

ORIGIN := 1

Цель работы: Ознакомиться с одним из методов экспериментального определения коэффициента теплопроводности газов и жидкостей.

Метод нагретой проволоки.

Идея метода заключается в следующем: вдоль оси цилиндра, представляющего собой металлическую трубку 1, заполненную исследуемым веществом, натянута проволока 2, которая является одновременно нагревателем и термометром сопротивления. Рабочая длина проволоки ограничена потенциальными отводами 3. Температура поверхности цилиндра поддерживается постоянной с помощью термостата 4. Пропуская по проволоке электрический ток, получим в установившемся режиме некоторое значение температуры проволоки T_n . Количество тепла Q выделяемое при этом рабочим участком проволоки, будет передаваться стенке трубки через слой исследуемого вещества теплопроводностью Q_λ и излучением Q_l . Часть тепла будет отводиться подводными и потенциальными проводами Q_k . Таким образом, полное количество тепла, выделяемое проволокой, можно записать в виде суммы

$$Q = Q_\lambda + Q_l + Q_k$$

Количество тепла, передаваемое теплопроводностью, можно определить измеряя полное количество тепла Q и вычитая из него Q_l и Q_k , рассчитываемые в виде поправок.

В соответствии с законом Фурье количество тепла передаваемое теплопроводностью через слой исследуемого вещества

$$Q_\lambda = \frac{2 \cdot \pi \cdot l}{\ln\left(\frac{d_{tp}}{d_n}\right)} \cdot \int_{T_{ct}}^{T_n} \lambda(T) dT \quad \lambda(T) = A \cdot \frac{d}{dT} Q_\lambda(T_n) \quad A = \frac{\ln\left(\frac{d_{tp}}{d_n}\right)}{(2 \cdot \pi \cdot l)}$$

Устанавливая ряд последовательных значений эл. тока при неизменной температуре стенки трубки и определяя Q_λ и T_n при каждом значении эл. тока, получаем зависимость $Q_\lambda(T_n)$. Такая зависимость может быть представлена в виде полинома

$$Q_\lambda = a_0 + a_1 \cdot T_n + a_2 \cdot T_n^2 + \dots$$

Дифференцируя это выражение, получаем формулу для λ в интервале температур от T_{ct} до T_n в виде

$$\lambda(T) = A \cdot (a_1 + a_2 \cdot T_n + \dots)$$

Протокол измерений.

B := 740 мм рт. ст.

T_{ком}=25 оС

Этап 1 (температура термостата)

Стеклянный ртутный
термометр

T_{вх}=T_{вых}=31 оС

Режим 1

Напряжение на нити

Напряжение на катушке

ТермоЭДС термопар

I_{list} := 150·10⁻³ А

$$U_{1_n} := \begin{pmatrix} 72.0950 \\ 72.0970 \\ 72.1010 \\ 72.1045 \\ 72.1060 \end{pmatrix} \cdot 10^{-3} \quad U_{1_k} := \begin{pmatrix} 149.690 \\ 149.700 \\ 149.707 \\ 149.704 \\ 149.706 \end{pmatrix} \cdot 10^{-3} \quad E_{1_{vx}} := \begin{pmatrix} 1.7725 \\ 1.7728 \\ 1.7733 \\ 1.7736 \\ 1.7740 \end{pmatrix} \quad E_{1_{vix}} := \begin{pmatrix} 1.8045 \\ 1.8050 \\ 1.8055 \\ 1.8060 \\ 1.8065 \end{pmatrix}$$

Режим 2

I_{list} := 200·10⁻³ А

$$U_{2_n} := \begin{pmatrix} 96.3295 \\ 96.3300 \\ 96.3310 \\ 96.3314 \\ 96.3318 \end{pmatrix} \cdot 10^{-3} \quad U_{2_k} := \begin{pmatrix} 199.550 \\ 199.547 \\ 199.543 \\ 199.540 \\ 199.530 \end{pmatrix} \cdot 10^{-3} \quad E_{2_{vx}} := \begin{pmatrix} 1.8235 \\ 1.8238 \\ 1.8240 \\ 1.8243 \\ 1.8245 \end{pmatrix} \quad E_{2_{vix}} := \begin{pmatrix} 1.8525 \\ 1.8529 \\ 1.8532 \\ 1.8535 \\ 1.8237 \end{pmatrix}$$

Режим 3

I_{list} := 250·10⁻³ А

$$U3_n := \begin{pmatrix} 120.560 \\ 120.570 \\ 120.575 \\ 120.580 \\ 120.585 \end{pmatrix} \cdot 10^{-3} \quad U3_k := \begin{pmatrix} 249.150 \\ 249.045 \\ 249.035 \\ 249.135 \\ 249.140 \end{pmatrix} \cdot 10^{-3} \quad E3_{vx} := \begin{pmatrix} 1.8495 \\ 1.8499 \\ 1.8500 \\ 1.8505 \\ 1.8510 \end{pmatrix} \quad E3_{vix} := \begin{pmatrix} 1.8780 \\ 1.8784 \\ 1.8790 \\ 1.8794 \\ 1.8796 \end{pmatrix}$$

$$R_o := 1.0 \text{ Om} \quad \underline{\underline{A}} := 2.78$$

$$\text{Рабочий ток} \quad \underline{\underline{I1}} := \frac{U1_k}{R_o} \quad I2 := \frac{U2_k}{R_o} \quad I3 := \frac{U3_k}{R_o}$$

$$\begin{array}{ccc} \xrightarrow{\text{Электрическая мощность}} & \xrightarrow{\text{Электрическая мощность}} & \xrightarrow{\text{Электрическая мощность}} \\ Q1_\lambda := U1_n \cdot I1 & Q2_\lambda := U2_n \cdot I2 & Q3_\lambda := U3_n \cdot I3 \end{array}$$

$$\begin{array}{ccc} \xrightarrow{\text{Сопротивление рабочего участка нити}} & \xrightarrow{\text{Сопротивление рабочего участка нити}} & \xrightarrow{\text{Сопротивление рабочего участка нити}} \\ R1_n := \frac{U1_n}{I1} & R2_n := \frac{U2_n}{I2} & R3_n := \frac{U3_n}{I3} \end{array}$$

Температура проволоки по градуировочному уравнению

$$\begin{array}{ccc} \xrightarrow{\text{Температура проволоки по градуировочному уравнению}} & \xrightarrow{\text{Температура проволоки по градуировочному уравнению}} & \xrightarrow{\text{Температура проволоки по градуировочному уравнению}} \\ T1_n := -271.93 + 795.9 \cdot R1_n - 345.1 \cdot R1_n^2 & T2_n := -271.93 + 795.9 \cdot R2_n - 345.1 \cdot R2_n^2 & \\ \xrightarrow{\text{Температура проволоки по градуировочному уравнению}} & & \\ T3_n := -271.93 + 795.9 \cdot R3_n - 345.1 \cdot R3_n^2 & & \end{array}$$

$$Q1_{cp} := \frac{1}{5} \cdot \sum_{i=1}^5 Q1_{\lambda_i} \quad Q2_{cp} := \frac{1}{5} \cdot \sum_{i=1}^5 Q2_{\lambda_i} \quad Q3_{cp} := \frac{1}{5} \cdot \sum_{i=1}^5 Q3_{\lambda_i}$$

$$Q := \begin{pmatrix} Q1_{cp} \\ Q2_{cp} \\ Q3_{cp} \end{pmatrix} \quad Q = \begin{pmatrix} 0.010794 \\ 0.019222 \\ 0.030035 \end{pmatrix} \quad T1_n = \begin{pmatrix} 31.347 \\ 31.338 \\ 31.34 \\ 31.355 \\ 31.357 \end{pmatrix} \quad T1_{тек} := \begin{pmatrix} 31 \\ 31 \\ 31 \\ 31 \\ 31 \end{pmatrix}$$

$$T1_{cp} := \frac{1}{5} \cdot \sum_{i=1}^5 T1_{n_i} \quad T2_{cp} := \frac{1}{5} \cdot \sum_{i=1}^5 T2_{n_i} \quad T2_n = \begin{pmatrix} 31.858 \\ 31.863 \\ 31.87 \\ 31.874 \\ 31.886 \end{pmatrix} \quad T2_{стек} := \begin{pmatrix} 31 \\ 31 \\ 31 \\ 31 \\ 31 \end{pmatrix}$$

$$T3_{cp} := \frac{1}{5} \cdot \sum_{i=1}^5 T3_{n_i} \quad T3_n = \begin{pmatrix} 32.391 \\ 32.504 \\ 32.522 \\ 32.441 \\ 32.446 \end{pmatrix} \quad T3_{стек} := \begin{pmatrix} 31 \\ 31 \\ 31 \\ 31 \\ 31 \end{pmatrix}$$

$$T_n := \begin{pmatrix} T1_{cp} \\ T2_{cp} \\ T3_{cp} \end{pmatrix} \quad T_n = \begin{pmatrix} 31.347 \\ 31.87 \\ 32.461 \end{pmatrix} \quad C$$

