



«Комплексный подход к формированию технических требований к резисторам заземления нейтрали: нормативная база и моделирование термозлектрических процессов в «COMSOL»

IV Всероссийская научно-практическая конференция «Режимы нейтрали. Ограничение перенапряжений. Релейная защита и автоматика – 2025»

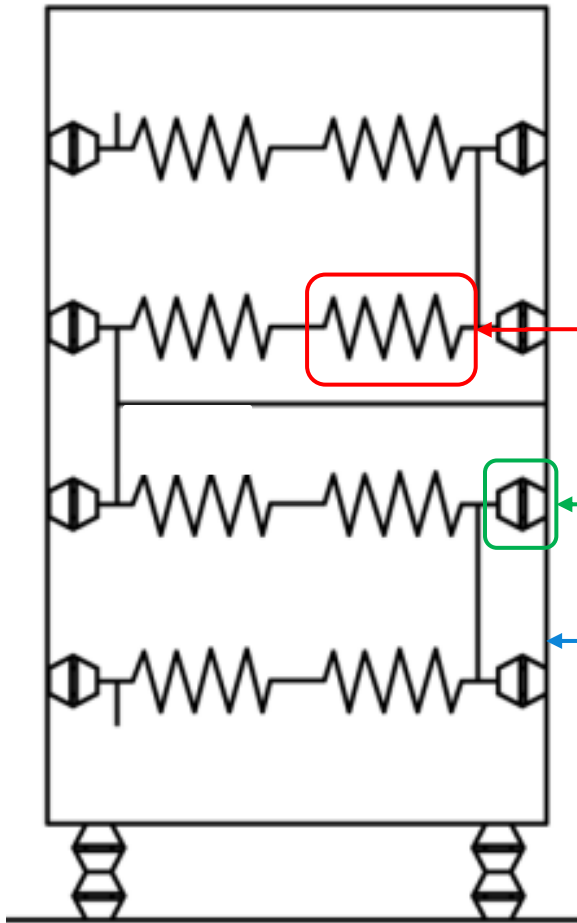
Труханов Павел Андреевич

Ассистент кафедры «Электрические станции» ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ», Москва

ТИПОВАЯ КОНСТРУКЦИЯ РЗН

Изоляция, активная часть, охлаждение, корпус

Конструкция РЗН



Элементы РЗН

Резистивный элемент – элемент активной части резистора заземления нейтрали, через который протекает электрический ток

Резистивный элемент выполняется в виде: **пластин** или проволочных спиралей

Активная часть – это один или несколько электрически соединенных резистивных элементов

Исполнение изоляции: опорные или проходные изоляторы

Корпус – IP 23 или IP 21, выполняется из оцинкованная стали.

Способ охлаждения – естественное воздушное

ТЕХНИЧЕСКИЕ ТРЕБОВАНИЯ К РЗН

Номинальные параметры и предельно допустимые значения РЗН



Электрическая прочность изоляции

1. Класс напряжения сети, кВ
2. Номинальное и наибольшее рабочее напряжение, кВ
3. Испытательное напряжение изоляторов, кВ

Класс напряжения электрооборудования [1] – номинальное **междуфазное** напряжение электрической сети, для работы в которой предназначено электрооборудование

Класс напряжения сети [2], кВ	Номинальное напряжение, кВ	Наибольшее рабочее напряжение, кВ
6	$6/\sqrt{3}$	$7,2/\sqrt{3}$
10	$10/\sqrt{3}$	$12/\sqrt{3}$
20	$20/\sqrt{3}$	$24/\sqrt{3}$
35	$35/\sqrt{3}$	$40,5/\sqrt{3}$

Термическая стойкость

1. Номинальный ток, А
2. Длительно-допустимый ток низкоомного РЗН, А
3. Предельно допустимые температуры, °С

Сопротивление и допустимое отклонение при ОЗЗ

1. Активное сопротивление резистора при 20°C, Ом
2. Температурный коэффициент сопротивления, 1/°С
3. (Предельное отклонение сопротивления при нагреве в режиме ОЗЗ), %

ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРОЧНОСТЬ ИЗОЛЯЦИИ

Испытательные напряжения



Испытательные одноминутные напряжения в зависимости от напряжения сети

Испытательное одноминутное напряжение РЗН должно соответствовать испытательным напряжениям для проходных и опорных **изоляторов [1]**. **Рекомендуемый** уровень изоляции – (а)

Класс напряжения сети [1], кВ	Уровень изоляции	Испытательные напряжения, кВ	
		В сухом состоянии	Под дождем
6	(а)	10	10
	а	10	10
10	(а)	20	28
	а	28	28
20	(а)	50	50
	а	50	50
35	а	80	90
	б	95	80

[1] - ГОСТ Р 55195

ТЕРМИЧЕСКАЯ СТОЙКОСТЬ

Номинальный ток РЗН



Определение

Номинальный ток РЗН – максимально допустимая величина тока, протекающего через РЗН в течение кратковременного (**10 секунд**) для **низкоомного РЗН** или длительного (**не менее 24 часов**) для **высокоомного РЗН** времени, при наибольшем рабочем напряжении сети.

Предельно допустимые значения токов:

- **Низкоомный** – любые значения
- **Высокоомный** – значения не выше приведенных в таблице [1]

Предельные значения тока высокоомного резистора

	Кабели и ВЛ без железобетонных и металлических опор, кВ			Сети свыше 35кВ и ВЛ на железобетонных и металлических опорах 3—20кВ
	6	10	20	35
Ток РЗН	$30/\sqrt{2}$	$20/\sqrt{2}$	$10/\sqrt{2}$	$10/\sqrt{2}$

ТЕРМИЧЕСКАЯ СТОЙКОСТЬ

Длительно допустимый ток низкоомного резистора



Определение

Длительно допустимый ток низкоомного резистора заземления нейтрали – максимально допустимая величина тока, который может протекать через РЗНН без риска его термического разрушения в течение длительного времени при наибольшем рабочем напряжении сети.

