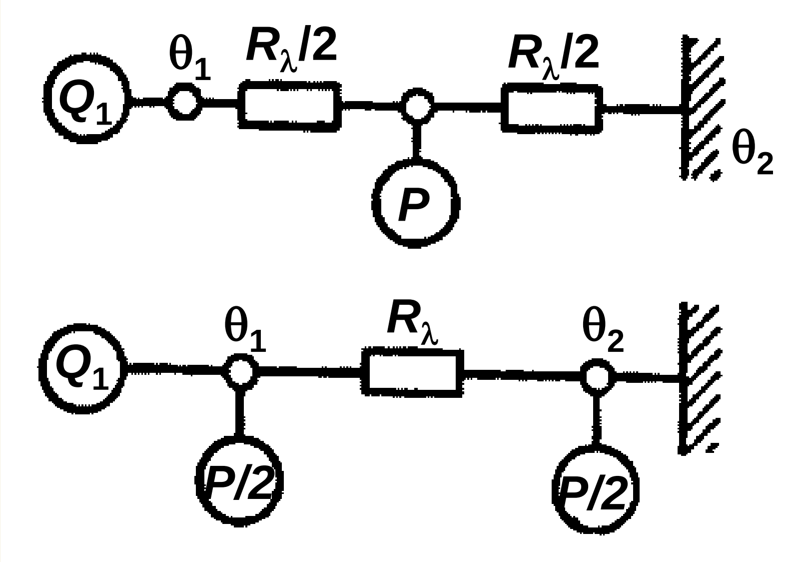




Выразим общую мощность тепловых потерь в стенке $P = p_0 V = p_0 S\delta$

Тогда при входящем потоке слева $Q_1 = q_1 S$

перепад температур в стенке $\Delta\theta = \theta_1 - \theta_2 = \dfrac{P}{2\lambda S\delta}\delta^2 + \dfrac{Q_1}{\lambda S}\delta = P\dfrac{R_\lambda}{2} + Q_1 R_\lambda$



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

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

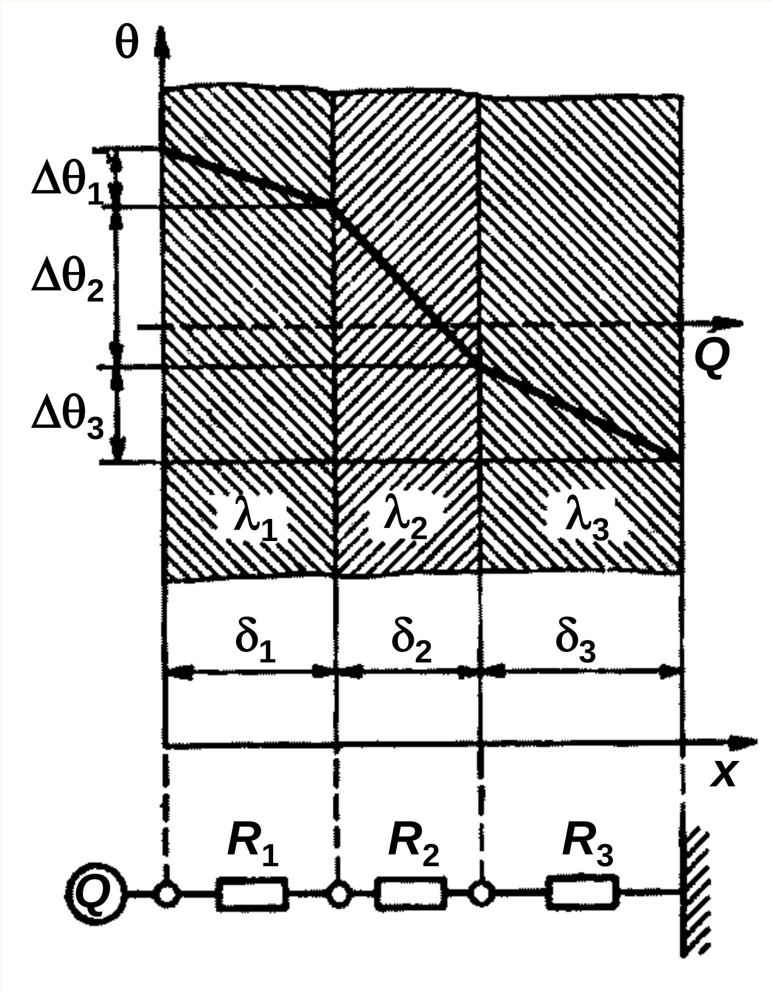
(соответствует граничным условиям 4 рода)