Средний рабочий ток

$$I1_{cp} := \frac{1}{5} \cdot \sum_{i=1}^5 I1_i \quad I2_{cp} := \frac{1}{5} \cdot \sum_{i=1}^5 I2_i \quad I3_{cp} := \frac{1}{5} \cdot \sum_{i=1}^5 I3_i$$

$$I := \begin{pmatrix} I1_{cp} \\ I2_{cp} \\ I3_{cp} \end{pmatrix} \quad I = \begin{pmatrix} 0.149701 \\ 0.199542 \\ 0.249101 \end{pmatrix} \quad A$$

$$I1 = \begin{pmatrix} 0.14969 \\ 0.1497 \\ 0.149707 \\ 0.149704 \\ 0.149706 \end{pmatrix} \quad A \quad I2 = \begin{pmatrix} 0.2 \\ 0.2 \\ 0.2 \\ 0.2 \\ 0.2 \end{pmatrix} \quad A \quad I3 = \begin{pmatrix} 0.24915 \\ 0.249045 \\ 0.249035 \\ 0.249135 \\ 0.24914 \end{pmatrix} \quad A$$

Интерполируем зависимость $Q(\lambda)$

$$Q(T) = a_0 + a_1 \cdot T$$

$$G := \begin{bmatrix} 3 & \sum_{i=1}^3 T_{n_i} \\ \sum_{i=1}^3 T_{n_i} & \sum_{i=1}^3 (T_{n_i})^2 \end{bmatrix}$$

$$K := \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^3 Q_i \\ \sum_{i=1}^3 (Q_i \cdot T_{n_i}) \end{bmatrix}$$

$$\underline{\underline{V}} := G^{-1} \cdot K$$

$$a_o := V_1 = -0.532 \qquad a_1 := V_2 = 0.017$$

$$V = \begin{pmatrix} -0.531868 \\ 0.017304 \end{pmatrix}$$

$$j := 1..3$$

$$\underline{\underline{T}} := 28.0, 28.5 .. 34.5$$

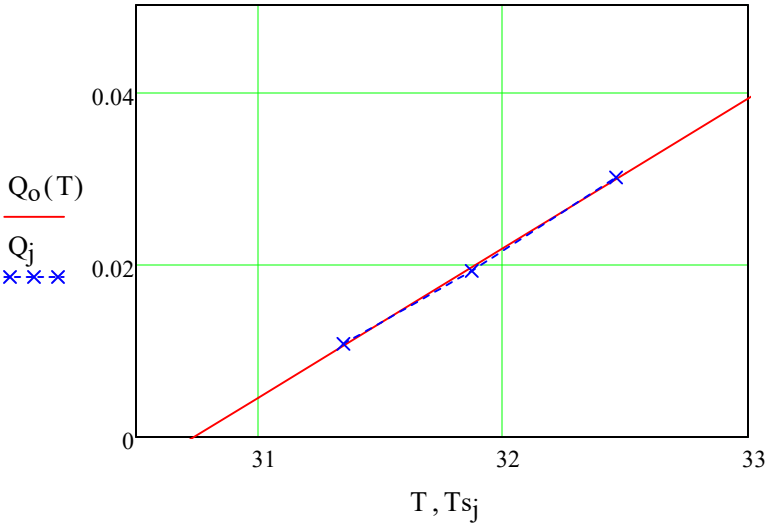
$$Q = \begin{pmatrix} 0.010794 \\ 0.019222 \\ 0.030035 \end{pmatrix}$$

$$Ts := T_n$$

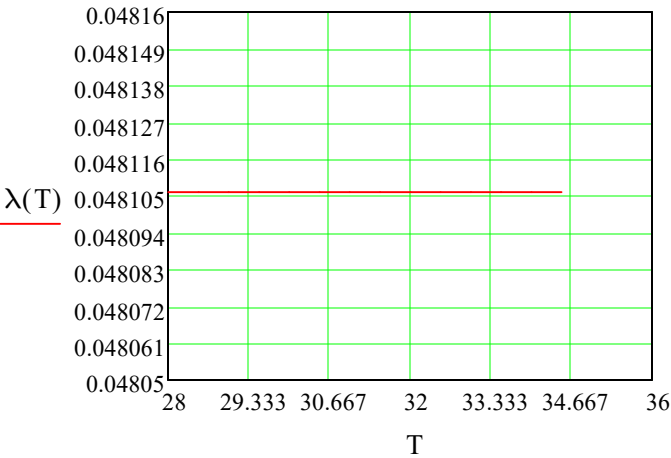
$$Ts_j =$$

31.347
31.87
32.461

$$Q_o(T) := a_o + a_1 \cdot T$$



$$\lambda(T) := A \cdot (a_1)$$



$$\lambda_a := A \cdot (a_1) = 0.04811$$

$$\lambda_1 := A \cdot \frac{Q_2 - Q_1}{T_{n_2} - T_{n_1}} \quad \lambda_1 = 0.044811 \quad \text{Вт/мК}$$

$$\lambda_2 := A \cdot \frac{Q_3 - Q_1}{T_{n_3} - T_{n_1}} \quad \lambda_2 = 0.048045 \quad \text{Вт/мК}$$

$$\lambda_3 := A \cdot \frac{Q_3 - Q_2}{T_{n_3} - T_{n_2}} \quad \lambda_3 = 0.050908 \quad \text{Вт/мК}$$

Локальные отклонения

$$d1 := \frac{[\lambda_1 - (\lambda_a)] \cdot 100}{\lambda_a} = (-6.849) \quad \%$$

$$d2 := \frac{[\lambda_2 - (\lambda_a)] \cdot 100}{\lambda_a} = (-0.128) \quad \%$$

$$d3 := \frac{[\lambda_3 - (\lambda_a)] \cdot 100}{\lambda_a} = (5.824) \quad \%$$

Расчет утечек тепла по приложению в лабнике.

$$1. \quad c_1 := 1.744 \cdot 10^{-7} \quad c_2 := 2.011 \cdot 10^{-9} \quad c_3 := 2.056 \cdot 10^{-6} \quad c_4 := 2.056 \cdot 10^{-4} \quad c_5 := 1.376 \cdot 10^{-4}$$

$$q_k := \frac{I^2 \cdot c_3}{\sqrt{\lambda(T_n)} \cdot \sqrt{\left(c_1 - \frac{I^2}{\lambda(T_n)} \cdot c_2\right)} \cdot \left[c_5 \cdot \sqrt{\left(c_1 - \frac{I^2}{\lambda(T_n)} \cdot c_2\right)} + 1\right]}$$

j := 2 .. 3 Утечки по проводящим проводам в режимах 2-3

$$q_{k,j} =$$

$8.981 \cdot 10^{-4}$
$1.403 \cdot 10^{-3}$

$$\lambda(T_n) = 0.048$$

$$T_n = \begin{pmatrix} 31.347 \\ 31.87 \\ 32.461 \end{pmatrix}$$

2. Утечки на излучение в режимах 2-3

$$q_1 := 6 \cdot 10^{-2} \cdot 5.67 \cdot 10^{-8} \cdot 93.74 \cdot 10^{-6} \cdot \overrightarrow{\left(\frac{T_n}{100} \right)^4 - \left(\frac{49.0}{100} \right)^4} \quad q_1 = \begin{pmatrix} -1.53 \times 10^{-14} \\ -1.509 \times 10^{-14} \\ -1.484 \times 10^{-14} \end{pmatrix}$$

Расчет погрешностей.