Мощность низкоомного резистора

$$P_{\text{ном}} = \frac{U_{\text{наб.раб}}}{\sqrt{3}} I_{\text{длит.доп}}$$

$P_{\text{ном}}$ - номинальная мощность низкоомного резистора

$U_{\text{наб.раб}}$ - наибольшее рабочее напряжение сети

$I_{\text{длит.доп}}$ - длительно-допустимый ток

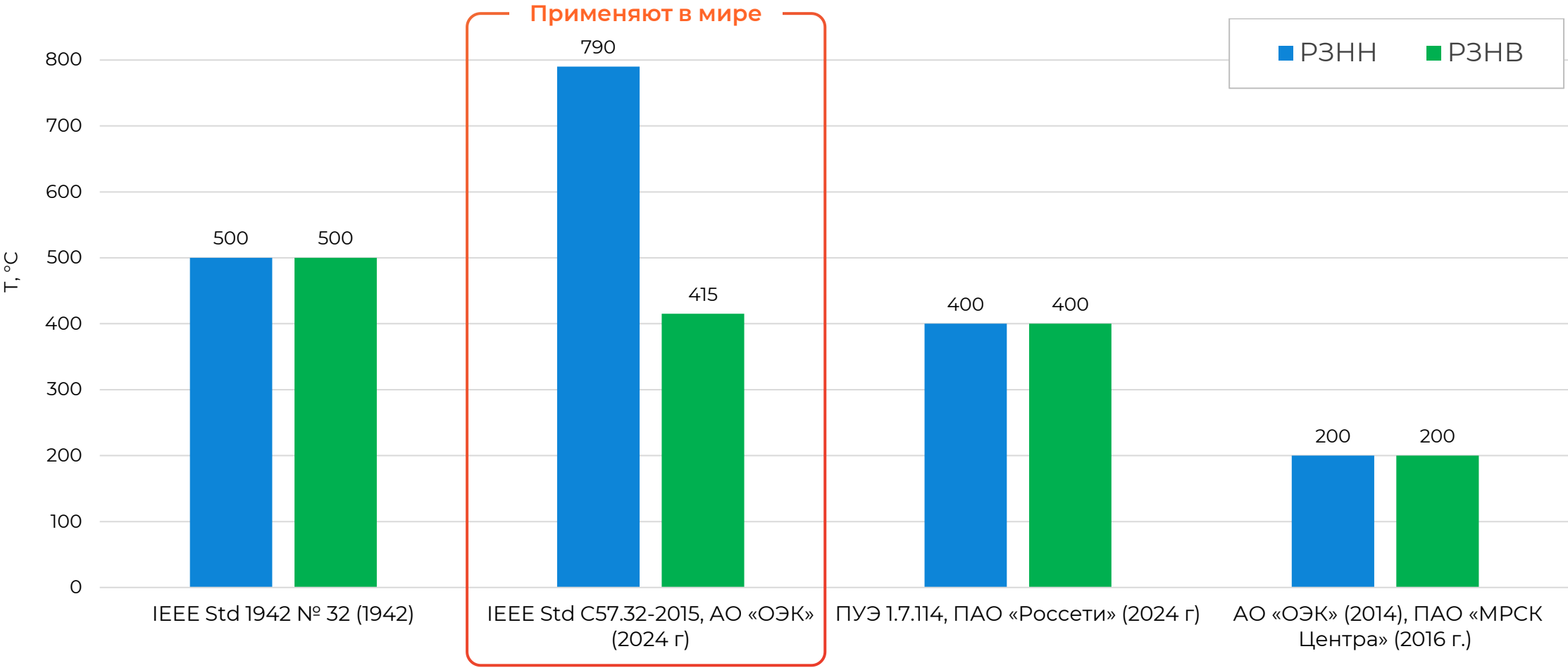
Если использовать номинальный ток низкоомного резистора, то полученная мощность называется **«рассеиваемой»** мощностью

ТЕРМИЧЕСКАЯ СТОЙКОСТЬ

Предельно допустимые температуры нагрева активной части РЗН



Предельно допустимые температуры нагрева по требованиям зарубежных и отечественных стандартов

