

Санкт-Петербургский политехнический университет
Петра Великого
Институт компьютерных наук и технологий
Кафедра «Системный анализ и управление»

Симаков Игорь Павлович

Лекция на тему:

**СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ ПРОБЛЕМ ОБЕСПЕЧЕНИЯ
ПОЖАРОБЕЗОПАСНОСТИ АППАРАТУРЫ
АВТОМАТИКИ И РАЗВИТИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ
МОДЕЛЕЙ, МЕТОДОВ И СРЕДСТВ
ДЛЯ ИХ РЕШЕНИЯ**

Санкт-Петербург

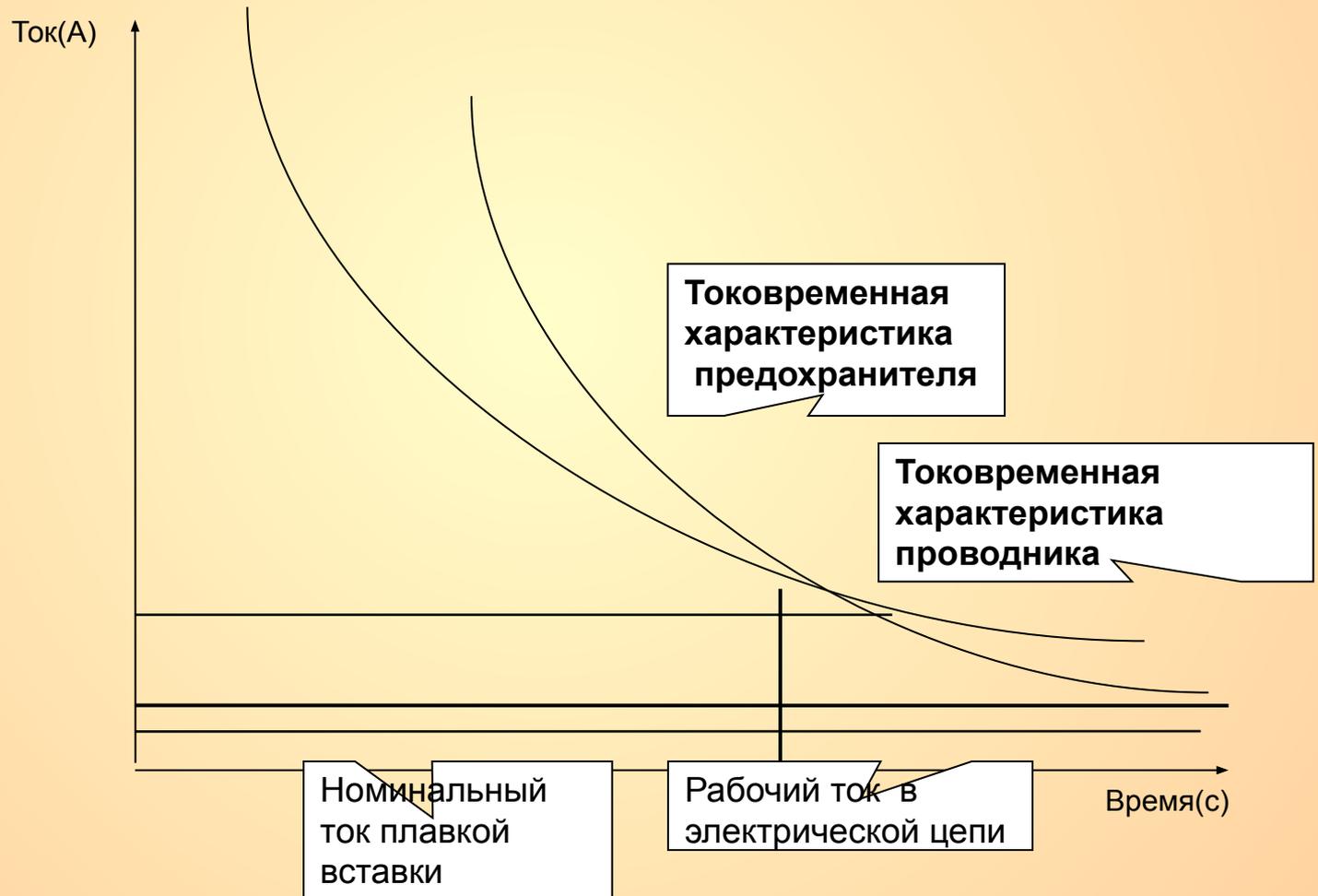
Цели и задачи исследований

1. Развитие математических моделей и методов анализа физических и физико-химических процессов в электрических цепях систем автоматики (контроля и управления) при возможных коротких замыканиях и перегрузках с выявлением закономерностей и условий возгорания электропроводок (в том числе в отдаленных от места возникновения дефектов помещениях).
2. Разработка теоретико-методологических основ для создания инженерной расчетной методики с программным обеспечением, позволяющей для схем любой сложности и конфигурации и выявить потенциально пожароопасные участки схемы и осуществить согласованный выбор типов и сечений проводников и устройств защиты (предохранителей и/или автоматических выключателей), исключающих возможность возгорания при полных и неполных КЗ и перегрузках.
3. Выработка предложений по совершенствованию средств защиты электрических цепей от возгораний при КЗ и перегрузках и принципам сверхраннего обнаружения предпосылок к возгоранию электропроводок и монтажа приборов.

ПРЕДПОСЫЛКИ К ПОСТАНОВКЕ ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ

1. Установлено, что причиной подавляющего числа возгораний и пожаров является недостаточная теоретическая и экспериментальная проработка вопросов организации защиты электропроводок, приборного монтажа аппаратуры автоматики и электрических цепей от токов К.З. и перегрузок, в том числе и при старении материалов.
2. Действующие НТД и принятые в них критерии по защите электрических цепей и согласованному выбору предохранителей (автоматов защиты) и сечений и марок проводов подвергаются хотя и резкой, но справедливой критике.
3. Проблема проектирования пожаробезопасной аппаратуры систем «упирается» прежде всего в отсутствие информации о токовременных характеристиках (ТВХ) проводов. Для предохранителей и автоматов защиты такие характеристики известны из ТУ, Паспортов и Руководств по эксплуатации.
4. Только совместный анализ ТВХ проводов и ТВХ ПР путем их наложения друг на друга позволит объективно оценить возможность возгорания изоляции и осуществить при проектировании грамотный выбор типов и сечений проводников и средств защиты.
5. Экспериментальное определение ТВХ проводов для всей номенклатуры проводов, сечений, материала оболочки (изоляция), внешних условий не может быть в принципе выполнено (и не только из-за необеспеченности финансированием).
6. Выход один – в разработке адекватных математических моделей для получения ТВХ проводов с проведение «разумного» числа экспериментов для определение небольшого числа параметров модели (в частности, коэффициентов теплообмена)

Содержательная постановка задачи



Несколько «житейских» соображений:

1. Изоляция электропроводки и кабелей – неконтролируемый и неохраняемый склад горючих материалов.
2. Удельная теплотворная способность, например, проводников с поливинилхлоридной изоляцией = 7500 ккал/кг (как и у АНТРОЦИТА !).
3. Проводники являются и источниками зажигания при К.З. и перегрузках, и горючим веществом. А с окислителем проблем нет.
4. Внешним признаком перегрузки кабельных изделий является их перегрев, приводящий к возможному зажиганию изоляции.