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

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

где эквивалентный (средний) коэффициент теплопроводности многослойной стенки

$$\lambda_{\text{экв}} = \frac{\sum\limits_{i=1}^{n} \dfrac{\delta_i}{\lambda_i}}{\sum\limits_{i=1}^{n} \delta_i}$$



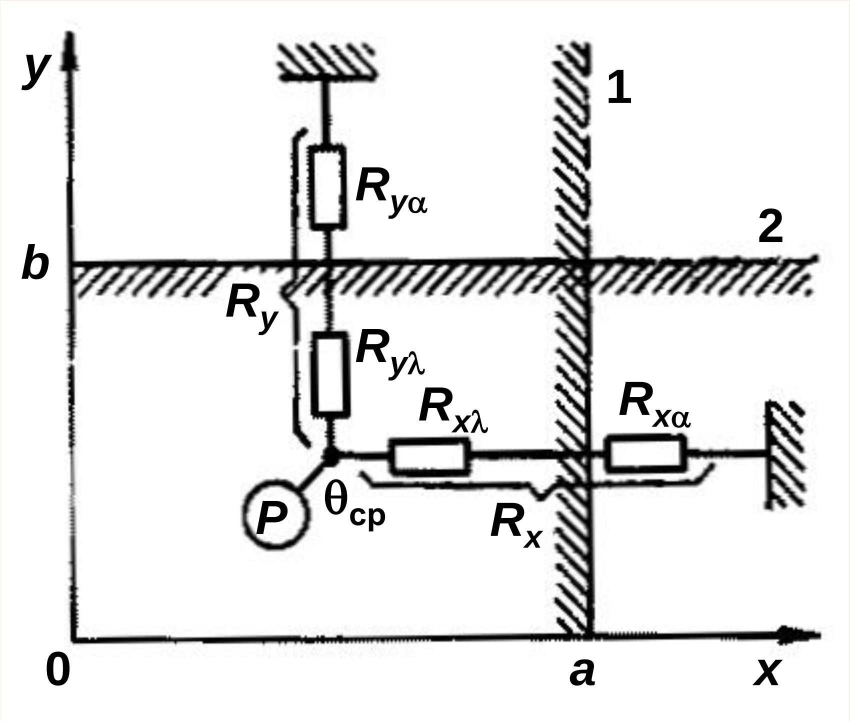
Тепловая схема замещения

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 $a \times b$)



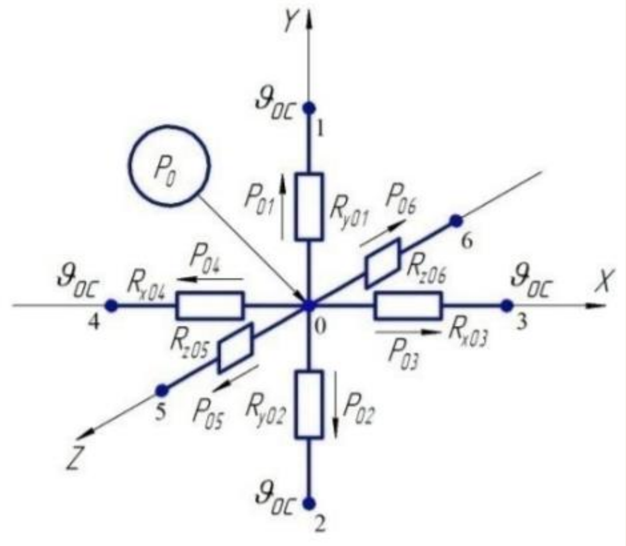
По каждой оси решение известно, как и схема замещения

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

Источник теплоты $P = p_0abl$

Тогда средняя температура в узле

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



Аналогичный подход применим и к трехмерному полю

Ширинский С.В., каф. ЭМЭЭА, НИУ "МЭИ"