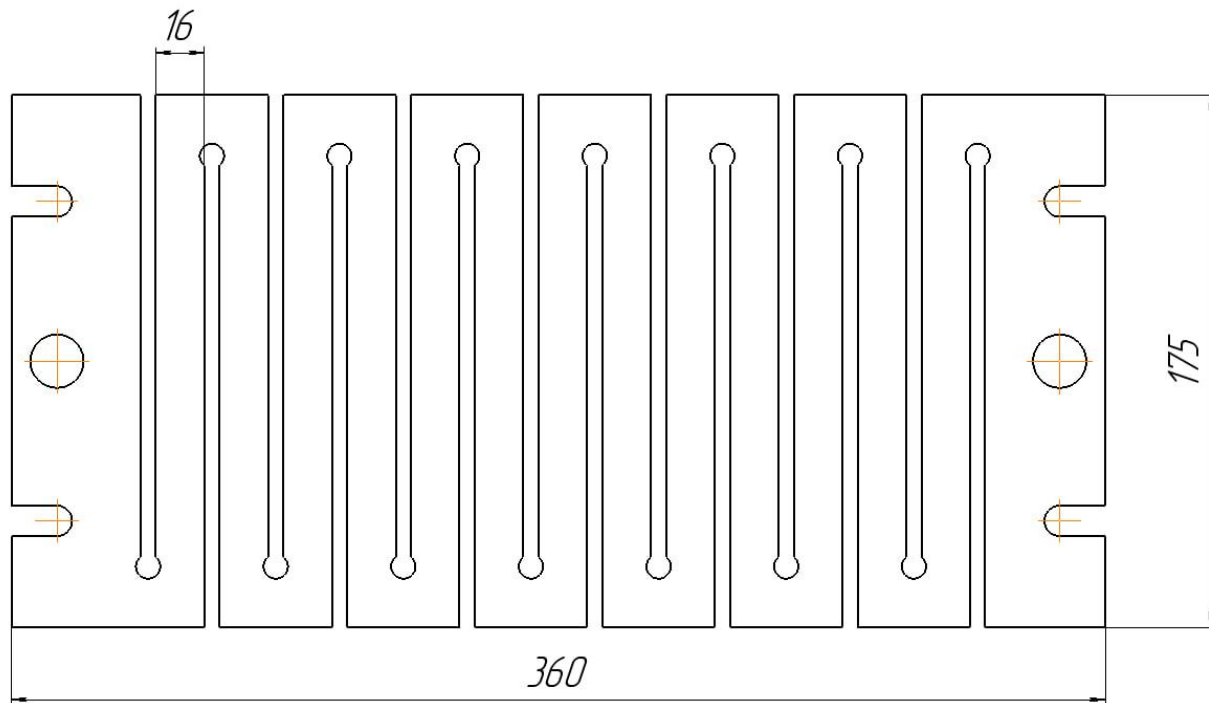


ТЕРМИЧЕСКАЯ СТОЙКОСТЬ

Моделирование нагрева резистивного элемента в «COMSOL»



Геометрия пластины РЗН



Уравнение теплового баланса

$$I^2 R dt = c d\theta + \alpha F \theta dt$$

I - ток через резистивный элемент

R - сопротивление резистивного элемента

c – теплоемкость материала

$\alpha F \theta$ – рассеиваемая теплота в окружающая среда

Решение дифф. уравнения:

$$\theta = \theta_{уст} (1 - e^{-\tau/t})$$

Полезная выделяемая теплота:

$$Q = V \rho C \Delta \theta$$

Материалы пластины РЗН

Нихром

X20H80, X15H60

Нержавеющие стали

AISI 304, AISI 410

Фехраль

X20H80, X15H60

ТЕРМИЧЕСКАЯ СТОЙКОСТЬ

Метод моделирования «COMSOL»



Пластина низкоомного резистора

- Значения токов: 500, 1000 А
- Номинальное сопротивление – 12, 24 Ом
- (Номинальное напряжение 20 кВ)
- Предельно допустимые значения температур: 400, 790 °С

Пластина высокоомного резистора

- Значения токов: $10/\sqrt{2}$, $15/\sqrt{2}$
- Номинальное сопротивление – 1633, 1195 Ом
- (Номинальное напряжение 20 кВ)
- Предельно допустимые значения температур: 400 °С

Цель и задачи

Цель: оценить влияние ограничения предельно-допустимых значений температур на стоимость активной части резистора заземления нейтрали.

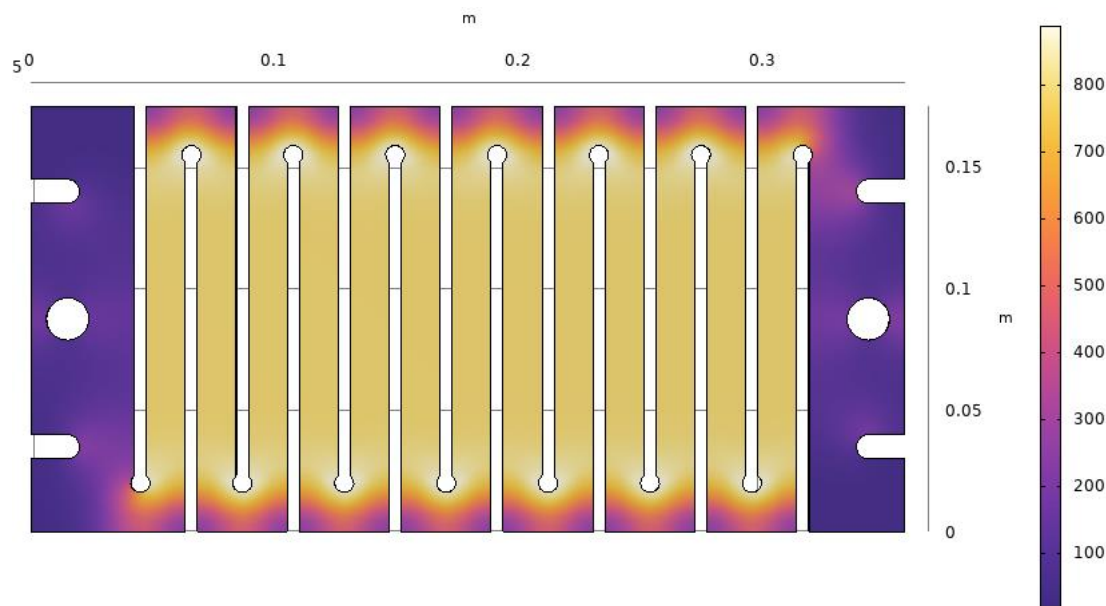
Задачи:

- подобрать значение толщины пластины при фиксированной длине и высоте для не превышения предельно допустимых температур при заданном значении тока
- на основе данных толщин рассчитать массу материала и стоимость активной части резистора