Пример стандарта

«Защита электрических цепей. выбор предохранителей»

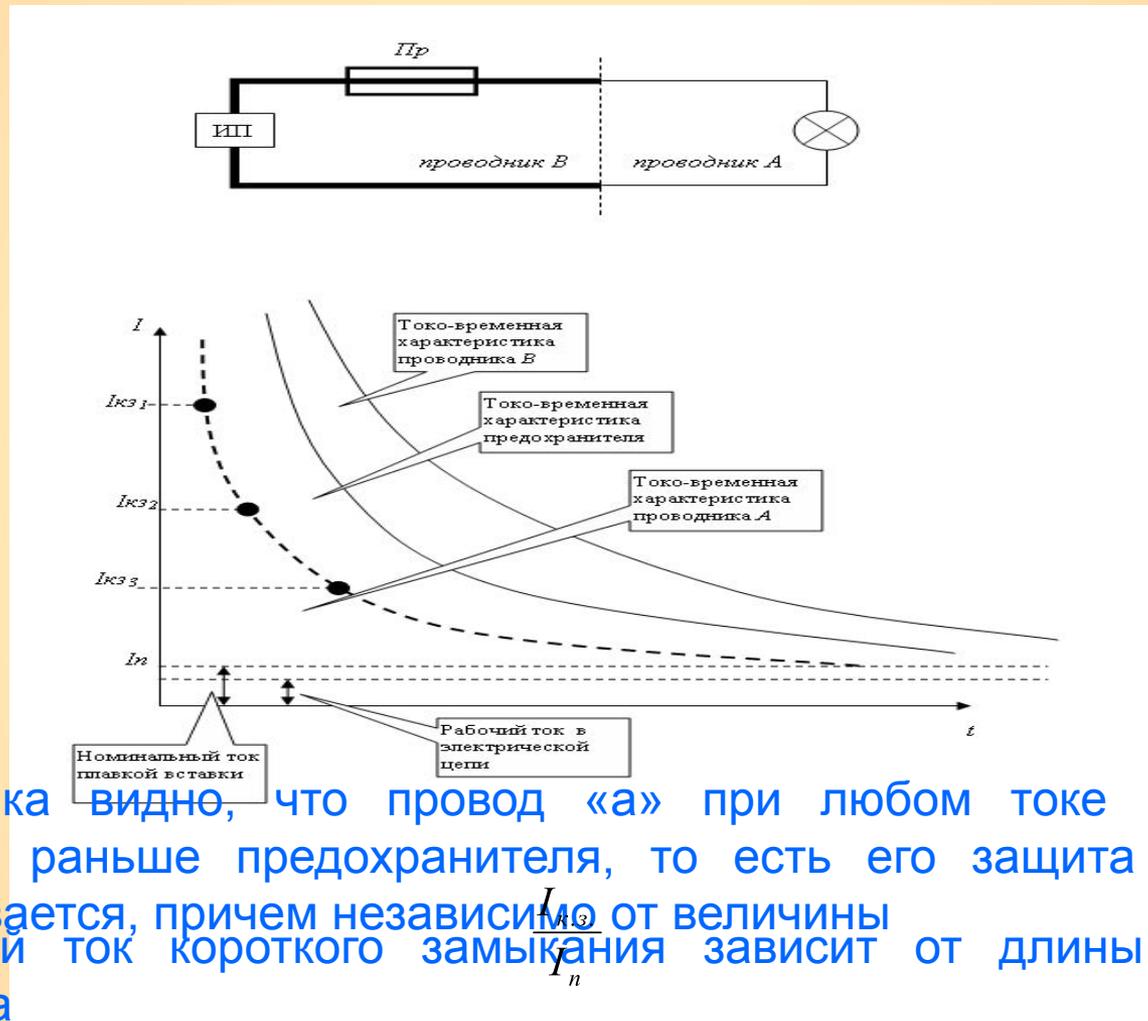
Критерием защищенности цепи от токов короткого замыкания (к.з.)

принято неравенство

$$\frac{I_{к.з.}}{I_n} > 2,5$$

где $I_{к.з.}$ - расчетный ток короткого замыкания,
 I_n - номинальный ток плавкой вставки.

Электрическая цепь с последовательно включенными проводами различного сечения



Из графика видно, что провод «а» при любом токе К.З. перегорит раньше предохранителя, то есть его защита не обеспечивается, причем независимо от величины

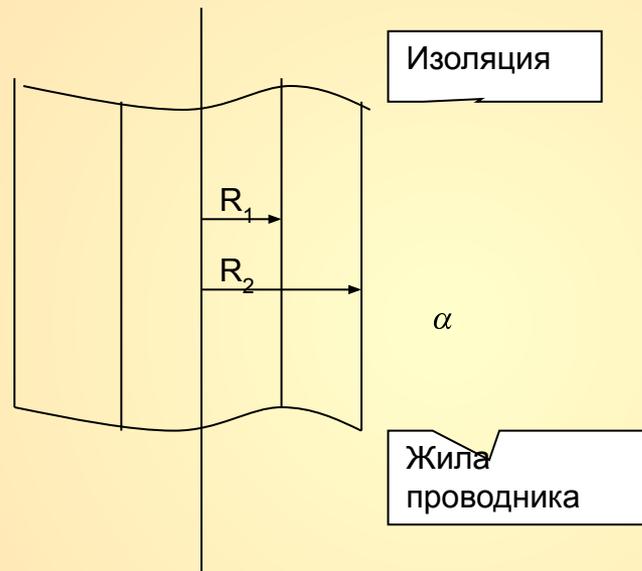
Расчетный ток короткого замыкания зависит от длины цепи, характера

замыкания и может иметь различные значения (см. на графике

значения $I_{кз.1}$, $I_{кз.2}$, $I_{кз.3}$,

тока К.З.