Тепловые схемы электрических машин

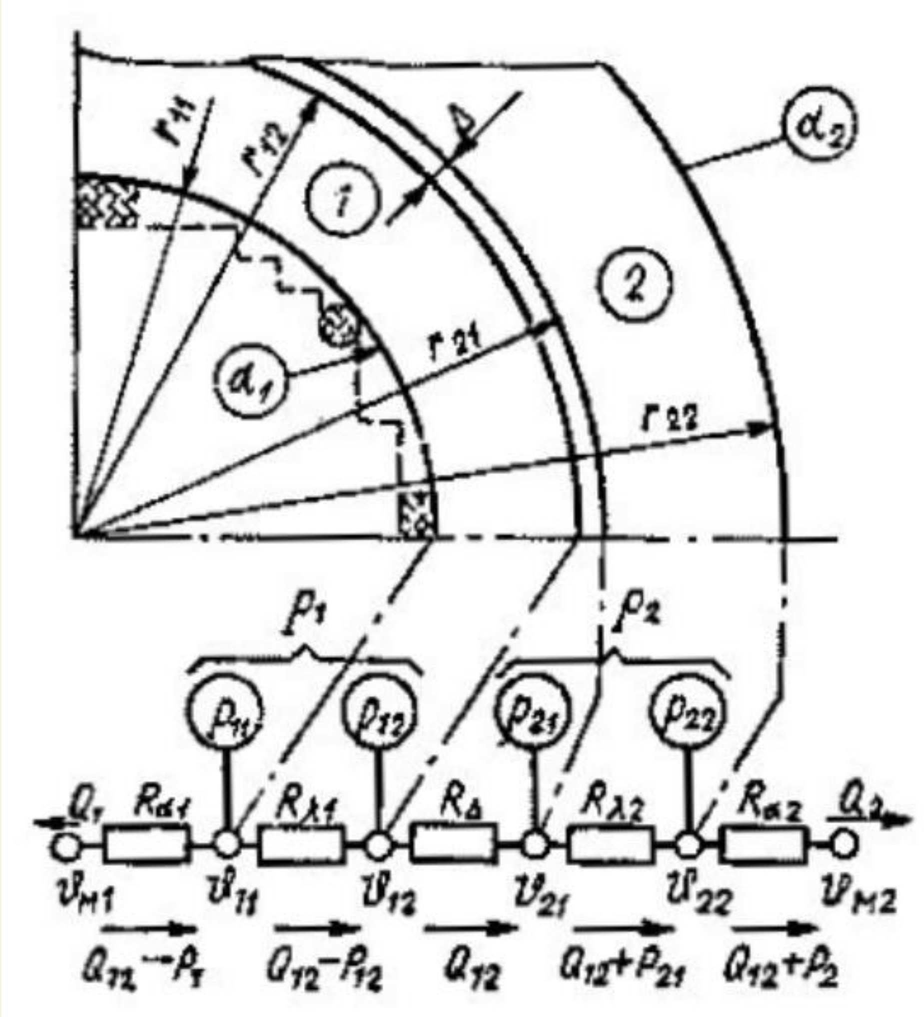
Цилиндрические обмотки трансформатора

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 $\theta_{м1}$ и снаружи $\theta_{м2}$)