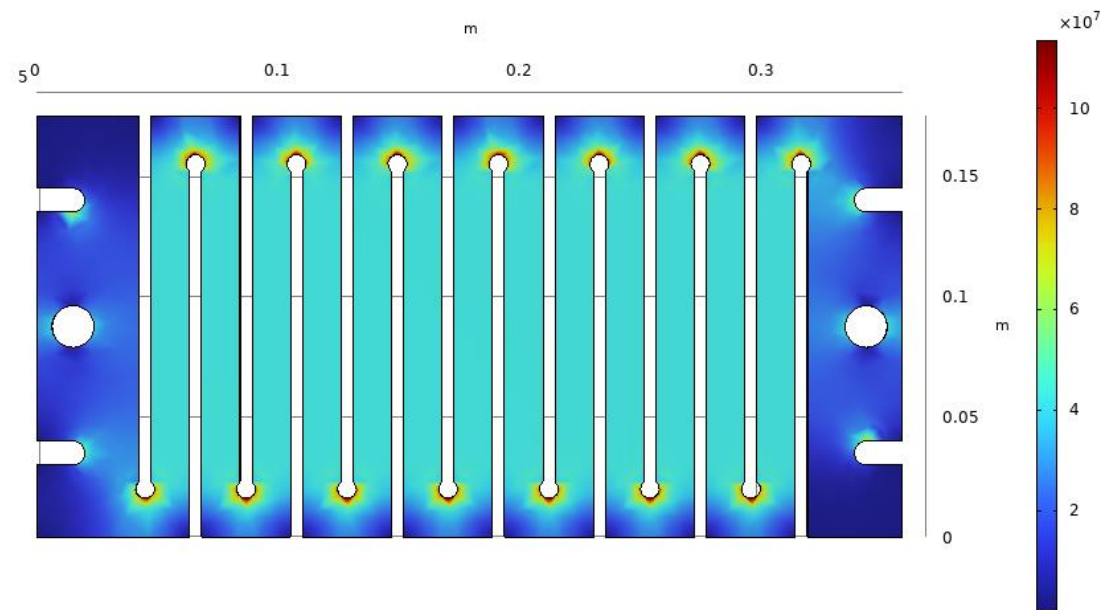
ТЕРМИЧЕСКАЯ СТОЙКОСТЬ

Пример моделирования пластины РЗН в «COMSOL»

Распределение нагрева пластинки, °C



Распределение плотности тока, А/мм2

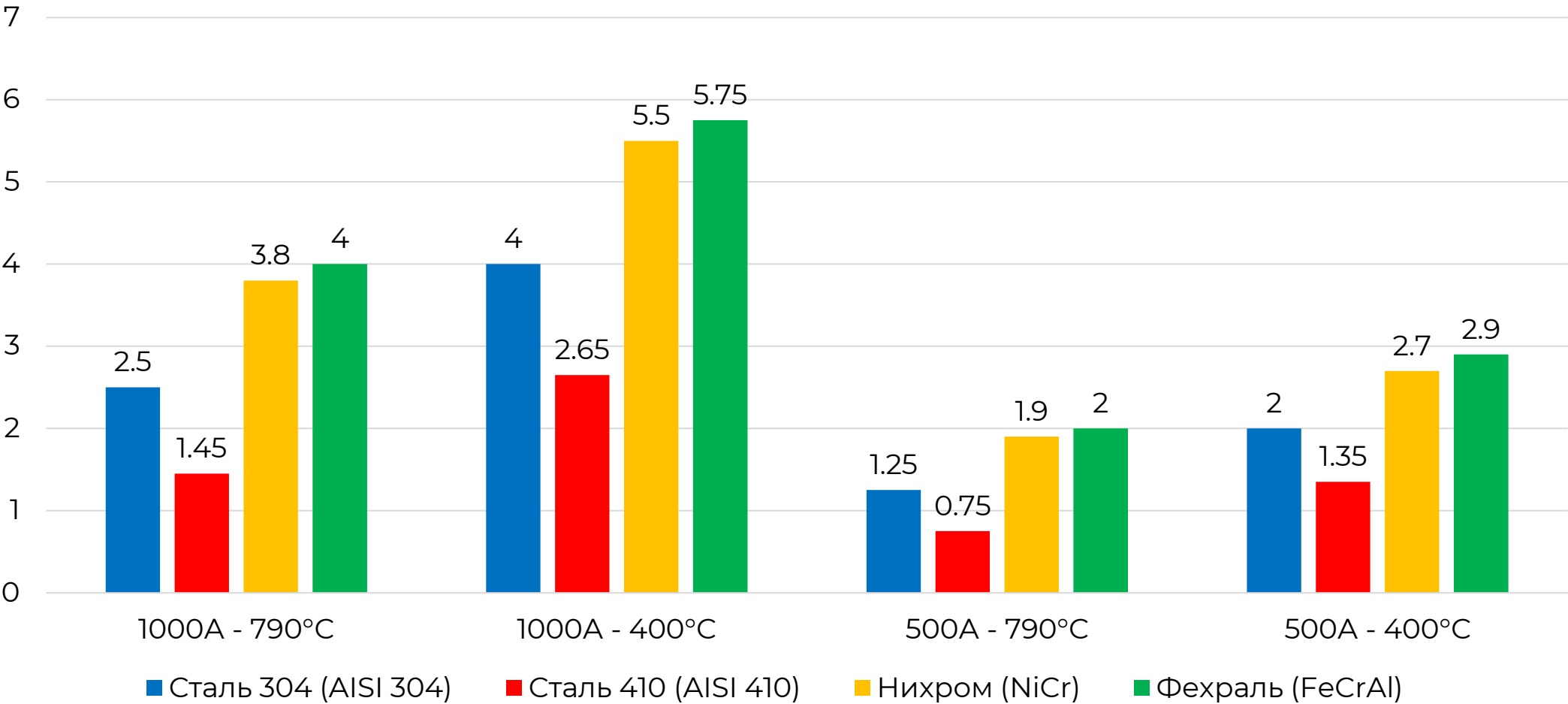


ТЕРМИЧЕСКАЯ СТОЙКОСТЬ

Расчет толщин пластин низкоомного РЗН в «COMSOL»



Толщины пластин разных марок сталей в зависимости от тока и допустимой температуры нагрева, мм