Модель для расчета нестационарного температурного поля в двухслойной конструкции системы «проводник – изолятор» при К.З. и перегрузках



Температуру плавления изоляции принимаем за ограничение как для адекватности моделей математической физики, так и для фиксации критических для возгорания изоляции температур (консервативная оценка) $T_1(R_1, t) = T_2(R_1, t) < T_{\text{плавления изоляции}}$

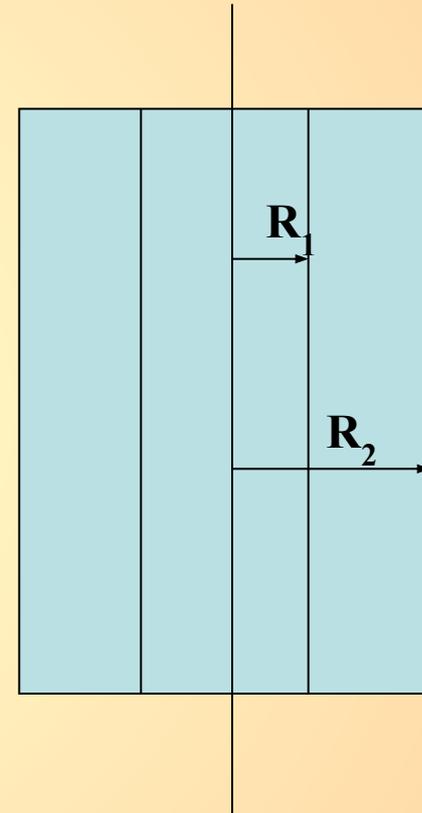
Математическая модель задачи

$$\frac{\partial T_1(r,t)}{\partial t} = \frac{\lambda_1}{c_1 \cdot \rho_1} \cdot \left[\frac{\partial^2 T_1}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_1}{\partial r} \right] + \frac{1}{c_1 \cdot \rho_1} \cdot \frac{\rho_{\text{уд.эл.}} \cdot I^2}{S^2}$$

для области $0 \leq r < R_1$

$$\frac{\partial T_2(r,t)}{\partial t} = \frac{\lambda_2}{c_2 \cdot \rho_2} \cdot \left[\frac{\partial^2 T_2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_2}{\partial r} \right]$$

для области $R_1 < r < R_2$



Начальные условия

$$T_1(r,0) = T_1^0(r)$$

$$T_2(r,0) = T_2^0(r)$$

Граничные условия

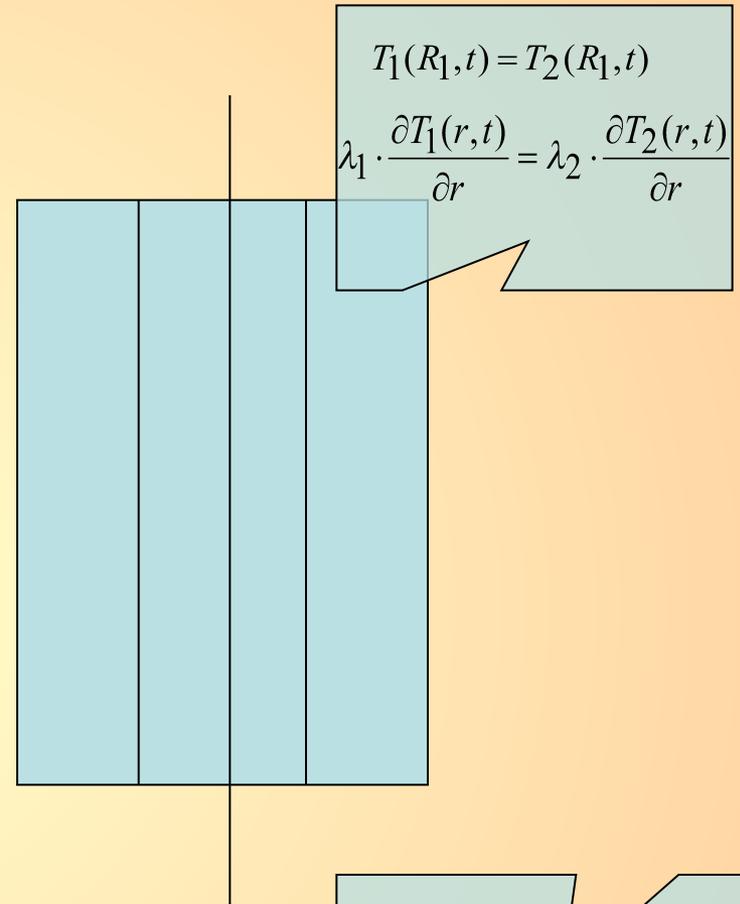
$$\frac{\partial T_1(r,t)}{\partial r} = 0 \quad \text{при } r = 0$$

$$T_1(R_1,t) = T_2(R_1,t)$$

$$\lambda_1 \cdot \frac{\partial T_1(r,t)}{\partial r} = \lambda_2 \cdot \frac{\partial T_2(r,t)}{\partial r} \quad \text{при } r = R_1$$

$$-\lambda \cdot \frac{\partial T_2(r,t)}{\partial r} = \alpha(T_2 - T_{\text{внеш}})$$

$$\alpha = (0,08 \div 0,25) \frac{BT}{M^2K} \quad - \text{ коэффициент теплообмена для ПВХ}$$



$$-\lambda \cdot \frac{\partial T_2(r,t)}{\partial r} = \alpha \cdot (T_2 - T_{\text{внеш}})$$

Теплофизические характеристики объекта исследования

	Размерность в СИ	Медь	ПВХ
Плотность	$\frac{кг}{М^3}$	$8.9 \cdot 10^3$	$1.35 \cdot 10^3$
Коэффициент теплопроводимос ти	$\frac{Вт}{М \cdot К}$	400	$0.15 \div 0.175$
Удельная теплоемкость	$\frac{Дж}{кг \cdot К}$	380	$(1 \div 2) \cdot 10^3$
Температура размягчения	К	1356	(463-473)±10
Удельное электрическое сопротивление	ОМ · М	$(1.7 \div 1.8) \cdot 10^{-8}$	10^{16}

Методы решения задачи

1. **Метод собственных функций Фурье**
2. **Метод Гринберга**
3. **Обобщенный метод Бубнова – Галеркина – Канторовича**

Методы аналитического решения задачи

Метод собственных функций Фурье

Метод для задач класса

$$B \cdot \frac{\partial u}{\partial t} - \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial u}{\partial r} \right) + F(t, r)$$

Решение строится в виде

$$U = \sum_{n=1}^{\infty} U_n(t) \cdot X_n(r)$$

где $X_n(r)$ — собственные

функции соответствующие однородной задаче

где

$$F(t, r) = \sum_{n=1}^{\infty} F_n(y) \cdot X_n(r)$$

$U_n(t)$ — решение дифференциального уравнения

$$B \cdot \frac{\partial u_n}{\partial t} - \frac{\partial^2 u_n}{\partial r^2} = F_n(y)$$

Методы аналитического решения задачи

Метод Гринберга

Решение строится в виде

$$U = \sum_{n=1}^{\infty} U_n(t) \cdot X_n(r)$$

где:

$X_n(r)$ – собственные функции соответствующие однородной задачи

$$U_n(t) = \frac{\int_a^b r \cdot U(t, r) X_n(r) dr}{\int_a^b r \cdot X_n^2(r) dr}$$

Приближённые методы решения задачи

Недостатки метода Бубнова –Галеркина – Канторовича :

- 1. Свойство оператора задачи учитывается конечным числом констант, координатные функции априорно заданы.**
- 2. Координатные функции должны удовлетворять краевым условиям.**
- 3. Краевые условия должны быть однородны.**

Предлагаемый в работе метод устраняет (2),(3) недостатки.