$$\Delta A := 0.005$$

$$\Delta \lambda = \sqrt{\left(\frac{d}{dA} \lambda \right)^2 \cdot \Delta A^2 + \left[\frac{d}{d(Q_1 - Q_2)} \lambda \right]^2 \cdot \Delta(Q_1 - Q_2)^2 + \left[\frac{d}{d(T_1 - T_2)} \lambda \right]^2 \cdot \Delta(T_1 - T_2)^2}$$

$$\frac{d}{d(Q_1 - Q_2)} \lambda = L_1 = \frac{A}{T_2 - T_1} \quad \frac{d}{dA} \lambda = L_2 = \frac{Q_2 - Q_1}{T_2 - T_1}$$

$$\frac{d}{d(T_1 - T_2)} \lambda = L_3 = -\frac{A \cdot (Q_2 - Q_1)}{(T_2 - T_1)^2}$$

$$\Delta(Q_1 - Q_2) = \Delta Q_1 + \Delta Q_2 = \Delta_1 \quad \Delta(T_1 - T_2) = \Delta T_1 + \Delta T_2 = \Delta_2$$

$$\Delta U_{k_1} := 2.77 \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^5 \left[\sum_{i=1}^5 \left(\frac{1}{5} \cdot U_{1k_i} \right) - U_{1k_i} \right]^2}{5 \cdot (5 - 1)}} = 8.565 \times 10^{-6}$$

$$\Delta U_{k_2} := 2.77 \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^5 \left[\sum_{i=1}^5 \left(\frac{1}{4} \cdot U_{2k_i} \right) - U_{2k_i} \right]^2}{5 \cdot (5 - 1)}} = 0.069$$

$$\Delta U_{k_3} := 2.77 \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^5 \left[\frac{1}{5} \cdot \left(\sum_{i=1}^5 U_{3k_i} \right) - U_{3k_i} \right]^2}{5 \cdot (5 - 1)}} = 6.944 \times 10^{-5}$$

$$U_k := \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^5 \left(\frac{1}{5} \cdot U1_{k_i} \right) \\ \sum_{i=1}^5 \left(\frac{1}{5} \cdot U2_{k_i} \right) \\ \sum_{i=1}^5 \left(\frac{1}{5} \cdot U3_{k_i} \right) \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} 0.15 \\ 0.2 \\ 0.249 \end{pmatrix} \quad \delta U_k := \frac{\overrightarrow{\Delta U_k}}{U_k} \quad \delta U_k = \begin{pmatrix} 5.721 \times 10^{-5} \\ 0.346 \\ 2.788 \times 10^{-4} \end{pmatrix}$$

$$\Delta U_{n_1} := 2.77 \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^5 \left[\sum_{i=1}^5 \left(\frac{1}{5} \cdot U1_{n_i} \right) - U1_{n_i} \right]^2}{5 \cdot (5-1)}} = 5.837 \times 10^{-6}$$

$$\Delta U_{n_2} := 2.77 \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^5 \left[\sum_{i=1}^5 \left(\frac{1}{5} \cdot U2_{n_i} \right) - U2_{n_i} \right]^2}{5 \cdot (5-1)}} = 1.193 \times 10^{-6}$$

$$\Delta U_{n_3} := 2.77 \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^5 \left[\sum_{i=1}^5 \left(\frac{1}{5} \cdot U_{3n_i} \right) - U_{3n_i} \right]^2}{5 \cdot (5-1)}} = 1.191 \times 10^{-5}$$

$$U_n := \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^5 \left(\frac{1}{5} \cdot U_{1n_i} \right) \\ \sum_{i=1}^5 \left(\frac{1}{5} \cdot U_{2n_i} \right) \\ \sum_{i=1}^5 \left[\frac{1}{5} \cdot (U_{3n})_i \right] \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} 0.072 \\ 0.096 \\ 0.121 \end{pmatrix}$$

$$\delta U_n := \frac{\overrightarrow{\Delta U_n}}{U_n} \qquad \delta U_n = \begin{pmatrix} 8.095 \times 10^{-5} \\ 1.239 \times 10^{-5} \\ 9.881 \times 10^{-5} \end{pmatrix}$$

$$R_n := \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^5 \left(\frac{1}{5} \cdot R_{1n_i} \right) \\ \sum_{i=1}^5 \left(\frac{1}{5} \cdot R_{2n_i} \right) \\ \sum_{i=1}^5 \left(\frac{1}{5} \cdot R_{3n_i} \right) \end{bmatrix} \qquad \begin{array}{l} \Delta Q = Q \cdot \sqrt{\delta U_k^2 + \delta U_n^2 + 0.0001^2} \\ \Delta T = \frac{\left| 759.9 - 2 \cdot 345 \cdot R_n \right| \cdot R_n \cdot \sqrt{\delta U_k^2 + \delta U_n^2 + 0.0001^2}}{\overrightarrow{\left| 759.9 - 2 \cdot 345 \cdot R_n \right| \cdot R_n \cdot \sqrt{\left(\delta U_k \right)^2 + \left(\delta U_n \right)^2 + 0.0001^2}}} \\ \Delta 1 := \frac{\overrightarrow{\left| 759.9 - 2 \cdot 345 \cdot R_n \right| \cdot R_n \cdot \sqrt{\left(\delta U_k \right)^2 + \left(\delta U_n \right)^2 + 0.0001^2}}}{\overrightarrow{Q \cdot \sqrt{\left(\delta U_k \right)^2 + \left(\delta U_n \right)^2 + 0.0001^2}}} \\ \Delta 2 := Q \cdot \sqrt{\left(\delta U_k \right)^2 + \left(\delta U_n \right)^2 + 0.0001^2} \end{array} \qquad R_n = \begin{pmatrix} 0.482 \\ 0.483 \\ 0.484 \end{pmatrix}$$

$$\Delta_1 := Q_1 \cdot \sqrt{\left(\delta U_{k_1} \right)^2 + \left(\delta U_{n_1} \right)^2 + 0.0001^2} + \Delta 2$$

$$\begin{aligned}
L_{1_1} &:= \frac{A}{T_{n_2} - T_{n_1}} & L_{1_2} &:= \frac{A}{T_{n_3} - T_{n_1}} & L_{1_3} &:= \frac{A}{T_{n_3} - T_{n_2}} & \Delta_1 &= \begin{pmatrix} 0.029 \\ 71.341 \\ 0.064 \end{pmatrix} \\
L_{2_1} &:= \frac{Q_2 - Q_1}{T_{n_2} - T_{n_1}} & L_{2_2} &:= \frac{Q_3 - Q_1}{T_{n_3} - T_{n_1}} & L_{2_3} &:= \frac{Q_3 - Q_2}{T_{n_3} - T_{n_2}} & \Delta_2 &= \begin{pmatrix} 0.058 \\ 142.683 \\ 0.129 \end{pmatrix} \\
L_{3_1} &:= \frac{A \cdot (Q_2 - Q_1)}{(T_{n_2} - T_{n_1})^2} & L_{3_2} &:= \frac{A \cdot (Q_3 - Q_1)}{(T_{n_3} - T_{n_1})^2} & L_{3_3} &:= \frac{A \cdot (Q_3 - Q_2)}{(T_{n_3} - T_{n_2})^2} \\
\Delta\lambda &:= \sqrt{(L_2)^2 \cdot \Delta A^2 + (L_1)^2 \cdot \Delta_1^2 + (L_3)^2 \cdot \Delta_2^2} & \Delta_2 &= \begin{pmatrix} 0.058 \\ 142.683 \\ 0.129 \end{pmatrix} & \Delta_1 &= \begin{pmatrix} 3.04 \times 10^{-6} \\ 6.657 \times 10^{-3} \\ 1.09 \times 10^{-5} \end{pmatrix}
\end{aligned}$$

$$(L_2)^2 \cdot \Delta A^2 = \begin{pmatrix} 6.496 \times 10^{-9} \\ 7.467 \times 10^{-9} \\ 8.383 \times 10^{-9} \end{pmatrix} \quad (L_1)^2 \cdot \Delta_1^2 = 2.763 \times 10^{-4} \quad (L_3)^2 \cdot \Delta_2^2 = 37.91$$

$$\lambda := \begin{pmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \lambda_3 \end{pmatrix} \quad \Delta\lambda = \begin{pmatrix} 4.971 \times 10^{-3} \\ 6.157 \\ 0.011 \end{pmatrix} \quad L_2 = \begin{pmatrix} 0.016 \\ 0.017 \\ 0.018 \end{pmatrix} \quad L_3 = \begin{pmatrix} 0.086 \\ 0.043 \\ 0.086 \end{pmatrix}$$

$$j := 1..3 \\
\delta\lambda := \frac{100 \cdot \Delta\lambda}{\lambda} \quad \delta\lambda = \begin{pmatrix} 11.093 \\ 1.282 \times 10^4 \\ 21.802 \end{pmatrix} \quad \lambda = \begin{pmatrix} 0.045 \\ 0.048 \\ 0.051 \end{pmatrix}$$