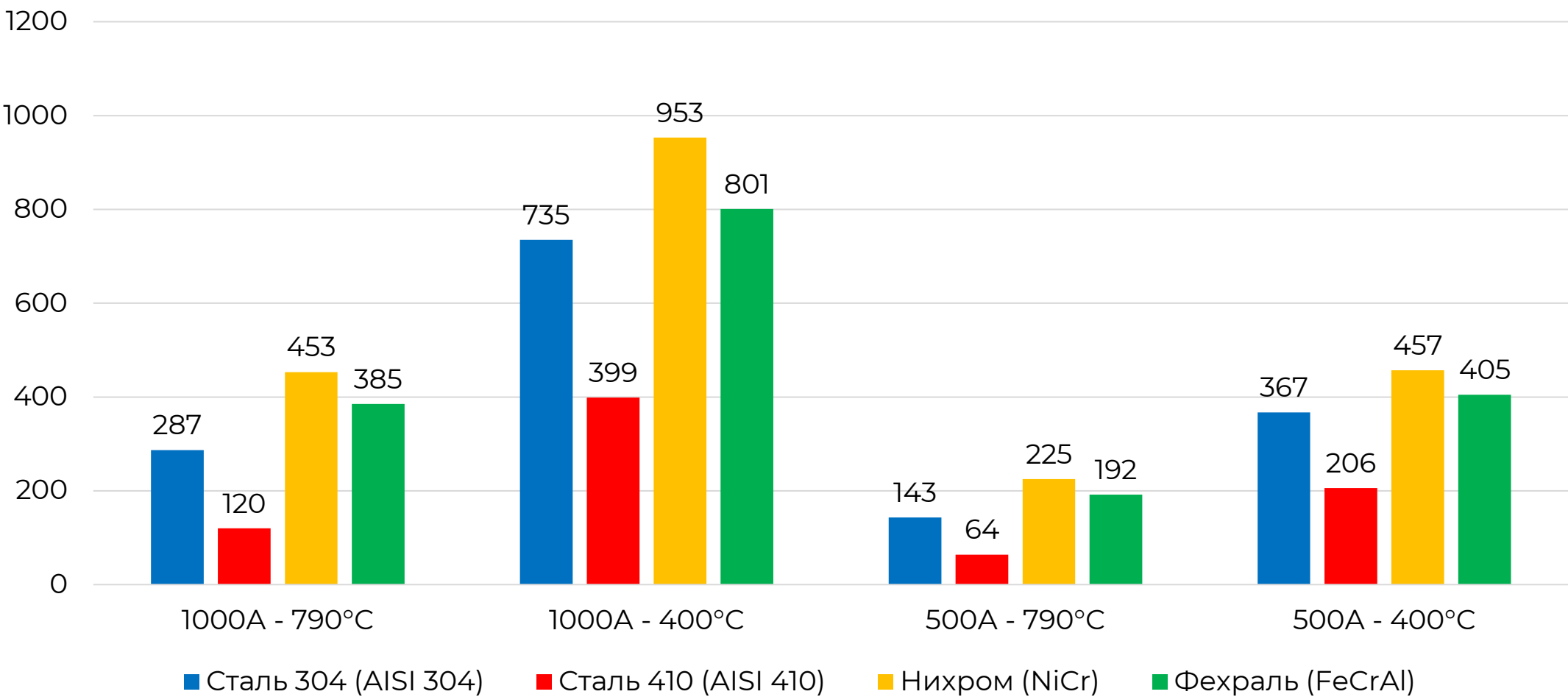


ТЕРМИЧЕСКАЯ СТОЙКОСТЬ

Расчет массы низкоомного резистора



Массы РЗНН из разных марок сталей в зависимости от тока и допустимой температуры нагрева, кг

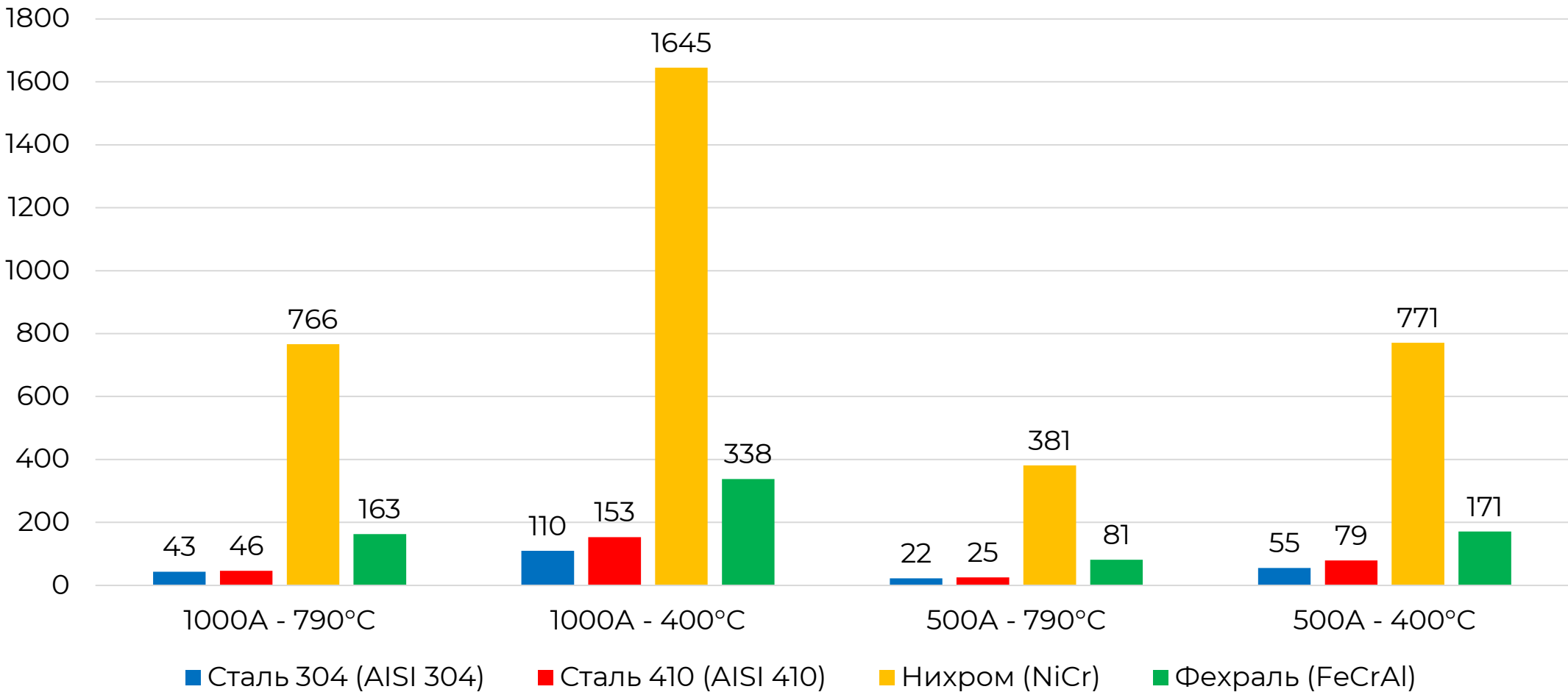


ТЕРМИЧЕСКАЯ СТОЙКОСТЬ

Расчет стоимости активной части низкоомного резистора



Стоимость материала АЧ* РЗНН в зависимости от тока и допустимой температуры нагрева, тыс. рублей