Приближённые методы решения задачи

Метод по существу вариационный, но не требует поиска порождающего функционала.

$$J(C_n(t), t) = \int_a^b p(x) \cdot \left[\sum_{n=1} C_n(t) \cdot \psi_n(x) - Q(t, x) \right]^2 dx$$

$p(x)$ – весовая функция

$\{\psi(x)\}_1^n$ – фиксированная относительно полная система функций, линейно независимая

Вычислительные методы решения задачи

Общая идея метода

Уравнение

$$\frac{\partial^2 U}{\partial \tau^2} = L\left(U, \frac{\partial U}{\partial \tau}, \frac{\partial U}{\partial x}, \frac{\partial^2 U}{\partial x \partial \tau}, \frac{\partial U}{\partial x^2}, x, \tau\right)$$

Граничные условия

$$\varphi_0 = \left[U(0, \tau), \frac{\partial U(0, \tau)}{\partial x}, \tau \right] = 0,$$

$$\varphi_l = \left[U(l, \tau), \frac{\partial U(l, \tau)}{\partial x}, \tau \right] = 0$$

Начальные условия

$$U(x, 0) = U_0(x), \frac{\partial U(x, 0)}{\partial \tau} = U_0^*(x)$$

Решение в виде:

$$\hat{U}_n(x, \tau) = \sum_{i=1}^n C_i(\tau) \cdot \psi_i(x),$$

Вычислительные методы решения задачи

Общая идея метода

Вариация функционала невязки по $C_i(\tau)$ имеет вид

$$C_i(\tau) = \sum_{j=1}^n \gamma_{ij} \int_0^l U(x, \tau) \cdot P(x) \cdot \psi_j(x)$$

γ_{ij} – вычисленные константы.

Вычислительные методы решения задачи

ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ ПРИВОДИТ
К СЛЕДУЮЩЕМУ РЕЗУЛЬТАТУ – ПОЛУЧЕНИЮ СОДУ ДЛЯ $C_i(t)$

$$\frac{d^2 C_i}{d\tau^2} = \sum_{j=1}^n \gamma_{ij} \int_0^l L\left(U, \frac{\partial U}{\partial \tau}, \frac{\partial U}{\partial x}, \frac{\partial^2 U}{\partial \tau \partial x}, \frac{\partial^2 U}{\partial x^2}, x, \tau\right) \cdot P(x) \cdot \psi_j(x) dx, (i = 1, 2, \dots, n)$$

После интегрирования по частям получим

$$\frac{d^2 C_i}{d\tau^2} = \Phi_i(\tau) + \int_0^l L\left(U, \frac{\partial U}{\partial \tau}, \frac{\partial U}{\partial x}, \frac{\partial^2 U}{\partial \tau \partial x}, \frac{\partial^2 U}{\partial x^2}, x, \tau\right) dx, (i = 1, 2, \dots, n)$$

$\Phi_i(\tau)$ – включает всю информацию

относительно возмущающих

воздействий, заложенных в граничных условиях

Вычислительные методы решения задачи

ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ ПРИВОДИТ
К СЛЕДУЮЩЕМУ РЕЗУЛЬТАТУ – ПОЛУЧЕНИЮ СОДУ ДЛЯ $C_i(t)$

Окончательное решение

$$\frac{d^2 C_i}{d\tau^2} = \Phi_i(\tau) + \int_0^l F\left(\sum_{j=1}^n C_j \cdot \psi_j(x), \sum_{j=1}^n \frac{dC_j}{d\tau} \cdot \frac{d\psi_j}{dx}, \sum_{j=1}^n \frac{dC_j}{d\tau} \cdot \psi_j(x), \sum_{j=1}^n C_j \cdot \frac{d^2 \psi_j}{dx^2}(x), x, \tau\right) dx, (i = 1, 2, \dots, n)$$

После интегрирования получим

$$\frac{d^2 C_i}{d\tau^2} = f_i(c_1, c_2, \dots, c_n, \frac{dc_1}{d\tau}, \frac{dc_2}{d\tau}, \dots, \frac{dc_n}{d\tau}, \tau)$$

$$c_i(0) = \sum_{j=1}^n \gamma_{ij} \int_0^l U_0(x) \cdot P(x) \cdot \psi_j(x) \cdot dx$$

$$\frac{dc_i(0)}{d\tau} = \sum_{j=1}^n \gamma_{ij} \int_0^l U_0'(x) \cdot P(x) \cdot \psi_j(x) \cdot dx$$

$$U_0'(x) = \frac{\partial U(0, x)}{\partial t}$$

БАЗОВЫЕ ЗАВИСИМОСТИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТОКОВРЕМЕННЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ ПРОВОДНИКА С ИЗОЛЯЦИЕЙ

$$Q_1(R1, t) = \frac{\left(\Psi_2(R1) \cdot F[1,1] \right) \left(\Psi_2(R1) \cdot F[1,2] \right) \Psi_2(R1) \cdot F[1,3] \Psi_2(R1) \cdot F[1,4] \right] \cdot C(t) + \Psi_2(R1) \cdot K[1,1]}{Z}$$