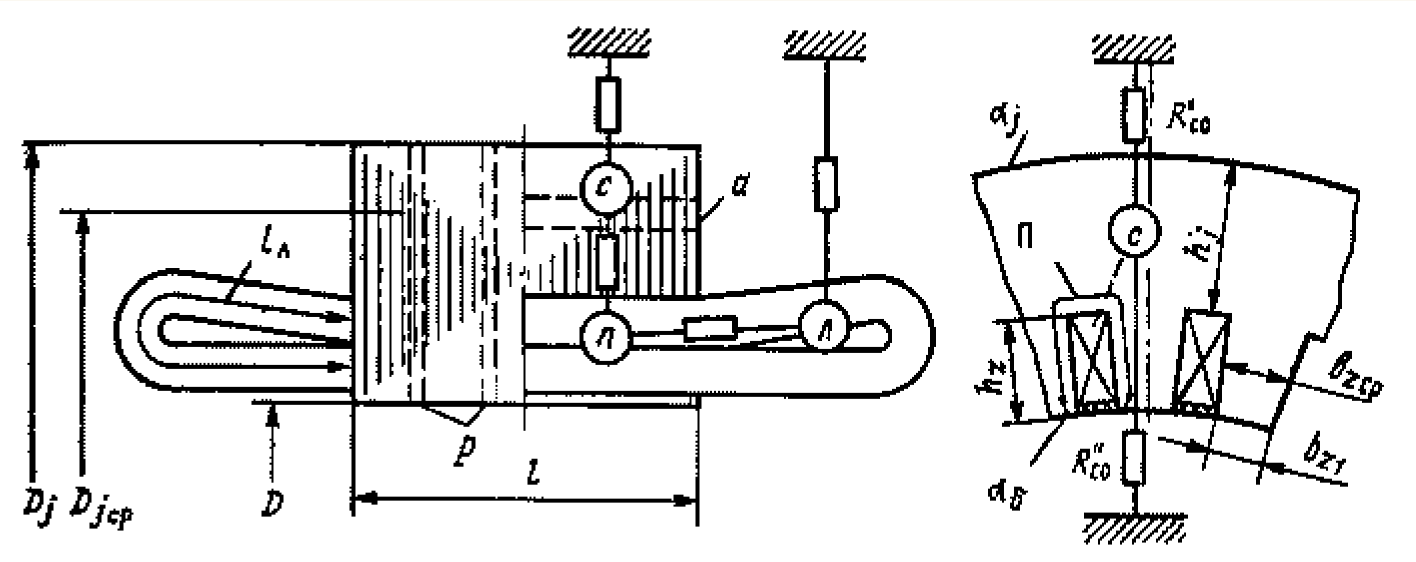
Тепловые схемы электрических машин

Статор машины переменного тока

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

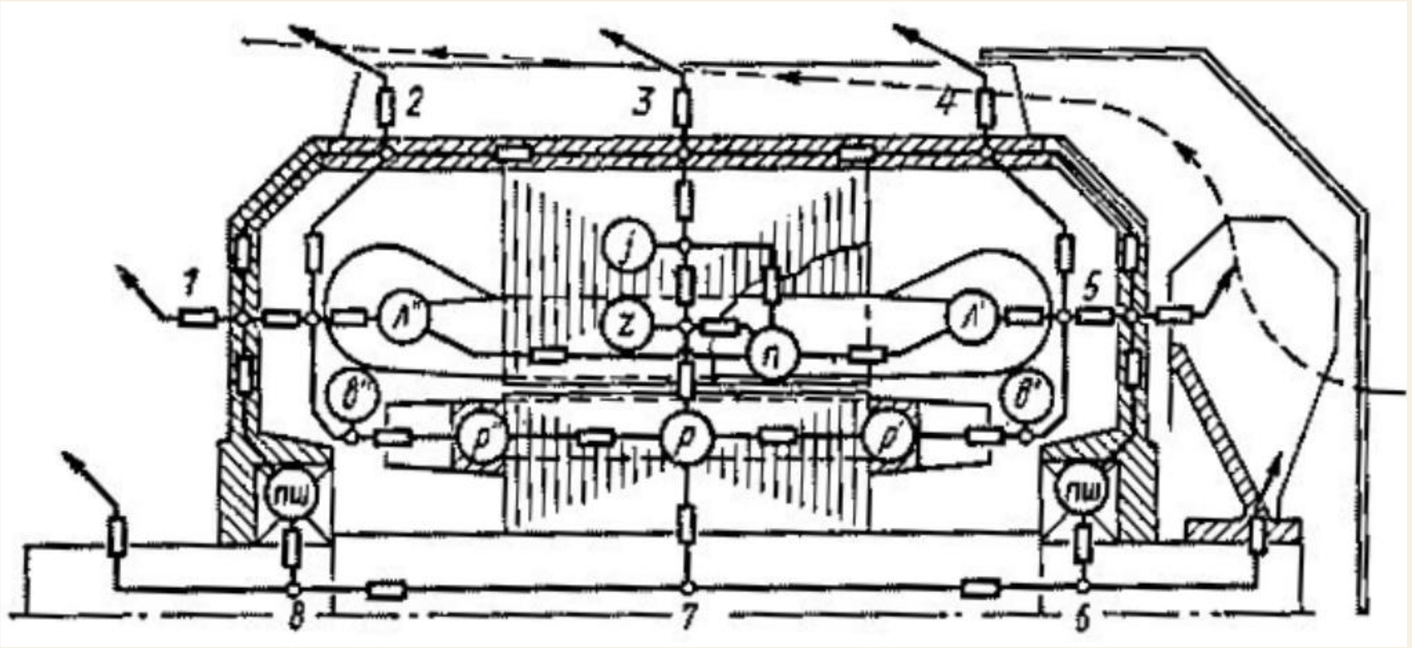
Однородные элементы
- пазовая часть обмотки
- лобовая часть обмотки
- сердечник $P_с = P_{cz} + P_{cj} + P_{доб}$

$$P_п = P_{м1}\frac{l}{l+l_л} \qquad P_л = P_{м1}\frac{l_л}{l+l_л} = P_{м1} - P_п$$