Этап 2 (температура термостата)

Стеклянный ртутный
термометр

Режим 1

$T_{вх} = T_{вых} = 40 \text{ } ^\circ\text{C}$

$$\lambda_{ist} := 150 \cdot 10^{-3} \text{ A}$$

$$\underline{U1_n} := \begin{pmatrix} 75.3470 \\ 75.3465 \\ 75.3455 \\ 75.3440 \\ 75.3435 \end{pmatrix} \cdot 10^{-3} \quad \underline{U1_k} := \begin{pmatrix} 149.635 \\ 149.640 \\ 149.650 \\ 149.655 \\ 149.653 \end{pmatrix} \cdot 10^{-3} \quad E1_{vx} := \begin{pmatrix} 2.4485 \\ 2.4483 \\ 2.4477 \\ 2.4478 \\ 2.4469 \end{pmatrix} \quad E1_{vix} := \begin{pmatrix} 2.4670 \\ 2.4670 \\ 2.4665 \\ 2.4660 \\ 2.4657 \end{pmatrix}$$

Режим 2

$$\underline{Iist} := 200 \cdot 10^{-3}$$

$$\underline{U2_n} := \begin{pmatrix} 100.4895 \\ 100.4885 \\ 100.4872 \\ 100.4858 \\ 100.4842 \end{pmatrix} \cdot 10^{-3} \quad \underline{U2_k} := \begin{pmatrix} 199.524 \\ 199.515 \\ 199.510 \\ 199.506 \\ 199.494 \end{pmatrix} \cdot 10^{-3} \quad E2_{vx} := \begin{pmatrix} 2.4400 \\ 2.4393 \\ 2.4388 \\ 2.4387 \\ 2.4385 \end{pmatrix} \quad E2_{vix} := \begin{pmatrix} 2.4585 \\ 2.4580 \\ 2.4578 \\ 2.4575 \\ 2.4573 \end{pmatrix}$$

Режим 3

$$\underline{Iist} := 250 \cdot 10^{-3}$$

$$\underline{U3_n} := \begin{pmatrix} 125.545 \\ 125.550 \\ 125.565 \\ 125.550 \\ 125.545 \end{pmatrix} \cdot 10^{-3} \quad \underline{U3_k} := \begin{pmatrix} 249.190 \\ 249.198 \\ 249.202 \\ 249.200 \\ 249.201 \end{pmatrix} \cdot 10^{-3} \quad E3_{vx} := \begin{pmatrix} 2.4320 \\ 2.4316 \\ 2.4311 \\ 2.4308 \\ 2.4305 \end{pmatrix} \quad E3_{vix} := \begin{pmatrix} 2.4477 \\ 2.4475 \\ 2.4474 \\ 2.4473 \\ 2.4472 \end{pmatrix}$$

$$\underline{R_o} := 1.0 \text{ Om} \quad \underline{A} := 2.78$$

$$T_{BX} = T_{BYX} = 40 \text{ oC}$$

$$\text{Рабочий ток} \quad \underline{I1} := \frac{U1_k}{R_o} \quad \underline{I2} := \frac{U2_k}{R_o} \quad \underline{I3} := \frac{U3_k}{R_o}$$

$$\underline{Q1_\lambda} := \xrightarrow{\text{Электрическая мощность}} U1_n \cdot I1 \quad \underline{Q2_\lambda} := U2_n \cdot I2 \quad \underline{Q3_\lambda} := U3_n \cdot I3$$

Сопротивление рабочего участка нити

$$\overset{\longrightarrow}{R1_n} := \frac{\overset{\longrightarrow}{U1_n}}{\overset{\longrightarrow}{I1}} \quad \overset{\longrightarrow}{R2_n} := \frac{\overset{\longrightarrow}{U2_n}}{\overset{\longrightarrow}{I2}} \quad \overset{\longrightarrow}{R3_n} := \frac{\overset{\longrightarrow}{U3_n}}{\overset{\longrightarrow}{I3}}$$

Температура проволоки по градуировочному уравнению

$$\overset{\longrightarrow}{T1_n} := -271.93 + 795.9 \cdot \overset{\longrightarrow}{R1_n} - 345 \cdot \overset{\longrightarrow}{R1_n}^2 \quad \overset{\longrightarrow}{T2_n} := -271.93 + 795.9 \cdot \overset{\longrightarrow}{R2_n} - 345 \cdot \overset{\longrightarrow}{R2_n}^2$$

$$\overset{\longrightarrow}{T3_n} := -271.93 + 795.9 \cdot \overset{\longrightarrow}{R3_n} - 345 \cdot \overset{\longrightarrow}{R3_n}^2$$

$$\overset{\longrightarrow}{Q1_{cp}} := \frac{1}{5} \cdot \sum_{i=1}^5 \overset{\longrightarrow}{Q1_{\lambda_i}} \quad \overset{\longrightarrow}{Q2_{cp}} := \frac{1}{5} \cdot \sum_{i=1}^5 \overset{\longrightarrow}{Q2_{\lambda_i}} \quad T1_n = \begin{pmatrix} 41.361 \\ 41.352 \\ 41.334 \\ 41.322 \\ 41.324 \end{pmatrix}$$

$$\overset{\longrightarrow}{Q3_{cp}} := \frac{1}{5} \cdot \sum_{i=1}^5 \overset{\longrightarrow}{Q3_{\lambda_i}}$$

$$Q := \begin{pmatrix} Q1_{cp} \\ Q2_{cp} \\ Q3_{cp} \end{pmatrix} \quad Q = \begin{pmatrix} 0.010794 \\ 0.019222 \\ 0.030035 \end{pmatrix} \quad T3_n = \begin{pmatrix} 41.484 \\ 41.486 \\ 41.509 \\ 41.484 \\ 41.474 \end{pmatrix} \quad T2_n = \begin{pmatrix} 41.409 \\ 41.417 \\ 41.42 \\ 41.422 \\ 41.432 \end{pmatrix}$$

$$\overset{\longrightarrow}{T1_{cp}} := \frac{1}{5} \cdot \sum_{i=1}^5 \overset{\longrightarrow}{T1_{n_i}} \quad \overset{\longrightarrow}{T2_{cp}} := \frac{1}{5} \cdot \sum_{i=1}^5 \overset{\longrightarrow}{T2_{n_i}} \quad \overset{\longrightarrow}{T3_{cp}} := \frac{1}{5} \cdot \sum_{i=1}^5 \overset{\longrightarrow}{T3_{n_i}}$$

$$T_n := \begin{pmatrix} T1_{cp} \\ T2_{cp} \\ T3_{cp} \end{pmatrix} \quad T_n = \begin{pmatrix} 41.34 \\ 41.42 \\ 41.49 \end{pmatrix} \quad C$$

Средний рабочий ток

$$\overset{\longrightarrow}{I1_{cp}} := \frac{1}{5} \cdot \sum_{i=1}^5 \overset{\longrightarrow}{I1_i} \quad \overset{\longrightarrow}{I2_{cp}} := \frac{1}{5} \cdot \sum_{i=1}^5 \overset{\longrightarrow}{I2_i} \quad \overset{\longrightarrow}{I3_{cp}} := \frac{1}{5} \cdot \sum_{i=1}^5 \overset{\longrightarrow}{I3_i}$$

$$I := \begin{pmatrix} I1_{cp} \\ I2_{cp} \\ I3_{cp} \end{pmatrix}$$

$$I = \begin{pmatrix} 0.149647 \\ 0.19951 \\ 0.249198 \end{pmatrix} A$$

Интерполируем зависимость $Q(\lambda)$

$$Q(T) = a_0 + a_1 \cdot T$$

$$G := \begin{bmatrix} 3 & \sum_{i=1}^3 T_{n_i} \\ \sum_{i=1}^3 T_{n_i} & \sum_{i=1}^3 (T_{n_i})^2 \end{bmatrix}$$

$$K := \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^3 Q_i \\ \sum_{i=1}^3 (Q_i \cdot T_{n_i}) \end{bmatrix}$$