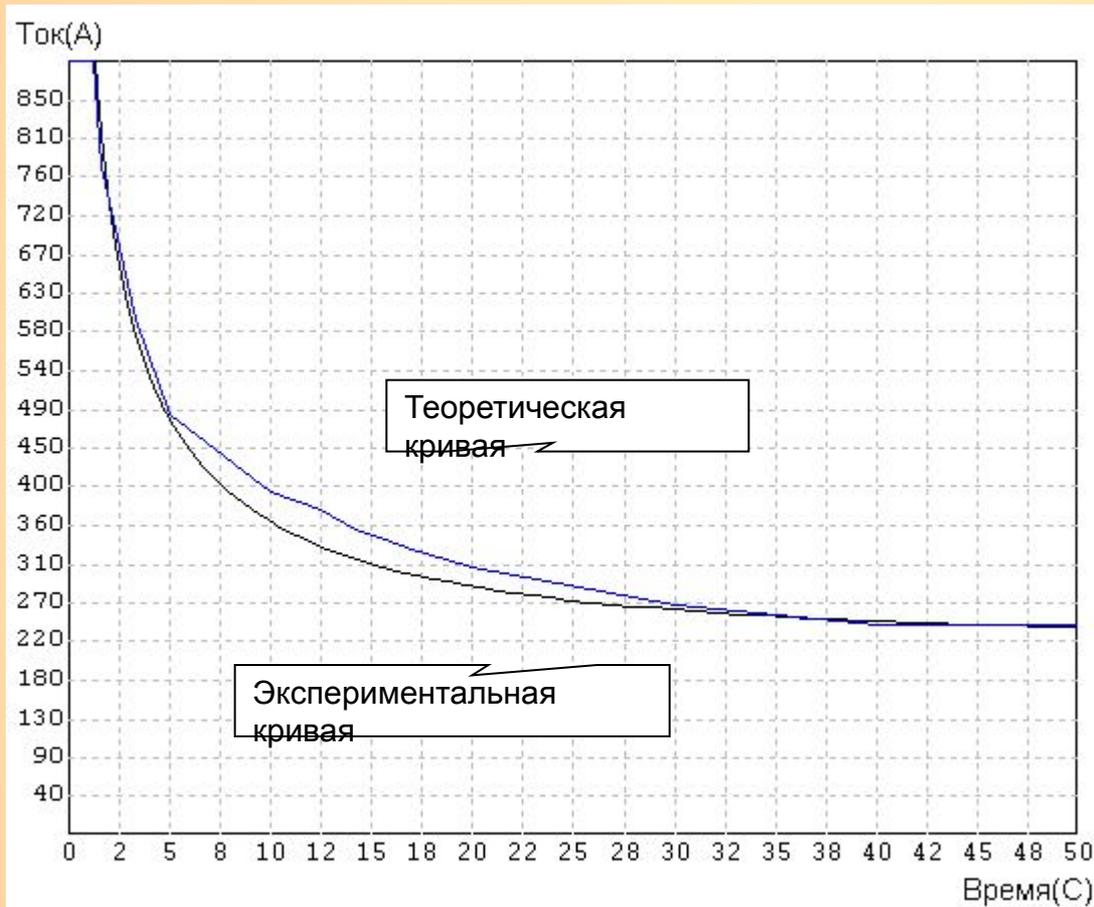
$$I(t) = \frac{Q_1(R1, t) - \Psi_2(R1) \cdot K[1,1] - Z \cdot S \cdot e^{J \cdot t} \cdot S^{-1} \cdot C_0 - \sum_{i=2}^4 \left[Z \cdot S \cdot (e^{J \cdot t} - E_{4 \times 4}) \cdot J^{-1} \cdot S^{-1} \right] [i] \cdot B[i] \cdot c_1 \cdot \rho_1 \cdot S^2}{\left[Z \cdot S \cdot (e^{J \cdot t} - E_{4 \times 4}) \cdot J^{-1} \cdot S^{-1} \right] [1] \cdot \rho_{уд.эл}}$$

$$- \frac{2 \cdot a}{R1} \cdot \frac{d\Psi_2(R1)}{dr} \cdot K[1,1] \cdot \frac{c_1 \cdot \rho_1 \cdot S^2}{\rho_{уд.эл}}$$

Исследование процессов нагрева неизолированного провода (пример)

Температура плавления (К)	933
Температура окружающей среды (К)	273
Ток до аварийного режима (А)	51

Исследование процессов нагрева неизолированного провода (пример)



Зависимость времени
нагрева алюминиевого
провода
 $S=6 \text{ мм}^2$ до
температуры плавления
жилы от тока.

Ошибка 6.5%

Условия возгорания электропроводки для ОСНОВНЫХ ТИПОВ МОНТАЖНЫХ ПРОВОДОВ

Марка провода	S Сечение кв. мм	Наименьшая кратность перегрузки проводов, при которой отмечается воспламенение изоляции	Зона кратности перегрузки, в которой наблюдается максимальная вероятность воспламенения
ПВ-1	1.5	7	9-10
	2.5	6	9-10
АПВ	2.5	6	9-10
	4	3	3-6

Условия возгорания электропроводки для основных типов монтажных проводов

Параметром, характеризующим интенсивность воздействия на кабельные изделия токов К.З. или перегрузки, служит коэффициент кратности сверх токов K_c :

$$K_c = \frac{I_k}{I_\partial}; K_c = \frac{I}{I_\partial}$$

где I_k – ток К.З. ;

I – ток перегрузки ;

I_∂ – ток допустимый

длительный для данного сечения проводника

Исследование процессов нагрева изолированного провода

Определим токовременные характеристики проводки -- зависимость времени нагрева токопроводящей жилы до температуры $210\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($(200+5\%)\text{ }^{\circ}\text{C}$) от ожидаемого тока.

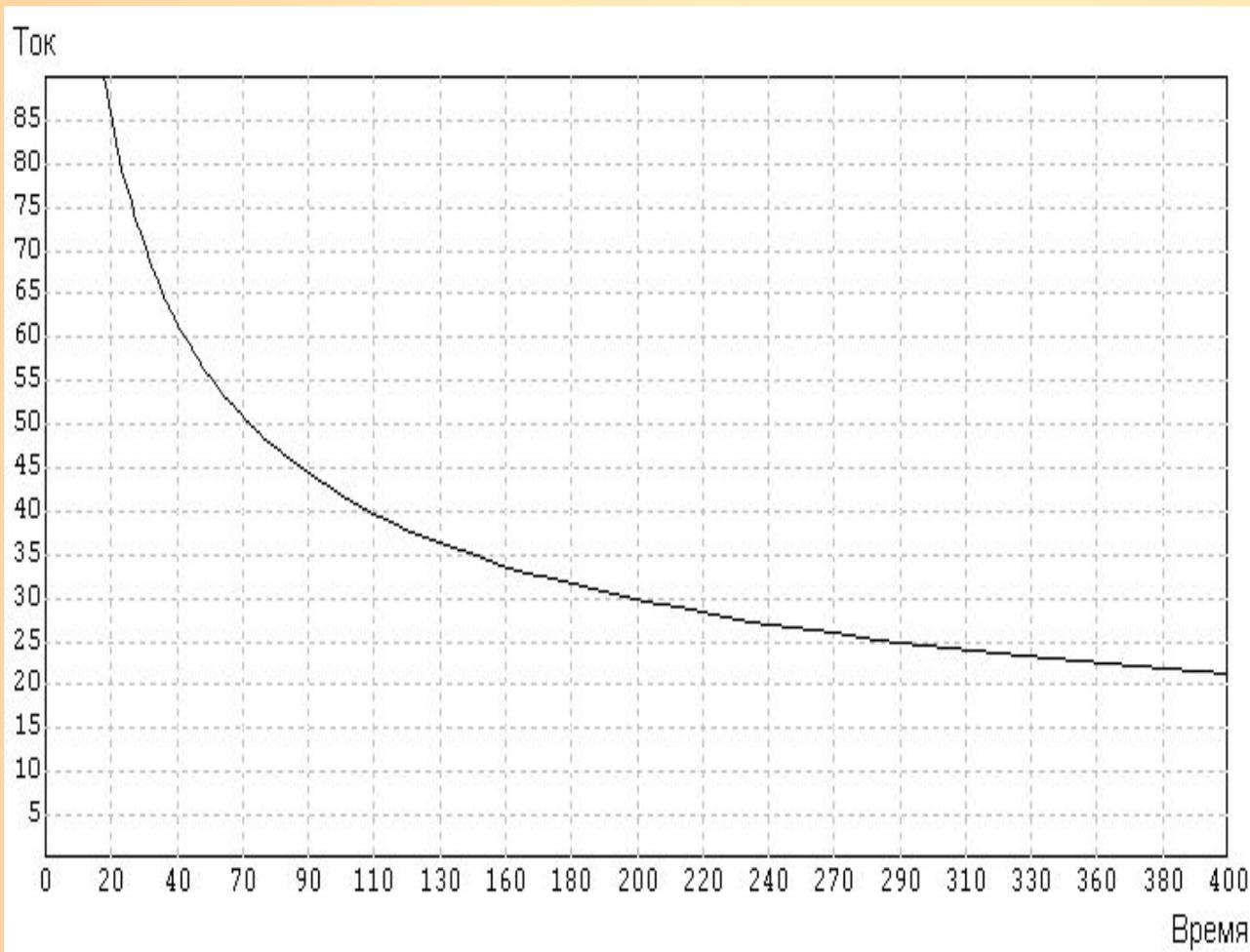
Температура $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ – данный токорезим допустим без вторичного использования изоляции (ПВХ) .