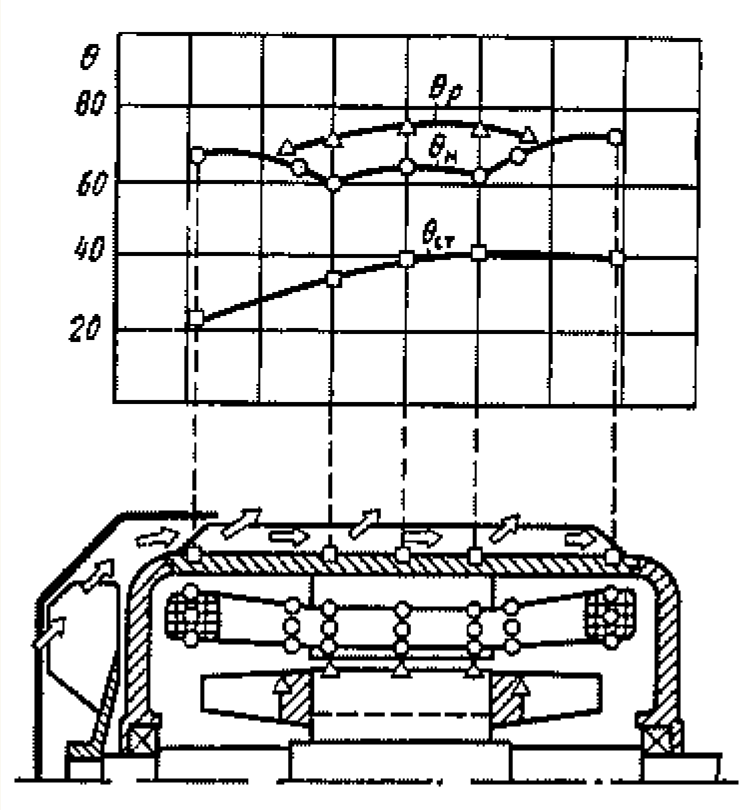


Тепловые схемы электрических машин

Асинхронный двигатель закрытого исполнения



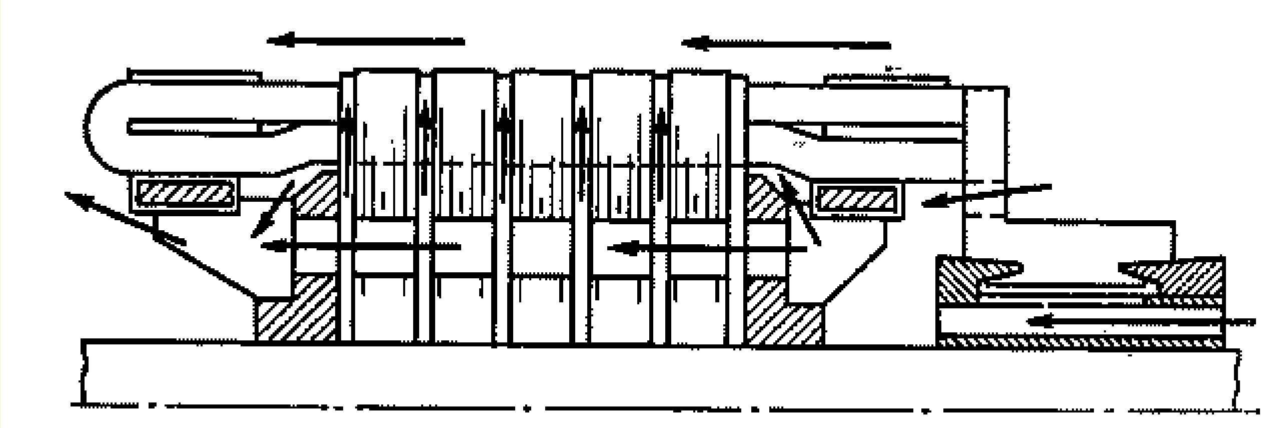
Статор: потери в зубцах и ярме, в пазовой и лобовых частях обмотки
Ротор: потери в роторе (нет изоляции обмотки) и КЗ кольцах
Вентиляционные потери и потери в подшипниках
Отвод тепла в окружающую среду