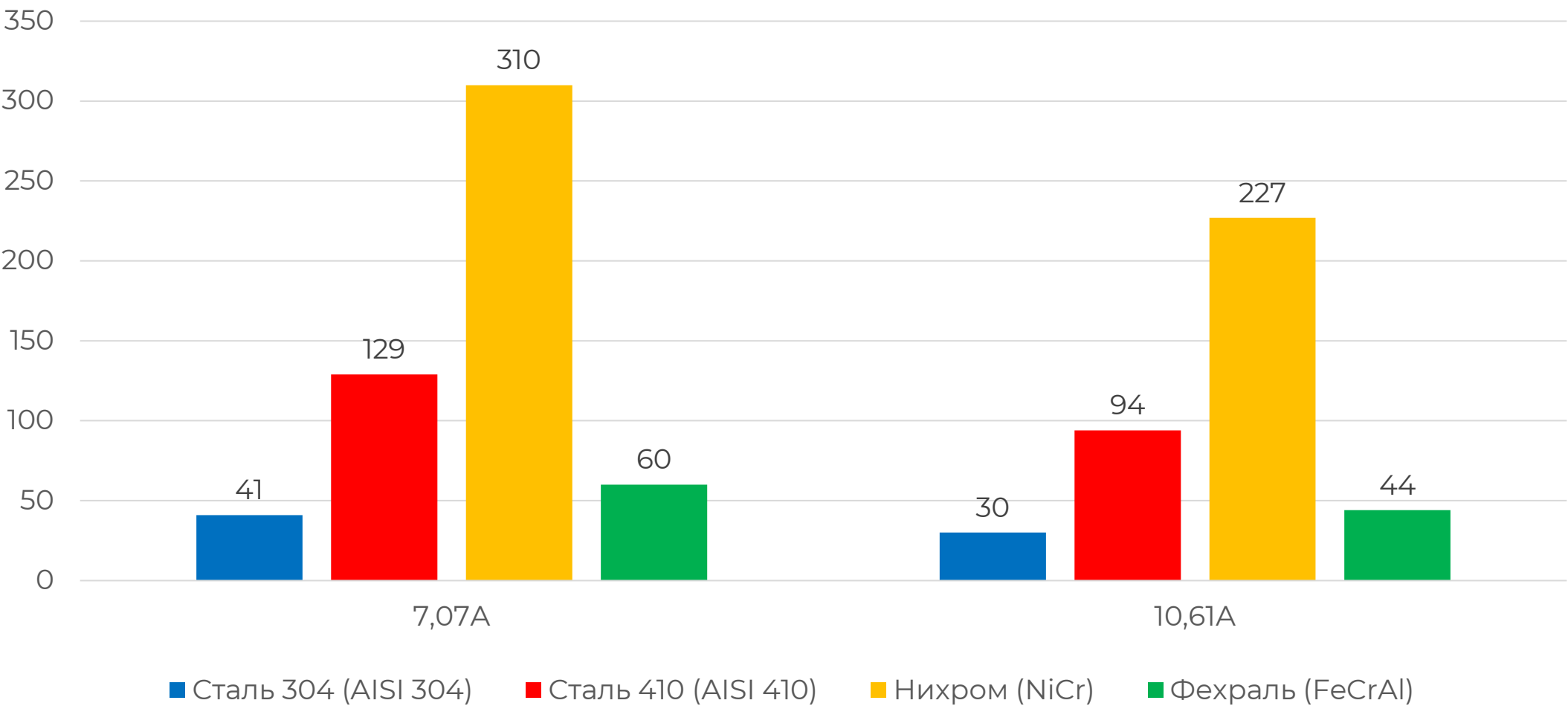
*АЧ – активной части; Цены для расчета по данным РусЭнерго Комплексное снабжение

ТЕРМИЧЕСКАЯ СТОЙКОСТЬ

Расчет стоимости активной части высокоомного резистора



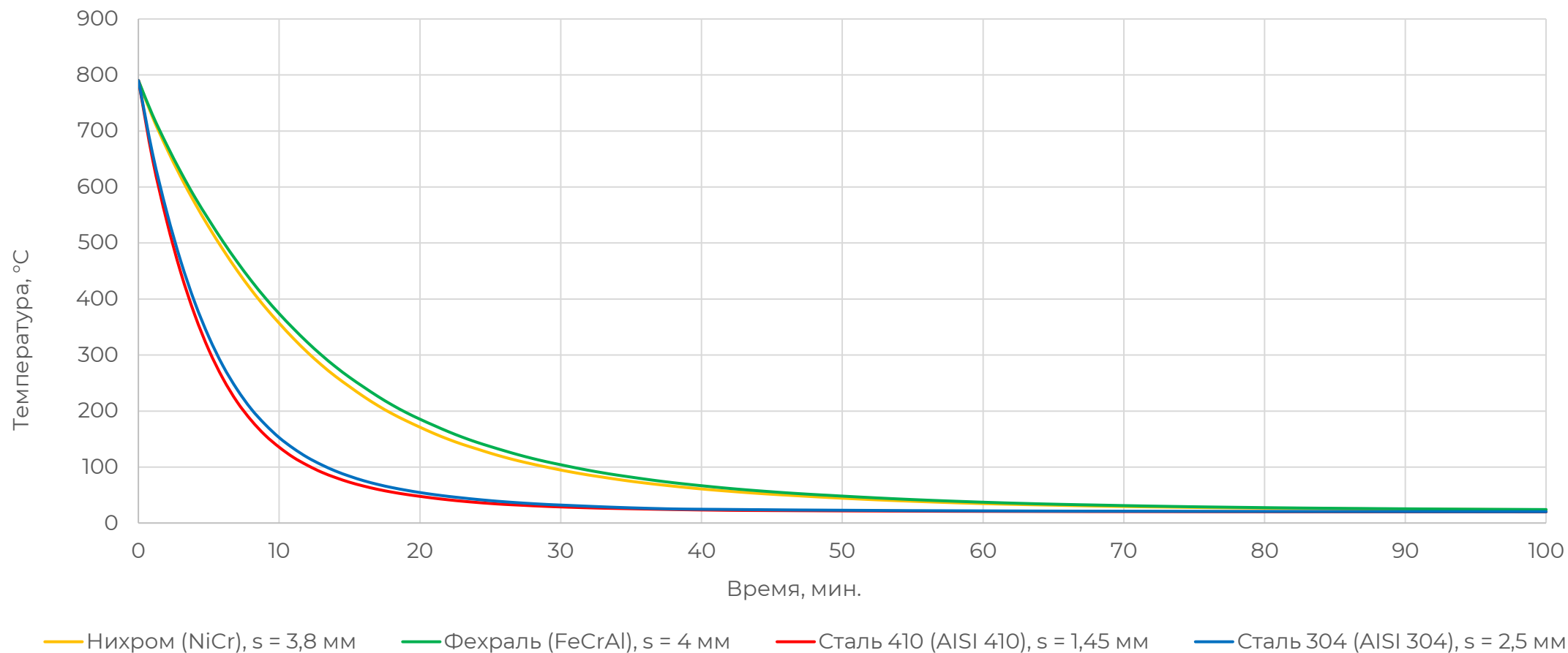
Стоимость материала АЧ* РЗНВ в зависимости от тока и допустимой температуры нагрева, тыс. рублей