Вопросы выбора электропроводки сводятся к

$$I_{\text{ном.вс}} \geq k \cdot I_{\text{доп.пров}}$$

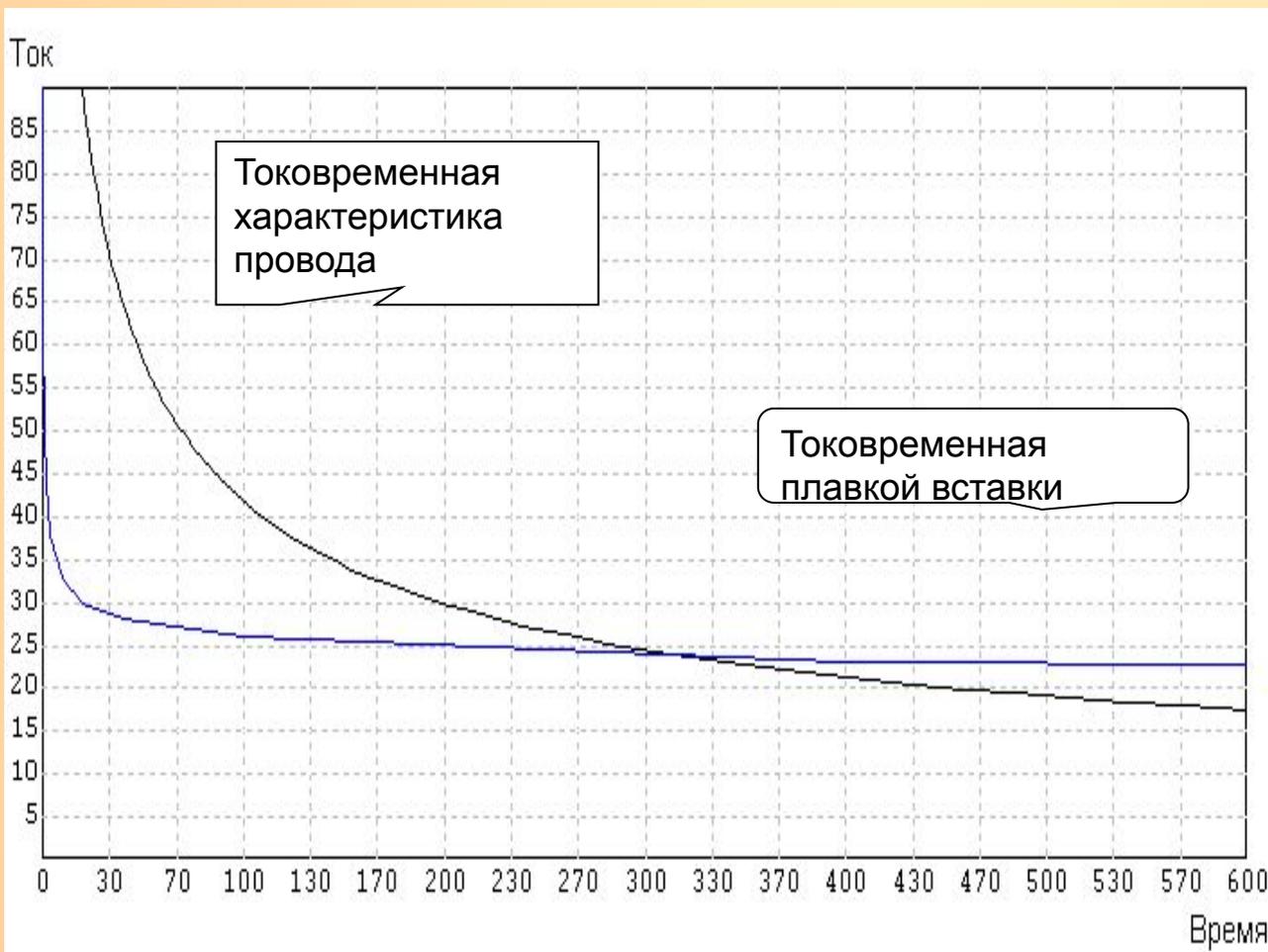
где $I_{\text{доп.пров}}$ – длительный ток проводника; $k = 0.8$ – для поливинилхлоридной, резиновой или другой, аналогичной по тепловым характеристикам изоляции.