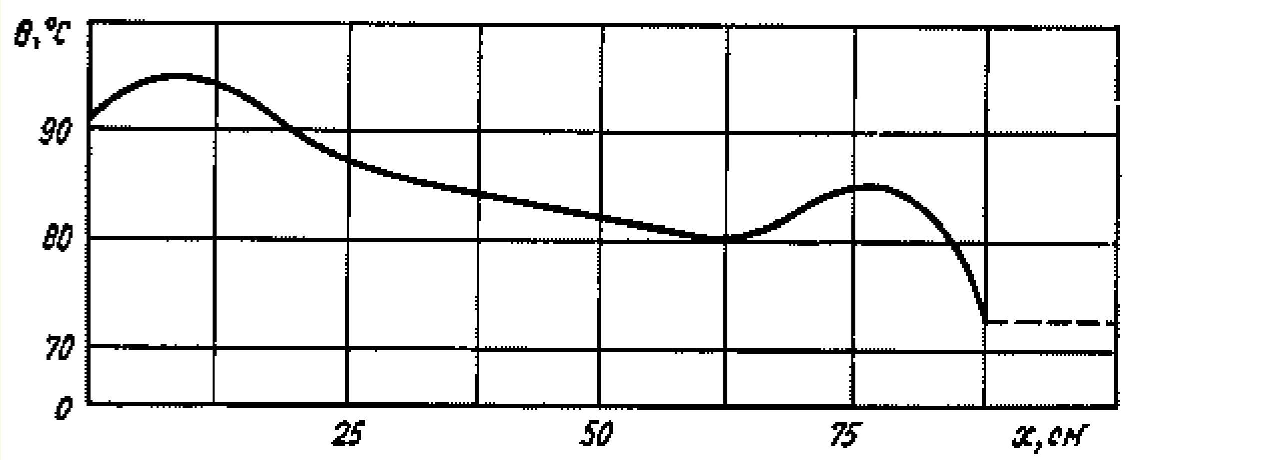


Превышения температур по длине машины

Тепловые схемы электрических машин

Машина постоянного тока с аксиально-радиальной вентиляцией



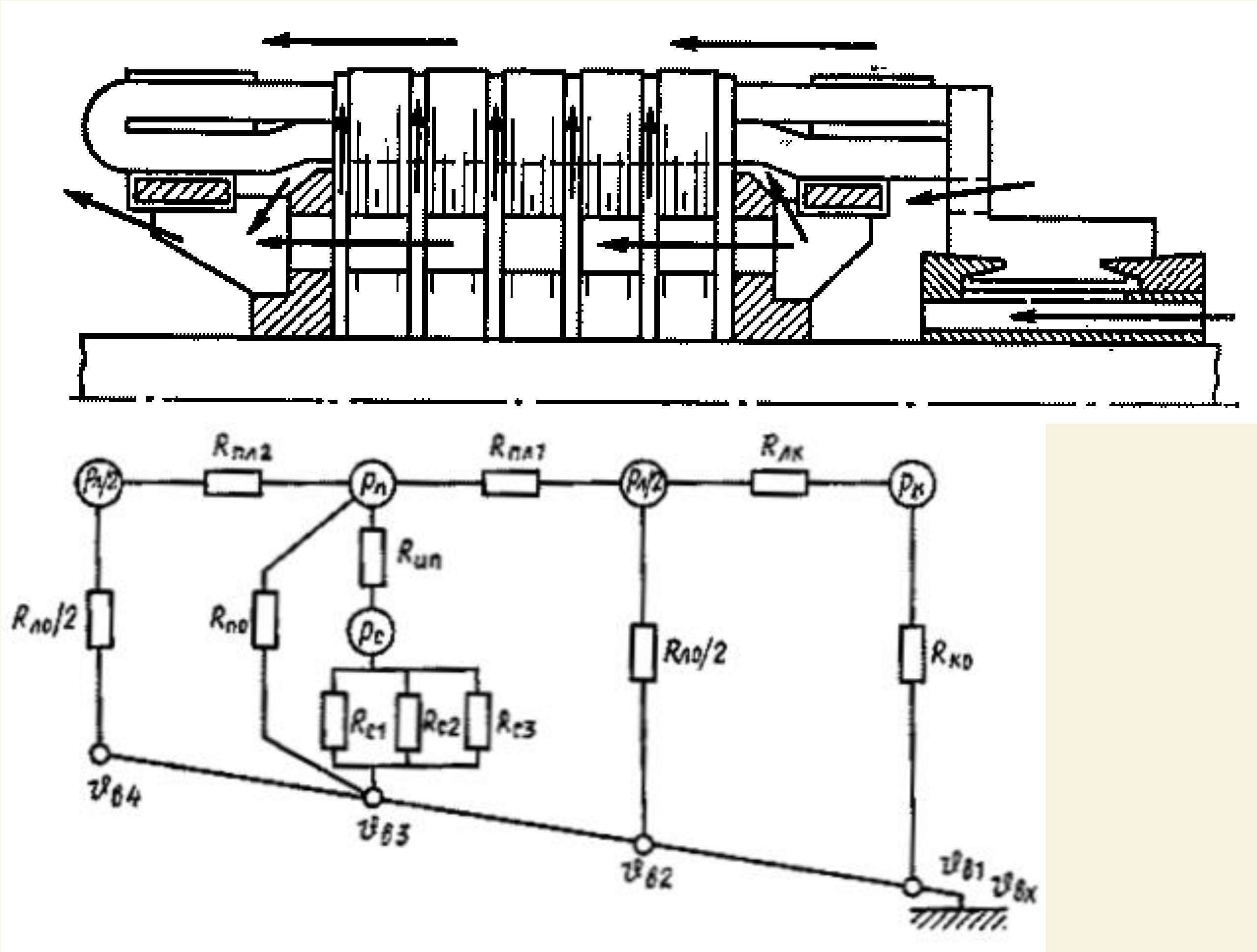


Продув охлаждающим воздухом:
- аксиальные каналы в коллекторе
- аксиальные каналы в сердечнике
- радиальные каналы в сердечнике
- поток воздуха в зазоре

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

- $R_{ко}$ – от коллектора
- $R_{ло}$ – от лобовых частей
- $R_{по}$ – от пазовой части в каналах
- $R_{с1}$ – от внешней поверхности сердечника
- $R_{с2}$ – от поверхности аксиальных каналов
- $R_{с3}$ – 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 $T=\dfrac{cM}{\alpha S}$ – постоянная времени