*АЧ – активной части; Цены для расчета по данным РусЭнерго Комплексное снабжение

ТЕРМИЧЕСКАЯ СТОЙКОСТЬ

Температура пластины РЗНН при остывании в условиях естественной конвекции при окружающей температуре воздуха 20°C в зависимости от материала и толщины пластины (s)



СОПРОТИВЛЕНИЕ И ДОПУСТИМОЕ ОТКЛОНЕНИЕ

Температурный коэффициент сопротивления



Формула

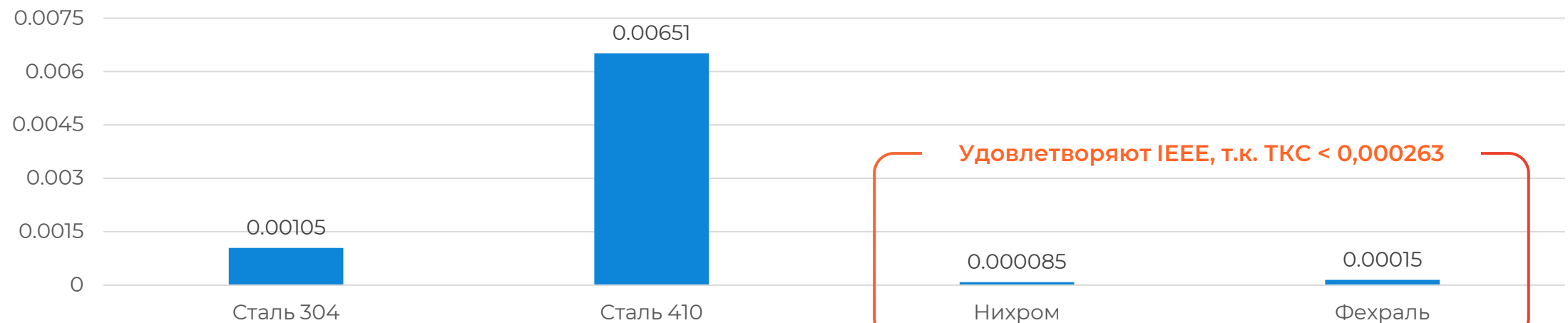
$$R = R_0(1 + \alpha\Delta\theta)$$

R_0 - начальное сопротивление резистора

α - температурный коэффициент сопротивления

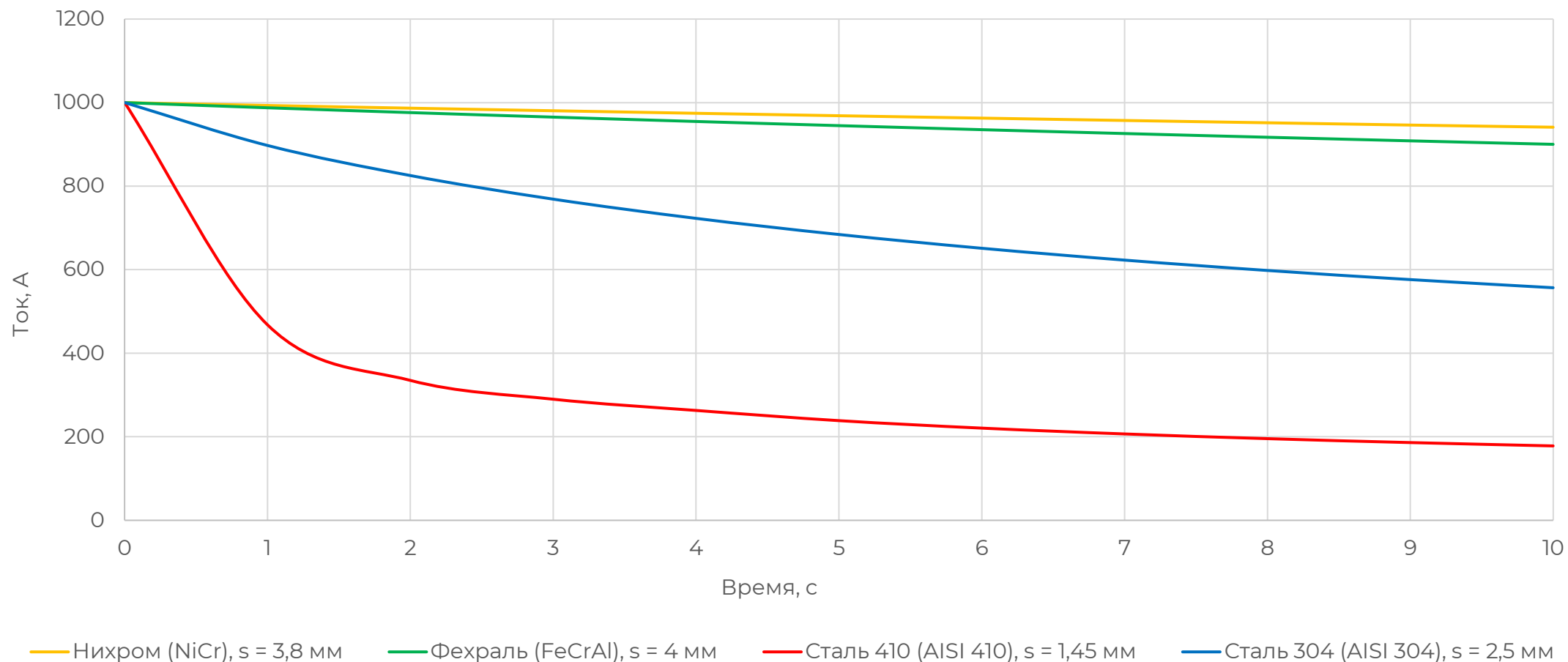
$(\Delta\theta)$ - изменение температуры активной части резистора