Исследование процессов нагрева изолированного провода



Токовременная
характеристика
провода марки
ПВ-1 сечения 1.5
мм²

Исследование процессов нагрева изолированного провода

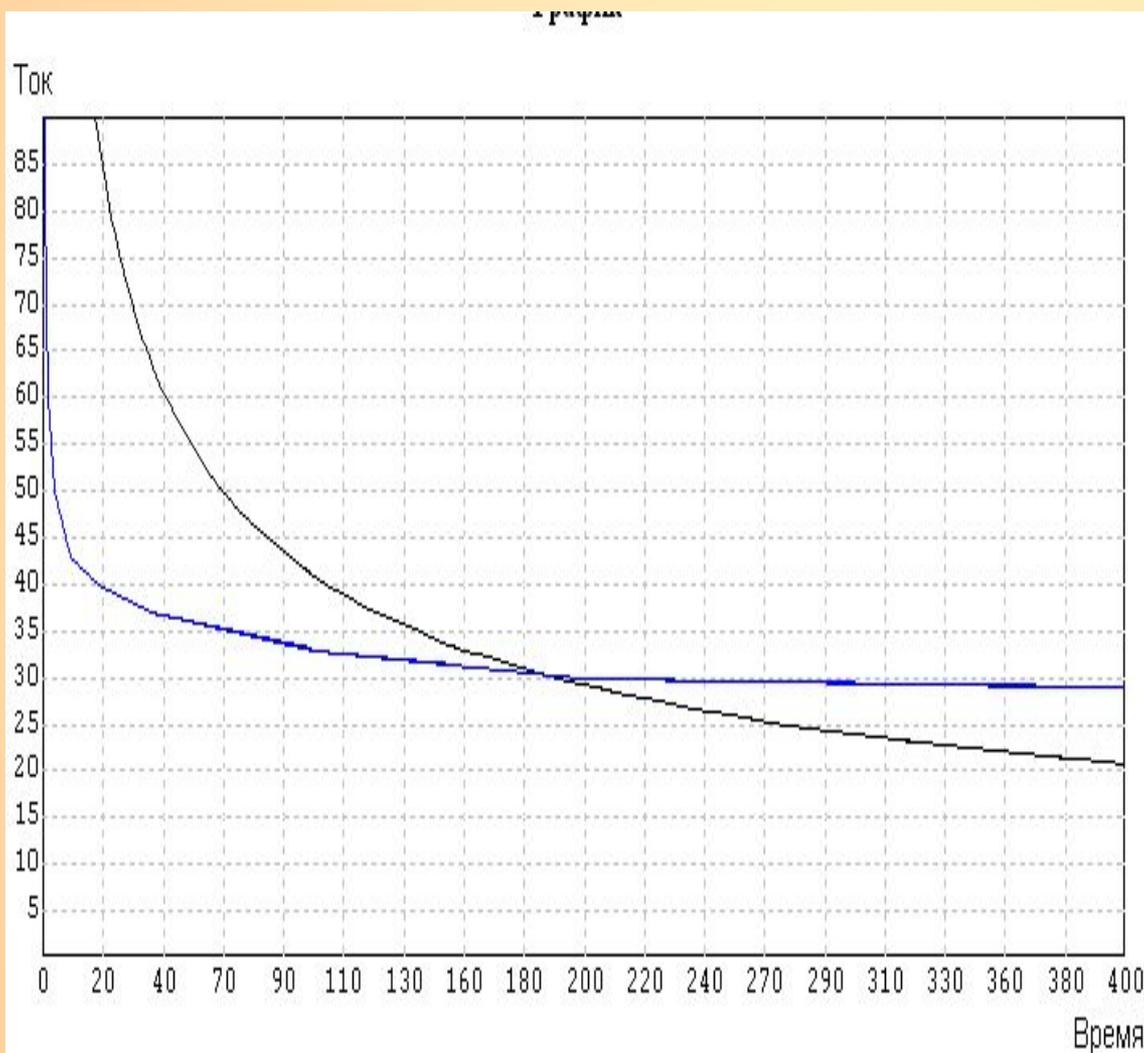


Токовременные
характеристики провода
и плавкой вставки

Исследование процессов нагрева изолированного провода

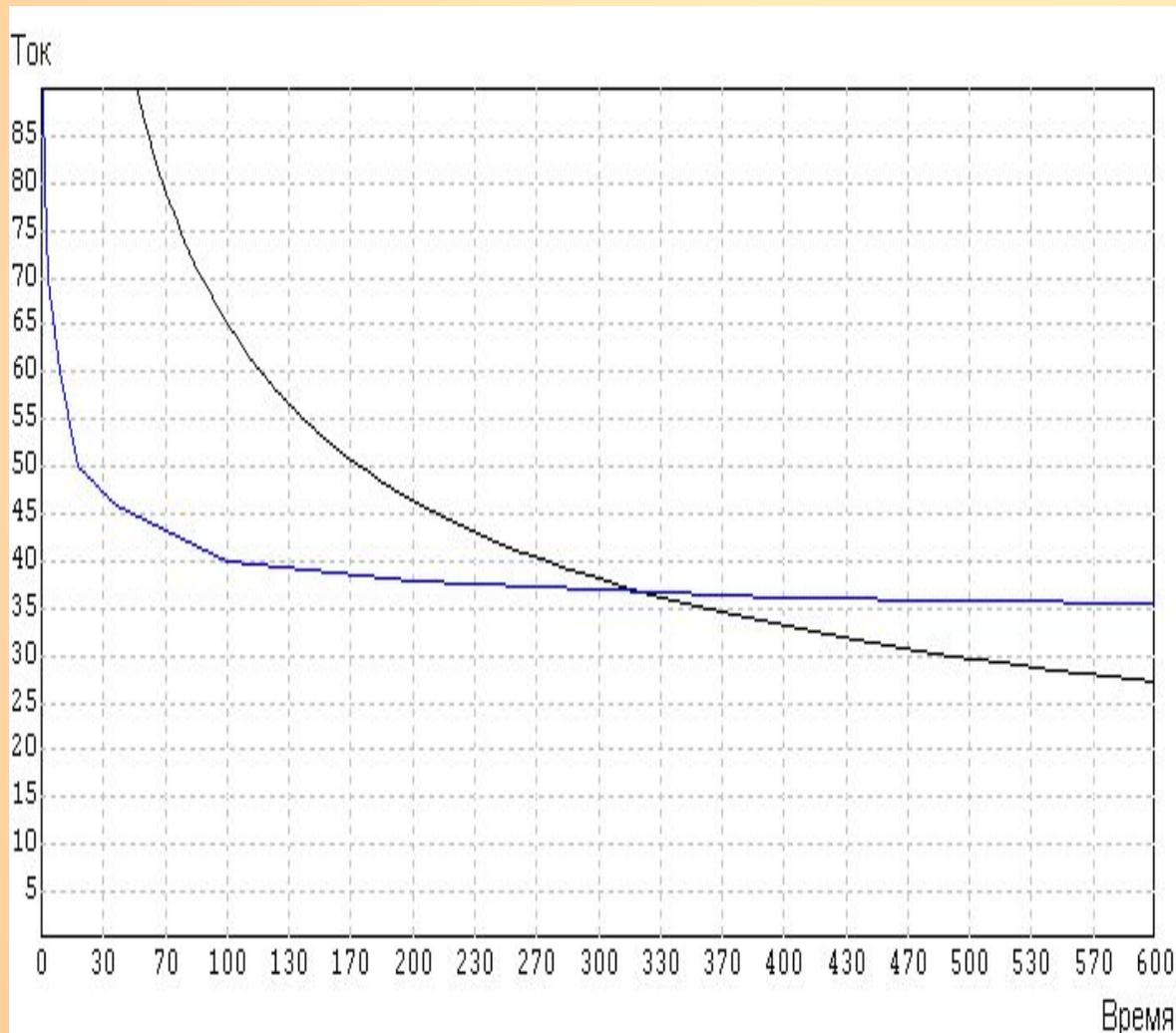
Сечение жилы (мм ²)	Допустимый ток для данного сечения	Номинальный ток плавкой вставки
1.5	23	20
2.5	30	25
6	50	40