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

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 $\dfrac{d\vartheta}{\vartheta}=-\dfrac{dt}{T}$ получим решение в общем виде $\ln\vartheta=-\dfrac{t}{T}+C'$ $\quad\vartheta=C\,\mathrm{e}^{-\frac{t}{T}}$

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

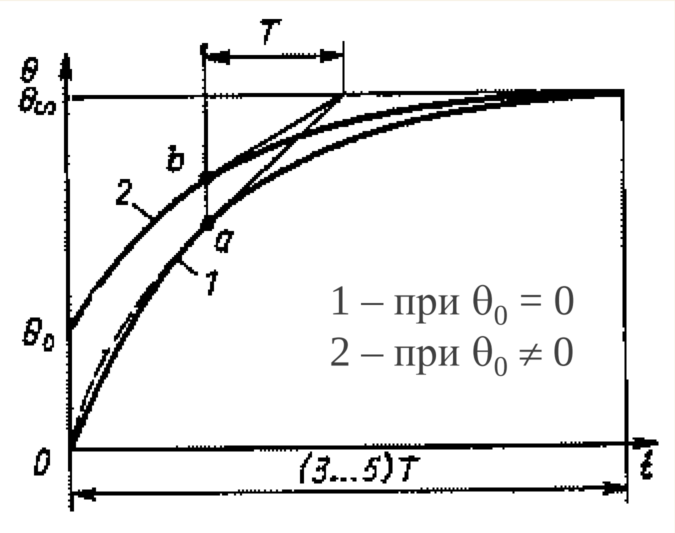
Тогда превышение температуры тела $\theta=\theta_\infty-(\theta_\infty-\theta_0)\mathrm{e}^{-\frac{t}{T}}$ или $\theta=\theta_\infty\left(1-\mathrm{e}^{-\frac{t}{T}}\right)+\theta_0\,\mathrm{e}^{-\frac{t}{T}}$

Классическая теория нагрева однородного тела

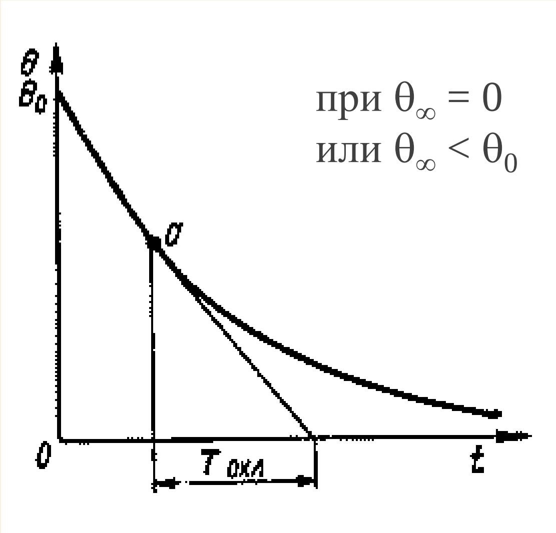
Решение уравнения нестационарного теплового режима