$$\underline{V} := G^{-1} \cdot K$$

$$V = \begin{pmatrix} -5.51475 \\ 0.133661 \end{pmatrix}$$

$$\underline{a_0} := V_1 \quad \underline{a_1} := V_2$$

$$j := 1..3$$

$$T := 35,38.5..44$$

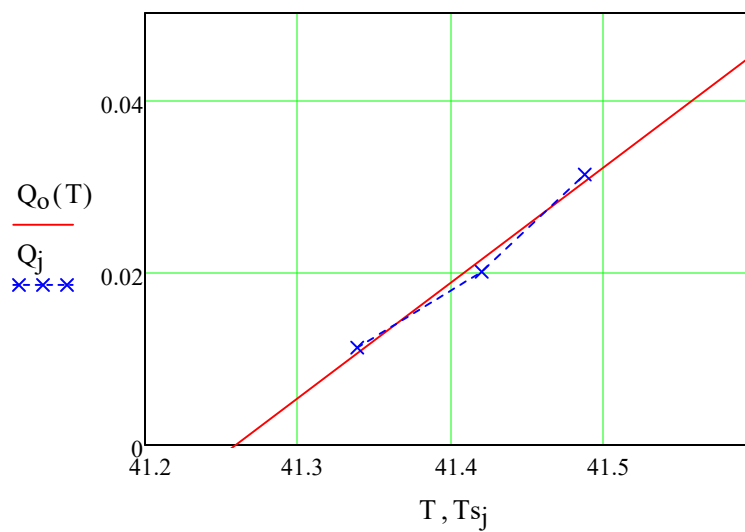
$$Q = \begin{pmatrix} 0.011275 \\ 0.020048 \\ 0.031287 \end{pmatrix}$$

$$Ts := T_n$$

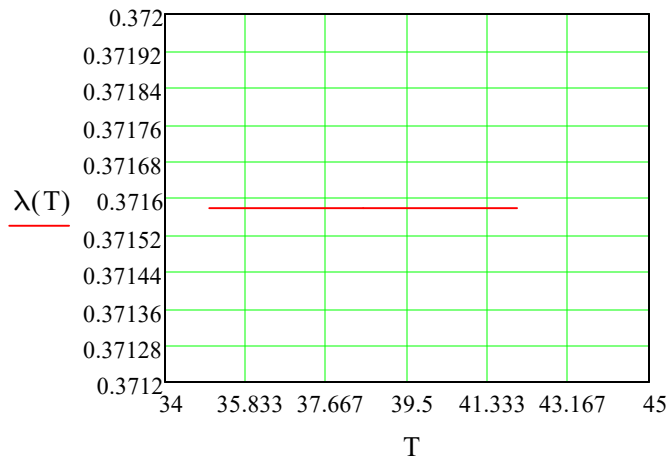
$$Ts_j =$$

41.339
41.42
41.487

$$\underline{Q_o}(T) := a_0 + a_1 \cdot T$$



$$\lambda(T) := A \cdot (a_1) \quad \lambda_a := A \cdot (a_1) = 0.372$$



$$\lambda_1 := A \cdot \frac{Q_2 - Q_1}{T_{n_2} - T_{n_1}} \quad \lambda_1 = 0.299694 \quad \text{Вт/мК}$$

$$\lambda_2 := A \cdot \frac{Q_3 - Q_1}{T_{n_3} - T_{n_1}} \quad \lambda_2 = 0.374139 \quad \text{Вт/мК}$$

$$\lambda_3 := A \cdot \frac{Q_3 - Q_2}{T_{n_3} - T_{n_2}} \quad \lambda_3 = 0.464135 \quad \text{Вт/мК}$$

Относительные локальные отклонения $d\lambda$

$$d1 := \frac{[\lambda_1 - (\lambda_a)] \cdot 100}{\lambda_a} = (-19.346) \quad \%$$

$$d2 := \frac{[\lambda_2 - (\lambda_a)] \cdot 100}{\lambda_a} = (0.689) \quad \%$$

$$d3 := \frac{[\lambda_3 - (\lambda_a)] \cdot 100}{\lambda_a} = (24.909) \quad \%$$

Расчет утечек тепла по приложению в лабнике.

$$c_1 := 1.744 \cdot 10^{-7} \quad c_2 := 2.011 \cdot 10^{-9} \quad c_3 := 2.056 \cdot 10^{-6} \quad c_4 := 2.056 \cdot 10^{-4} \quad c_5 := 1.376 \cdot 10^{-4}$$

$$q_{k_j} := \frac{I^2 \cdot c_3}{\sqrt{\lambda(T_n)} \cdot \sqrt{\left(c_1 - \frac{I^2}{\lambda(T_n)} \cdot c_2\right)} \cdot \left[c_5 \cdot \sqrt{\left(c_1 - \frac{I^2}{\lambda(T_n)} \cdot c_2\right)} + 1\right]}$$

j := 2 .. 3 Утечки по проводящим проводам в режимах 2-3

$$q_{k_j} =$$

$3.217 \cdot 10^{-4}$
$5.02 \cdot 10^{-4}$

$$\lambda(T_n) = 0.372$$

$$T_n = \begin{pmatrix} 41.339 \\ 41.42 \\ 41.487 \end{pmatrix}$$

2. Утечки на излучение в режимах 2-3

$$q_{l_j} := 6 \cdot 10^{-2} \cdot 5.67 \cdot 10^{-8} \cdot 93.74 \cdot 10^{-6} \cdot \left(\frac{T_n}{100}\right)^4 - \left(\frac{49.0}{100}\right)^4 \quad q_l = \begin{pmatrix} -9.071 \times 10^{-15} \\ -8.998 \times 10^{-15} \\ -8.937 \times 10^{-15} \end{pmatrix}$$

Расчет погрешностей.

$$\Delta\lambda = \sqrt{\left(\frac{\Delta A}{A}\right)^2 \cdot A^2 + \left[\frac{d}{d(Q_1 - Q_2)} \lambda\right]^2 \cdot \Delta(Q_1 - Q_2)^2 + \left[\frac{d}{d(T_1 - T_2)} \lambda\right]^2 \cdot \Delta(T_1 - T_2)^2}$$

$$\frac{d}{d(Q_1 - Q_2)} \lambda = L_1 = \frac{A}{T_2 - T_1} \quad \frac{d}{dA} \lambda = L_2 = \frac{Q_2 - Q_1}{T_2 - T_1}$$

$$\frac{d}{d(T_1 - T_2)} \lambda = L_3 = -\frac{A \cdot (Q_2 - Q_1)}{(T_2 - T_1)^2}$$

$$\Delta(Q_1 - Q_2) = \Delta Q_1 + \Delta Q_2 = \Delta_1 \quad \Delta(T_1 - T_2) = \Delta T_1 + \Delta T_2 = \Delta_2$$

$$\Delta U_{k_1} := 2.77 \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^5 \left[\sum_{j=1}^5 \left(\frac{1}{5} \cdot U_{1k_i} \right) - U_{1k_i} \right]^2}{5 \cdot (5 - 1)}} = 1.075 \times 10^{-5}$$

$$\Delta U_{k_2} := 2.77 \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^5 \left[\sum_{i=1}^5 \left(\frac{1}{5} \cdot U_{2_{k_i}} \right) - U_{2_{k_i}} \right]^2}{5 \cdot (5-1)}} = 1.375 \times 10^{-5}$$

$$\Delta U_{k_3} := 2.77 \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^5 \left[\sum_{i=1}^5 \left(\frac{1}{5} \cdot U_{3_{k_i}} \right) - U_{3_{k_i}} \right]^2}{5 \cdot (5-1)}} = 5.967 \times 10^{-6}$$

$$U_k := \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^5 \left(\frac{1}{5} \cdot U_{1_{k_i}} \right) \\ \sum_{i=1}^5 \left(\frac{1}{5} \cdot U_{2_{k_i}} \right) \\ \sum_{i=1}^5 \left(\frac{1}{5} \cdot U_{3_{k_i}} \right) \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} 0.15 \\ 0.2 \\ 0.249 \end{pmatrix}$$

$$\delta U_k := \frac{\Delta U_k}{U_k} \longrightarrow \delta U_k = \begin{pmatrix} 7.183 \times 10^{-5} \\ 6.892 \times 10^{-5} \\ 2.394 \times 10^{-5} \end{pmatrix}$$