Исследование процессов нагрева изолированного провода



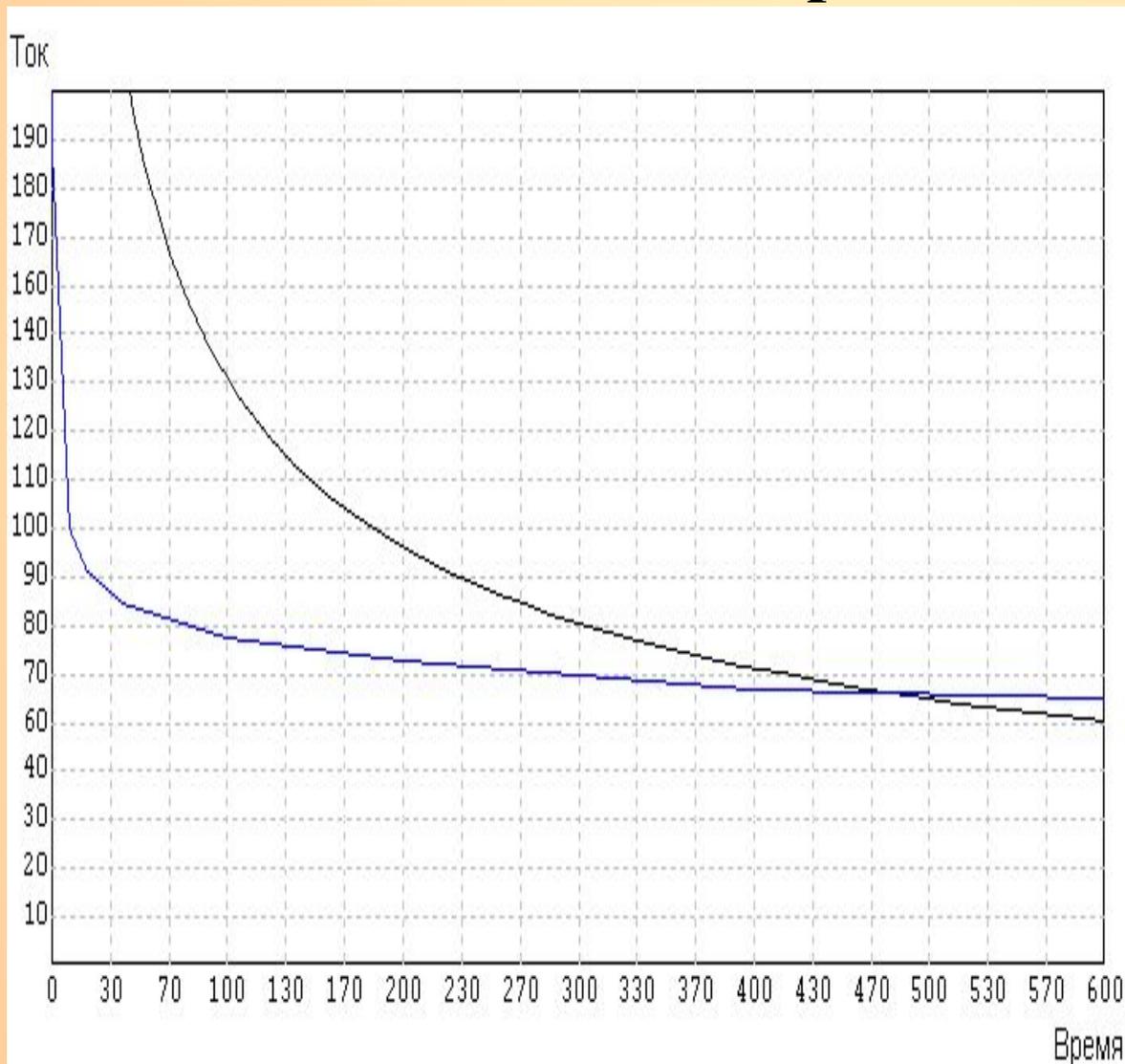
**Соответствие
токовременных
характеристик провода
сечения 1.5 мм² и его
плавкого
предохранителя.**

Исследование процессов нагрева изолированного провода



**Соответствие
токовременных
характеристик провода
сечения 2.5 мм² и его
плавкого предохранителя.**

Исследование процессов нагрева изолированного провода



**Соответствие
токовременных
характеристик провода
сечения 6 мм² и его
плавкого
предохранителя**

Обобщение результатов и определение дополнительных условий для надежной защиты

электропроводки от токов перегрузки

Рабочая зона
предохранителя:

$$I_{ожид} > 1.3 \cdot I_{\partial}$$

Не рабочая зона:

$$I_{\partial} < I_{ожид} \leq 1.3 \cdot I_{\partial}$$

**Дополнительные условия для надежной защиты должны
учитывать нерабочую зону предохранителей**

Заключение

1. Показана принципиальная возможность использования аппарата математической физики для расчета токовременных характеристик проводников, знание которых крайне необходимо при проектировании для безошибочного выбора сечений проводников и подбора устройств защиты с соответствующими параметрами, обеспечивающими исключение возгораний электропроводки при любых коротких замыканиях и перегрузках в сети.
2. Заложены основы для создания необходимого для решения в процессе проектирования проблемы пожаробезопасности систем программного обеспечения, а также системы автоматизированной экспертизы проектов систем с точки зрения их пожароопасностию.
3. Определены недостатки статических устройств защиты (плавких предохранителей), проведены расчеты, определяющие пожароопасность электропроводки, для проводов, часто применяемых при монтаже в жилых, промышленных помещениях.
4. Предложены дополнительные условия по выбору устройств защиты для полной безопасности проводки при аварийных режимах. Определенно направление развития устройств защиты.

**“ Все прожекты зело исправны быть должны,
дабы казну зряшно не разорять и отечеству
ущерба не чинить. Кто прожекты станет
абы как ляпать, того чина лишу и кнутом
драть велю”
драть велю” .**

Пётр I

**«...тщательный анализ аварийных событий
свидетельствует о том, что центр тяжести
проблем лежит все-таки в области управления,
где человеческий фактор наиболее существен.
Выясняется, что сами инструкции были либо не
очень точны и не предусматривали, а в некоторых
случаях и не могли предусмотреть правил
поведения при возникновении нештатных
режимов».**

Академик Легасов Валерий Алексеевич

журнал «Коммунист» № 8 за 1987 г.,
статья «Проблемы безопасного развития техносферы»,
с. 92 – 101.