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

Изменение температуры при нагреве



Изменение температуры при охлаждении



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_∞

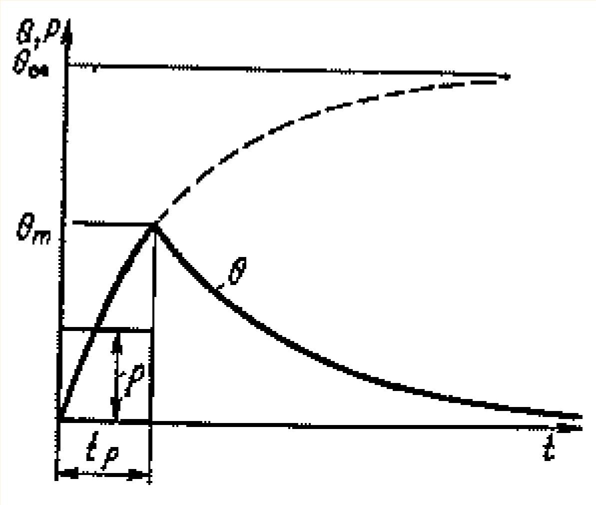
Важно: при включенной ЭМ (идет нагрев) и выключенной ЭМ (охлаждение) коэффициенты теплоотдачи α разные (вентилятор работает или нет)
$\rightarrow$ постоянная времени $T_{охл.}$ больше

Режимы работы электрических машин

Продолжительный режим $S1$

При номинальной нагрузке температура достигает установившегося значения
Рассчитывают как стационарный режим
Условие допустимого нагрева: θ_∞ не больше допустимой → ограничивает допустимые потери P_{S1}

Кратковременный режим $S2$



За время работы $t_\text{р}$ (10, 30, 60, 90 мин) нагрев до θ_m,
затем охлаждение до температуры окружающей среды

Максимальное превышение температуры

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

Условие допустимого нагрева: θ_m не больше допустимой
→ ограничивает допустимые потери P_{S2}

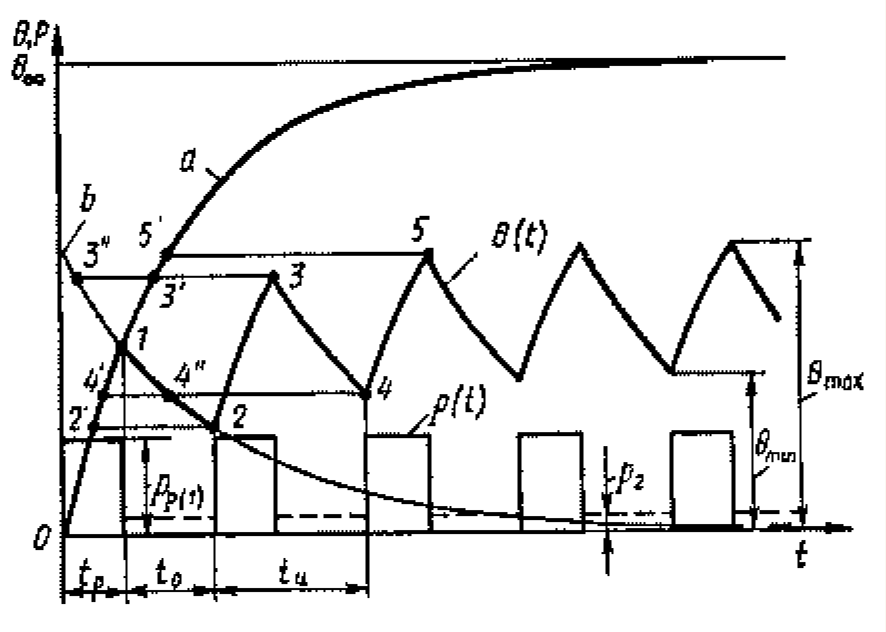
Соотношение допустимых потерь при $S2$ и $S1$ $$\frac{P_{S2}}{P_{S1}} = \frac{\theta_\infty}{\theta_m} = \frac{1}{1 - e^{-\frac{t_\text{р}}{T}}} > 1$$

Режимы работы электрических машин

Повторно-кратковременный режим $S3$

Периодический режим: время цикла $t_ц$ = время работы $t_р$ + время паузы t_0

Продолжительность включения ПВ% = $(t_р/t_ц)\cdot 100\%$ (15%, 25%, 40%, 60% при $t_ц$ = 60 мин)



a – основная кривая нагрева (с постоянной времени T)

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

После 1,5…2,5 $t_ц$ – установившийся характер изменения θ

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

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

Тогда соотношение допустимых потерь при $S3$ и $S1$

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

Выбранный метод расчета должен быть адекватен поставленной задаче

Спасибо за внимание