$$\Delta U_{n_1} := 2.77 \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^5 \left[\sum_{i=1}^5 \left(\frac{1}{4} \cdot U_{1_{n_i}} \right) - U_{1_{n_i}} \right]^2}{5 \cdot (5-1)}} = 0.026$$

$$\Delta U_{n_2} := 2.77 \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^5 \left[\sum_{i=1}^5 \left(\frac{1}{5} \cdot U_{2_{n_i}} \right) - U_{2_{n_i}} \right]^2}{5 \cdot (5-1)}} = 2.614 \times 10^{-6}$$

$$\Delta U_{n_3} := 2.77 \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^5 \left[\sum_{i=1}^5 \left(\frac{1}{5} \cdot U_{3_{n_i}} \right) - U_{3_{n_i}} \right]^2}{5 \cdot (5-1)}} = 1.018 \times 10^{-5}$$

$$U_n := \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^5 \left(\frac{1}{5} \cdot U_{1_{n_i}} \right) \\ \sum_{i=1}^5 \left(\frac{1}{5} \cdot U_{2_{n_i}} \right) \\ \sum_{i=1}^5 \left[\frac{1}{5} \cdot (U_{3_n})_i \right] \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} 0.075 \\ 0.1 \\ 0.126 \end{pmatrix} \xrightarrow{\frac{\Delta U_n}{U_n}} \delta U_n = \begin{pmatrix} 0.346 \\ 2.601 \times 10^{-5} \\ 8.106 \times 10^{-5} \end{pmatrix}$$

$$\Delta Q = Q \cdot \sqrt{\delta U_k^2 + \delta U_n^2 + 0.0001^2}$$

$$\Delta T = \left| 759.9 - 2 \cdot 345 \cdot R_n \right| \cdot R_n \cdot \sqrt{\delta U_k^2 + \delta U_n^2 + 0.0001^2}$$

$$R_n := \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^5 \left(\frac{1}{5} \cdot R_{1_{n_i}} \right) \\ \sum_{i=1}^5 \left(\frac{1}{5} \cdot R_{2_{n_i}} \right) \\ \sum_{i=1}^5 \left(\frac{1}{5} \cdot R_{3_{n_i}} \right) \end{bmatrix} \xrightarrow{\frac{\Delta_1}{\delta U_k}} \Delta_1 := \left| 759.9 - 2 \cdot 345 \cdot R_n \right| \cdot R_n \cdot \sqrt{(\delta U_k)^2 + (\delta U_n)^2 + 0.0001^2}$$

$$\xrightarrow{\frac{\Delta_2}{Q \cdot \sqrt{(\delta U_k)^2 + (\delta U_n)^2 + 0.0001^2}}} \Delta_2 := Q \cdot \sqrt{(\delta U_k)^2 + (\delta U_n)^2 + 0.0001^2}$$

$$\Delta_2 := 2 \Delta_1$$

$$\Delta_1 := 2\Delta_2$$

$$\begin{aligned} L_{1_1} &:= \frac{A}{T_{n_2} - T_{n_1}} & L_{1_2} &:= \frac{A}{T_{n_3} - T_{n_1}} & L_{1_3} &:= \frac{A}{T_{n_3} - T_{n_2}} \\ L_{2_1} &:= \frac{Q_2 - Q_1}{T_{n_2} - T_{n_1}} & L_{2_2} &:= \frac{Q_3 - Q_1}{T_{n_3} - T_{n_1}} & L_{2_3} &:= \frac{Q_3 - Q_2}{T_{n_3} - T_{n_2}} \end{aligned}$$

$$L_{3_1} := \frac{A \cdot (Q_2 - Q_1)}{(T_{n_2} - T_{n_1})^2} \quad L_{3_2} := \frac{A \cdot (Q_3 - Q_1)}{(T_{n_3} - T_{n_1})^2} \quad L_{3_3} := \frac{A \cdot (Q_3 - Q_2)}{(T_{n_3} - T_{n_2})^2} \quad \lambda := \begin{pmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \lambda_3 \end{pmatrix}$$

$$j := 1..3$$

$$\Delta\lambda := \sqrt{(L_2)^2 \cdot \Delta A^2 + (L_1)^2 \cdot \Delta_1^2 + (L_3)^2 \cdot \Delta_2^2}$$

$$\delta\lambda := \frac{\Delta\lambda \cdot 100}{\lambda}$$

$$\Delta\lambda_j =$$

529.651
0.13
0.375

$$\delta\lambda_j =$$

1.767·10 ⁵
34.698
80.802

Этап 3 (температура термостата)

Режим 1

$$I_{ist} := 150 \cdot 10^{-3}$$

$$\underline{U1_n} := \begin{pmatrix} 77.8950 \\ 77.8940 \\ 77.8932 \\ 77.8924 \\ 77.8912 \end{pmatrix} \cdot 10^{-3} \quad \underline{U1_k} := \begin{pmatrix} 149.650 \\ 149.660 \\ 149.665 \\ 149.663 \\ 149.670 \end{pmatrix} \cdot 10^{-3} \quad E1_{vx} := \begin{pmatrix} 2.9330 \\ 2.9325 \\ 2.9323 \\ 2.9317 \\ 2.9314 \end{pmatrix} \quad E1_{vix} := \begin{pmatrix} 2.9500 \\ 2.9503 \\ 2.9505 \\ 2.9507 \\ 2.9506 \end{pmatrix}$$

Режим 2

$$\underline{Iist} := 200 \cdot 10^{-3}$$

$$\underline{U2_n} := \begin{pmatrix} 103.8800 \\ 103.8770 \\ 103.8764 \\ 103.8755 \\ 103.8748 \end{pmatrix} \cdot 10^{-3} \quad \underline{U2_k} := \begin{pmatrix} 199.560 \\ 199.557 \\ 199.558 \\ 199.556 \\ 199.560 \end{pmatrix} \cdot 10^{-3} \quad E2_{vx} := \begin{pmatrix} 2.9256 \\ 2.9260 \\ 2.9264 \\ 2.9265 \\ 2.9265 \end{pmatrix} \quad E2_{vix} := \begin{pmatrix} 2.9460 \\ 2.9458 \\ 2.9456 \\ 2.9451 \\ 2.949 \end{pmatrix}$$

Режим 3

$$\underline{Iist} := 250 \cdot 10^{-3}$$

$$\underline{U3_n} := \begin{pmatrix} 129.780 \\ 129.782 \\ 129.781 \\ 129.779 \\ 129.777 \end{pmatrix} \cdot 10^{-3} \quad \underline{U3_k} := \begin{pmatrix} 249.310 \\ 249.315 \\ 249.320 \\ 249.323 \\ 249.326 \end{pmatrix} \cdot 10^{-3} \quad E3_{vx} := \begin{pmatrix} 2.9104 \\ 2.9101 \\ 2.9096 \\ 2.9090 \\ 2.9091 \end{pmatrix} \quad E3_{vix} := \begin{pmatrix} 2.9285 \\ 2.9284 \\ 2.9280 \\ 2.9275 \\ 2.9268 \end{pmatrix}$$

$$\underline{R_o} := 1.0 \text{ Ом} \quad \underline{A} := 2.78$$

$$T_{BX} = T_{ВЫХ} = 48 \text{ оС}$$

$$\text{Рабочий ток} \quad \underline{I1} := \frac{U1_k}{R_o} \quad \underline{I2} := \frac{U2_k}{R_o} \quad \underline{I3} := \frac{U3_k}{R_o}$$

$$\begin{array}{ccc} \xrightarrow{\text{Электрическая мощность}} & \xrightarrow{\text{Электрическая мощность}} & \xrightarrow{\text{Электрическая мощность}} \\ \underline{Q1_\lambda} := U1_n \cdot I1 & \underline{Q2_\lambda} := U2_n \cdot I2 & \underline{Q3_\lambda} := U3_n \cdot I3 \end{array}$$

Сопротивление рабочего участка нити

$$\overset{\longrightarrow}{R1_n} := \frac{\overset{\longrightarrow}{U1_n}}{I1} \quad \overset{\longrightarrow}{R2_n} := \frac{\overset{\longrightarrow}{U2_n}}{I2} \quad \overset{\longrightarrow}{R3_n} := \frac{\overset{\longrightarrow}{U3_n}}{I3}$$