ТКС материалов



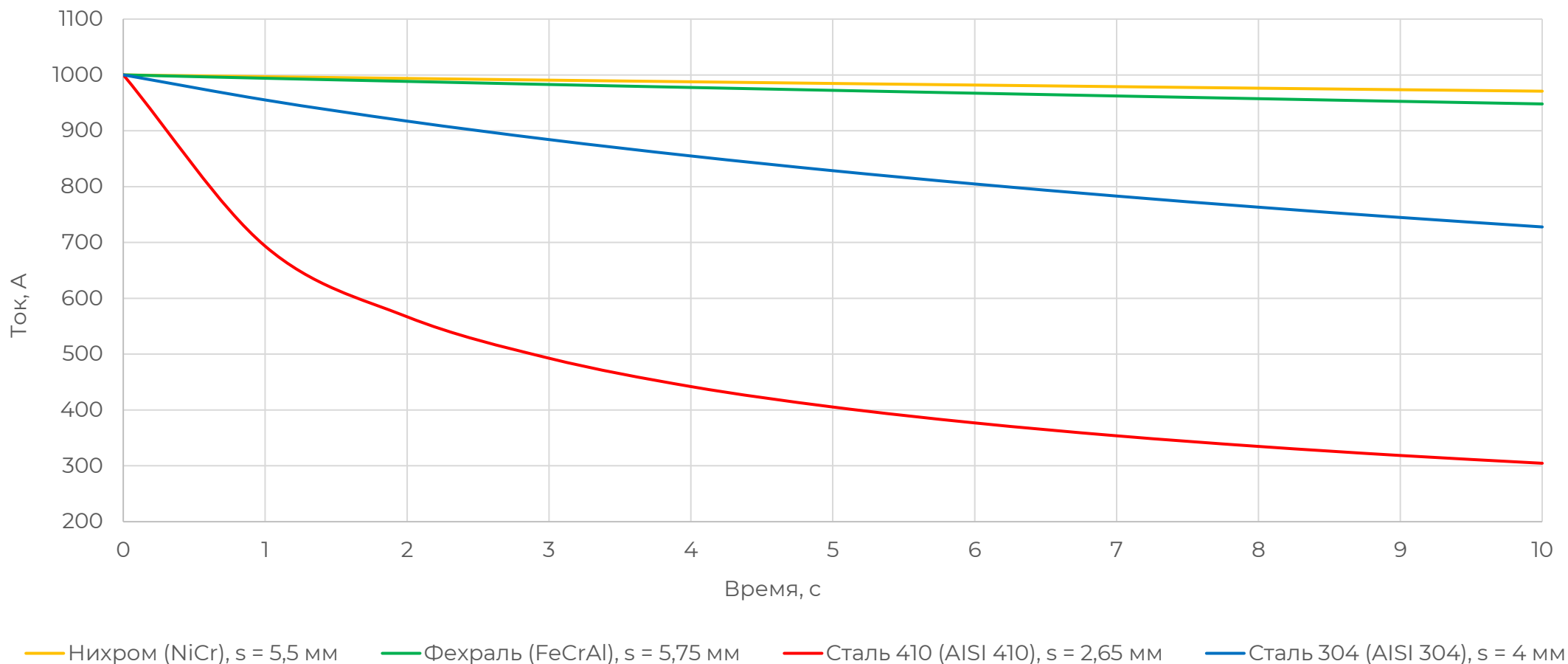
СОПРОТИВЛЕНИЕ И ДОПУСТИМОЕ ОТКЛОНЕНИЕ

Изменение тока через пластину РЗНН при протекании в нулевой момент времени 1000А в зависимости от материала и толщины пластины (s). Температура нагрева за 10 секунд = 790°C



СОПРОТИВЛЕНИЕ И ДОПУСТИМОЕ ОТКЛОНЕНИЕ

Изменение тока через пластину РЗНН при протекании в нулевой момент времени 1000А в зависимости от материала и толщины пластины (s). Температура нагрева за 10 секунд = 400°C



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты исследования



Электрическая прочность изоляции

- Испытательные напряжения должны соответствовать испытательным для изолятор по ГОСТ Р 55195

Термическая стойкость

- Для низкоомного резистора заземления нейтрали необходимо нормировать длительно-допустимый ток
- Температуры должны быть нормированы для низкоомного резистора 790 °C, для высокоомного резистора 415 °C
- Время термической стойкости низкоомного резистора рекомендуется принять 10 секунд.

Сопротивление и допустимое отклонение при ОЗЗ

- Рекомендуется создавать резистор заземления нейтрали из прецизионных сплавов (нихром, фехраль).
- Допустимое отклонение сопротивление резистора заземления нейтрали не должно превышать 20% от начального значения.