Температура проволоки по градуировочному уравнению

$$\overset{\longrightarrow}{T1_n} := -271.93 + 795.9 \cdot \overset{\longrightarrow}{R1_n} - 345 \cdot \overset{\longrightarrow}{R1_n}^2 \quad \overset{\longrightarrow}{T2_n} := -271.93 + 795.9 \cdot \overset{\longrightarrow}{R2_n} - 345 \cdot \overset{\longrightarrow}{R2_n}^2$$

$$\overset{\longrightarrow}{T3_n} := -271.93 + 795.9 \cdot \overset{\longrightarrow}{R3_n} - 345 \cdot \overset{\longrightarrow}{R3_n}^2$$

$$\overset{\longrightarrow}{Q1_{cp}} := \frac{1}{5} \cdot \sum_{i=1}^5 Q1_{\lambda_i} \quad \overset{\longrightarrow}{Q2_{cp}} := \frac{1}{5} \cdot \sum_{i=1}^5 Q2_{\lambda_i} \quad \overset{\longrightarrow}{Q3_{cp}} := \frac{1}{5} \cdot \sum_{i=1}^5 Q3_{\lambda_i}$$

$$Q := \begin{pmatrix} Q1_{cp} \\ Q2_{cp} \\ Q3_{cp} \end{pmatrix}$$

$$Q = \begin{pmatrix} 0.011658 \\ 0.020729 \\ 0.032357 \end{pmatrix}$$

$$T1_n = \begin{pmatrix} 48.875 \\ 48.857 \\ 48.847 \\ 48.847 \\ 48.833 \end{pmatrix}$$

$$\overset{\longrightarrow}{T1_{cp}} := \frac{1}{5} \cdot \sum_{i=1}^5 T1_{n_i} \quad \overset{\longrightarrow}{T2_{cp}} := \frac{1}{5} \cdot \sum_{i=1}^5 T2_{n_i} \quad \overset{\longrightarrow}{T3_{cp}} := \frac{1}{5} \cdot \sum_{i=1}^5 T3_{n_i}$$

$$T_n := \begin{pmatrix} T1_{cp} \\ T2_{cp} \\ T3_{cp} \end{pmatrix} \quad T_n = \begin{pmatrix} 48.85 \\ 48.88 \\ 48.88 \end{pmatrix} \quad C \quad T2_n = \begin{pmatrix} 48.888 \\ 48.885 \\ 48.883 \\ 48.883 \\ 48.877 \end{pmatrix}$$

$$\text{Средний рабочий ток}$$

$$I1_{cp} := \frac{1}{5} \cdot \sum_{i=1}^5 I1_i \quad I2_{cp} := \frac{1}{5} \cdot \sum_{i=1}^5 I2_i \quad I3_{cp} := \frac{1}{5} \cdot \sum_{i=1}^5 I3_i \quad T3_n = \begin{pmatrix} 48.893 \\ 48.892 \\ 48.886 \\ 48.88 \\ 48.873 \end{pmatrix}$$

$$I := \begin{pmatrix} I1_{cp} \\ I2_{cp} \\ I3_{cp} \end{pmatrix} \quad I = \begin{pmatrix} 0.149647 \\ 0.19951 \\ 0.249198 \end{pmatrix} \quad A$$

Интерполируем зависимость $Q(\lambda)$

$$G := \begin{bmatrix} 3 & \sum_{i=1}^3 T_{n_i} \\ \sum_{i=1}^3 T_{n_i} & \sum_{i=1}^3 (T_{n_i})^2 \end{bmatrix}$$

$Q(T) = a_0 + a_1 \cdot T$

$$K := \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^3 Q_i \\ \sum_{i=1}^3 (Q_i \cdot T_{n_i}) \end{bmatrix}$$

$$V := G^{-1} \cdot K$$

$$V = \begin{pmatrix} -23.258561 \\ 0.476337 \end{pmatrix}$$

$$a_0 := V_1 \quad a_1 := V_2$$

$$j := 1..3$$

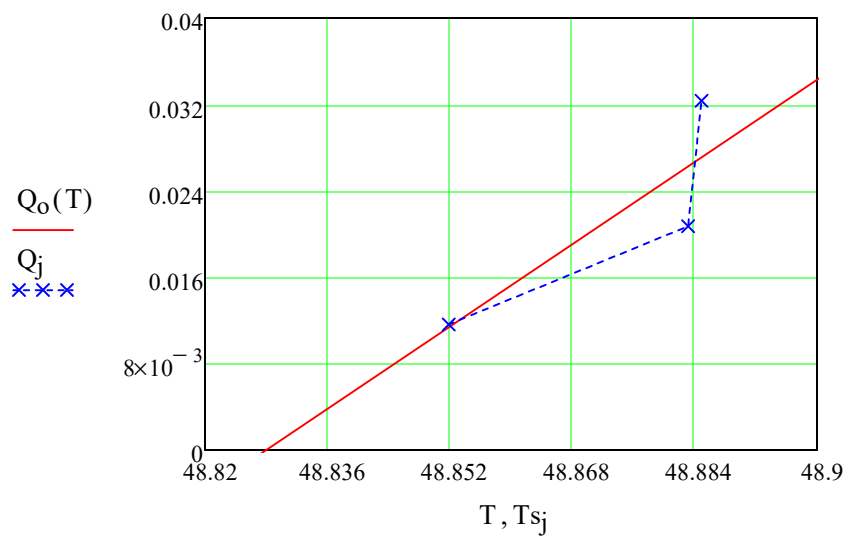
$$T := 47, 47.5 .. 50$$

$$Q = \begin{pmatrix} 0.011658 \\ 0.020729 \\ 0.032357 \end{pmatrix}$$

$$Ts := T_n$$

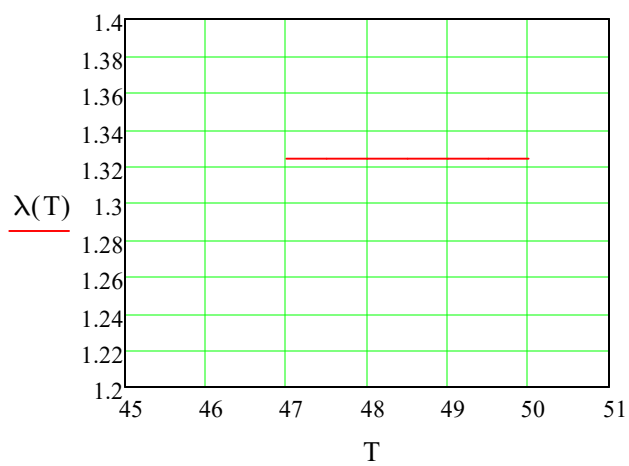
$$Q_0(T) := a_0 + a_1 \cdot T$$

$$Ts = \begin{pmatrix} 48.852 \\ 48.883 \\ 48.885 \end{pmatrix}$$



$$\lambda(T) := A \cdot (a_1)$$

$$\lambda_a := A \cdot (a_1) = 1.324$$



$$\lambda_1 := A \cdot \frac{Q_2 - Q_1}{T_{n_2} - T_{n_1}} \quad \lambda_1 = 0.805765 \quad \text{BT/mK}$$

$$\lambda_2 := A \cdot \frac{Q_3 - Q_1}{T_{n_3} - T_{n_1}} \quad \lambda_2 = 1.741246 \quad \text{BT/mK}$$

$$\lambda_3 := A \cdot \frac{Q_3 - Q_2}{T_{n_3} - T_{n_2}} \quad \lambda_3 = 18.492353 \quad \text{BT/mK}$$

Относительные локальные отклонения $d\lambda$

$$d1 := \frac{[\lambda_1 - (\lambda_a)] \cdot 100}{\lambda_a} = (-39.152) \quad \%$$

$$d2 := \frac{[\lambda_2 - (\lambda_a)] \cdot 100}{\lambda_a} = (31.493) \quad \%$$

$$d3 := \frac{[\lambda_3 - (\lambda_a)] \cdot 100}{\lambda_a} = (1.296 \times 10^{-4}) \quad \%$$

Расчет утечек тепла по приложению в лабнике.

$$c1 := 1.744 \cdot 10^{-7} \quad c2 := 2.011 \cdot 10^{-9} \quad c3 := 2.056 \cdot 10^{-6} \quad c4 := 2.056 \cdot 10^{-4} \quad c5 := 1.376 \cdot 10^{-4}$$

$$q_k := \frac{I^2 \cdot c3}{\sqrt{\lambda(T_n)} \cdot \sqrt{\left(c1 - \frac{I^2}{\lambda(T_n)} \cdot c2\right)} \cdot \left[c5 \cdot \sqrt{\left(c1 - \frac{I^2}{\lambda(T_n)} \cdot c2\right)} + 1\right]}$$

j := 2 .. 3 Утечки по проводящим проводам в режимах 2-3

$$q_k = \begin{pmatrix} 9.584 \times 10^{-5} \\ 1.704 \times 10^{-4} \\ 2.66 \times 10^{-4} \end{pmatrix}$$

$$\lambda(T_n) = 1.324$$

$$T_n = \begin{pmatrix} 48.852 \\ 48.883 \\ 48.885 \end{pmatrix}$$

2. Утечки на излучение в режимах 2-3

$$q_l := 6 \cdot 10^{-2} \cdot 5.67 \cdot 10^{-8} \cdot 93.74 \cdot 10^{-6} \cdot \left(\frac{T_n}{100}\right)^4 - \left(\frac{49.0}{100}\right)^4$$

Расчет погрешностей.

$$\Delta\lambda = \sqrt{\left(\frac{d}{dA} \lambda\right)^2 \cdot \Delta A^2 + \left[\frac{d}{d(Q_1 - Q_2)} \lambda\right]^2 \cdot \Delta(Q_1 - Q_2)^2 + \left[\frac{d}{d(T_1 - T_2)} \lambda\right]^2 \cdot \Delta(T_1 - T_2)^2}$$

$$\frac{d}{d(Q_1 - Q_2)} \lambda = L_1 = \frac{A}{T_2 - T_1} \quad \frac{d}{dA} \lambda = L_2 = \frac{Q_2 - Q_1}{T_2 - T_1}$$

$$\frac{d}{d(T_1 - T_2)} \lambda = L_3 = -\frac{A \cdot (Q_2 - Q_1)}{(T_2 - T_1)^2}$$

$$\Delta(Q_1 - Q_2) = \Delta Q_1 + \Delta Q_2 = \Delta_1 \quad \Delta(T_1 - T_2) = \Delta T_1 + \Delta T_2 = \Delta_2$$

$$\Delta U_{k_1} := 2.77 \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^5 \left[\sum_{i=1}^5 \left(\frac{1}{5} \cdot U1_{k_i} \right) - U1_{k_i} \right]^2}{5 \cdot (5 - 1)}} = 9.212 \times 10^{-6}$$

$$\Delta U_{k_2} := 2.77 \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^5 \left[\sum_{i=1}^5 \left(\frac{1}{5} \cdot U2_{k_i} \right) - U2_{k_i} \right]^2}{5 \cdot (5 - 1)}} = 2.216 \times 10^{-6}$$

$$\Delta U_{k_3} := 2.77 \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^5 \left[\sum_{i=1}^5 \left(\frac{1}{5} \cdot U3_{k_i} \right) - U3_{k_i} \right]^2}{5 \cdot (5 - 1)}} = 7.903 \times 10^{-6}$$

$$U_k := \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^5 \left(\frac{1}{5} \cdot U1_{k_i} \right) \\ \sum_{i=1}^5 \left(\frac{1}{5} \cdot U2_{k_i} \right) \\ \sum_{i=1}^5 \left(\frac{1}{5} \cdot U3_{k_i} \right) \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} 0.15 \\ 0.2 \\ 0.249 \end{pmatrix} \quad \delta U_k := \frac{\overrightarrow{\Delta U_k}}{U_k} \quad \delta U_k = \begin{pmatrix} 6.155 \times 10^{-5} \\ 1.11 \times 10^{-5} \\ 3.17 \times 10^{-5} \end{pmatrix}$$

$$\Delta U_{n_1} := 2.77 \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i = 1}^5 \left[\sum_{i = 1}^5 \left(\frac{1}{5} \cdot U1_{n_i} \right) - U1_{n_i} \right]^2}{5 \cdot (5 - 1)}} = 1.807 \times 10^{-6}$$

$$\Delta U_{n_2} := 2.77 \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i = 1}^5 \left[\sum_{i = 1}^5 \left(\frac{1}{5} \cdot U2_{n_i} \right) - U2_{n_i} \right]^2}{5 \cdot (5 - 1)}} = 2.486 \times 10^{-6}$$

$$\Delta U_{n_3} := 2.77 \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i = 1}^5 \left[\sum_{i = 1}^5 \left(\frac{1}{5} \cdot U3_{n_i} \right) - U3_{n_i} \right]^2}{5 \cdot (5 - 1)}} = 2.383 \times 10^{-6}$$

$$U_n := \begin{bmatrix} \sum_{i = 1}^5 \left(\frac{1}{5} \cdot U1_{n_i} \right) \\ \sum_{i = 1}^5 \left(\frac{1}{5} \cdot U2_{n_i} \right) \\ \sum_{i = 1}^5 \left[\frac{1}{5} \cdot (U3_n)_i \right] \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} 0.078 \\ 0.104 \\ 0.13 \end{pmatrix}$$

$$\overset{\longrightarrow}{\delta U_n} := \frac{\Delta U_n}{U_n} \qquad \delta U_n = \begin{pmatrix} 2.32 \times 10^{-5} \\ 2.393 \times 10^{-5} \\ 1.836 \times 10^{-5} \end{pmatrix} \qquad \Delta Q = Q \cdot \sqrt{\delta U_k^2 + \delta U_n^2 + 0.0001^2}$$

$$\Delta T = \left| 759.9 - 2 \cdot 345 \cdot R_n \right| \cdot R_n \cdot \sqrt{\delta U_k^2 + \delta U_n^2 + 0.0001^2}$$

$$R_n := \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^5 \left(\frac{1}{5} \cdot R1_{n_i}\right) \\ \sum_{i=1}^5 \left(\frac{1}{5} \cdot R2_{n_i}\right) \\ \sum_{i=1}^5 \left(\frac{1}{5} \cdot R3_{n_i}\right) \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} 0.52 \\ 0.521 \\ 0.521 \end{pmatrix}$$

$$\begin{array}{c} \xrightarrow{\hspace{10cm}} \\ \Delta1_{\text{wavy}} := \left|759.9 - 2 \cdot 345 \cdot R_n\right| \cdot R_n \cdot \sqrt{\left(\delta U_k\right)^2 + \left(\delta U_n\right)^2 + 0.0001^2} \\ \xrightarrow{\hspace{10cm}} \\ \Delta2_{\text{wavy}} := Q \cdot \sqrt{\left(\delta U_k\right)^2 + \left(\delta U_n\right)^2 + 0.0001^2} \end{array}$$

$$\Delta2_{\text{wavy}} := 2 \Delta1$$

$$\Delta1_{\text{wavy}} := 2 \Delta2$$

$$\begin{array}{lll} L1_1 := \frac{A}{T_{n_2} - T_{n_1}} & L1_2 := \frac{A}{T_{n_3} - T_{n_1}} & L1_3 := \frac{A}{T_{n_3} - T_{n_2}} \\ L2_1 := \frac{Q_2 - Q_1}{T_{n_2} - T_{n_1}} & L2_2 := \frac{Q_3 - Q_1}{T_{n_3} - T_{n_1}} & L2_3 := \frac{Q_3 - Q_2}{T_{n_3} - T_{n_2}} \end{array}$$

$$L3_1 := \frac{A \cdot \left(Q_2 - Q_1\right)}{\left(T_{n_2} - T_{n_1}\right)^2} \quad L3_2 := \frac{A \cdot \left(Q_3 - Q_1\right)}{\left(T_{n_3} - T_{n_1}\right)^2} \quad L3_3 := \frac{A \cdot \left(Q_3 - Q_2\right)}{\left(T_{n_3} - T_{n_2}\right)^2} \quad \lambda_{\text{wavy}} := \begin{pmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \lambda_3 \end{pmatrix}$$

$$j := 1..3$$

$$\Delta\lambda_{\text{wavy}} := \sqrt{\left(L2\right)^2 \cdot \Delta A^2 + \left(L1\right)^2 \cdot \Delta_1^2 + \left(L3\right)^2 \cdot \Delta_2^2}$$

$$\Delta\lambda = \begin{pmatrix} 1.286 \\ 2.273 \\ 470.05 \end{pmatrix}$$

$$\overset{\longrightarrow}{\delta\lambda} := \frac{\Delta\lambda \cdot 100}{\lambda}$$

$$\delta\lambda = \begin{pmatrix} 159.541 \\ 130.561 \\ 2.542 \times 10^3 \end{pmatrix}$$

