



# **Криогенные и сверхпроводящие электроэнергетические устройства (000025237)**

Лекция 12

**Профессор Е.Ю.Клименко**



## **Защита сверхпроводящих магнитов**

# Энергоемкость

$$W = \frac{B^2}{2\mu_0} \quad \text{магнитс}^- \quad [W] = \frac{\text{Дж}}{\text{м}^3} \quad [B] = \text{Тл} \quad [\mu_0] = \frac{\text{Гн}}{\text{м}} = \frac{\text{Н}}{\text{А}^2}$$

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Н}}{\text{А}^2}$$

| $B, \text{Тл}$      | 5   | 7   | 10  | 12  | 15  | 18   | 20   |
|---------------------|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|
| $W, \text{МДж/м}^3$ | 10  | 20  | 40  | 58  | 90  | 130  | 160  |
| $P, \text{МПа}$     | 10  | 20  | 40  | 58  | 90  | 130  | 160  |
| $P, \text{бар}$     | 100 | 200 | 400 | 580 | 900 | 1300 | 1600 |

Давление в пушечном стволе 340-40000 бар

**1 МДж - много или**

**1 МДж = 240 ккал, мало?**

автомобиль 2 т на скорости 114 км/час

падение 1 т с высоты 100 м

0.017 литров бензина

# Факторы риска

В СП состоянии

Высокая плотность энергии, Давление,

В случае перехода в нормальное состояние

Высокая плотность тока,

Высокое напряжение.

Давление магнитного поля воспринимает силовая структура магнита.

**Теорема вириала:**

$$\int \frac{B^2}{2\mu_0} dV + \int \sigma_{ii} dv = 0$$

Первый интеграл по всему пространству,

Второй интеграл по объему силовой структуры.

$\sigma_{ii}$  - растягивающие напряжения в силовой структуре.

Теорема позволяет оценить объем силовой структуры:

$$V > \frac{E}{\sigma_{\text{доп}}}$$

И ее разогрев, если запасенная энергия выделится

в ней однородно. По оценке Уилсона, допустившего, что прочность

обеспечивается самим сверхпроводящим проводом, обмотка не

перегреется выше 100-150 К при  $W \sim 100$  МДж/м<sup>3</sup>.



Эта оценка сделала очень популярным мнение, что сверхпроводящий магнит будет надежно защищен, если принять меры к однородному распределению запасенной энергии при переходе обмотки в нормальное состояние, т.е. при локальном переходе обмотки быстро перевести всю ее в нормальное состояние, например, с помощью распределенного нагревателя.

Однако, прочность крупного магнита должна обеспечиваться не сверхпроводящим проводом, а несверхпроводящей силовой структурой. С увеличением запасенной энергии относительная доля сверхпроводящего провода уменьшается, а запасенная энергия при переходе выделяется в нем. Необходимо обеспечить хорошую теплопередачу от обмотки к силовой структуре.

## Разогрев точки перехода

За какое время нужно вывести ток из обмотки, чтобы в точке перехода не произошло повреждения провода?

Максимальную температуру оценим, исходя из уравнения теплового баланса для единицы объема провода, допуская, что разогрев происходит адиабатически: (C- объемная теплоемкость)

$$j(t)^2 \rho(T) dt = C(T) dT$$

Разделив переменные получаем:

$$\int_0^{\infty} j(t)^2 dt = j_0^2 \frac{\tau}{2} = \int_{T_b}^{T_{max}} \frac{C(T)}{\rho(T)} dT = U(T_{max})$$

Выбрав допустимое значение  $T_{max}$ , и зная материал обмотки, определяем значение  $U$  и необходимую постоянную вывода тока

$$\tau = \frac{2U}{j_0^2}$$

Если обеспечен хороший тепловой контакт с силовой структурой, постоянная вывода тока может быть увеличена.

## Вид функции $U(T)$

$T_{\max}$  определяется требованием неповреждения провода, изоляции, паяных контактов, а также недопустимостью критических температурных деформаций обмотки.

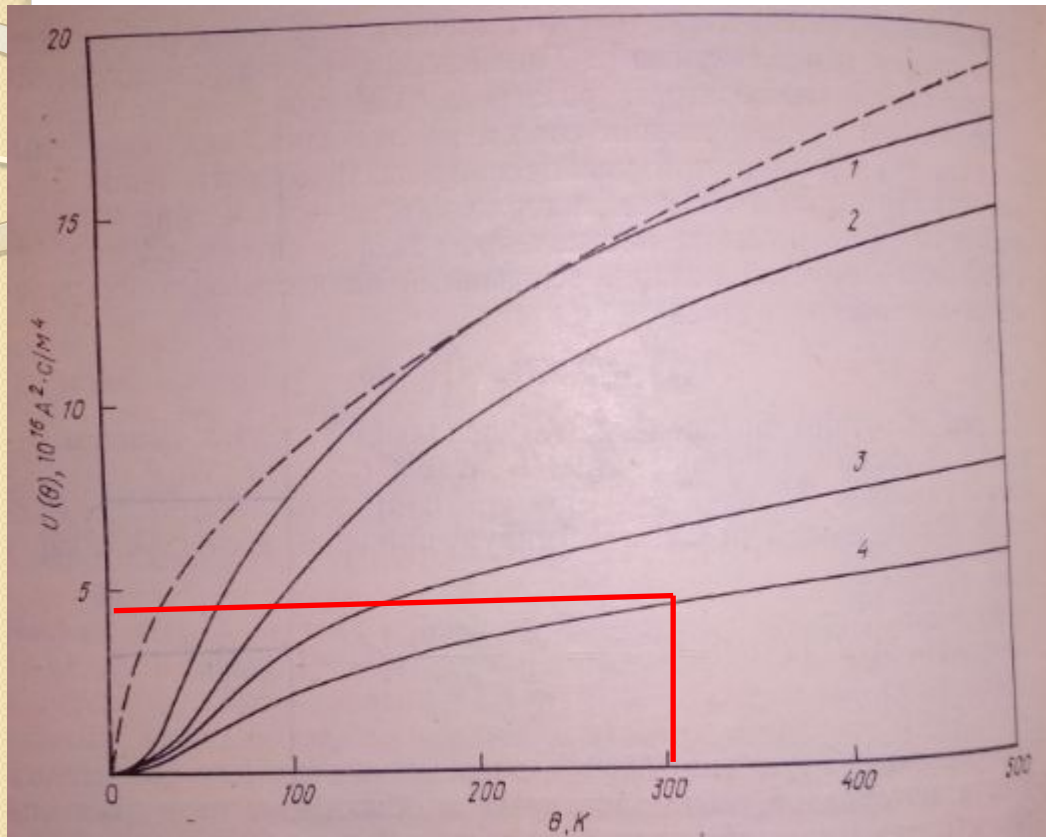
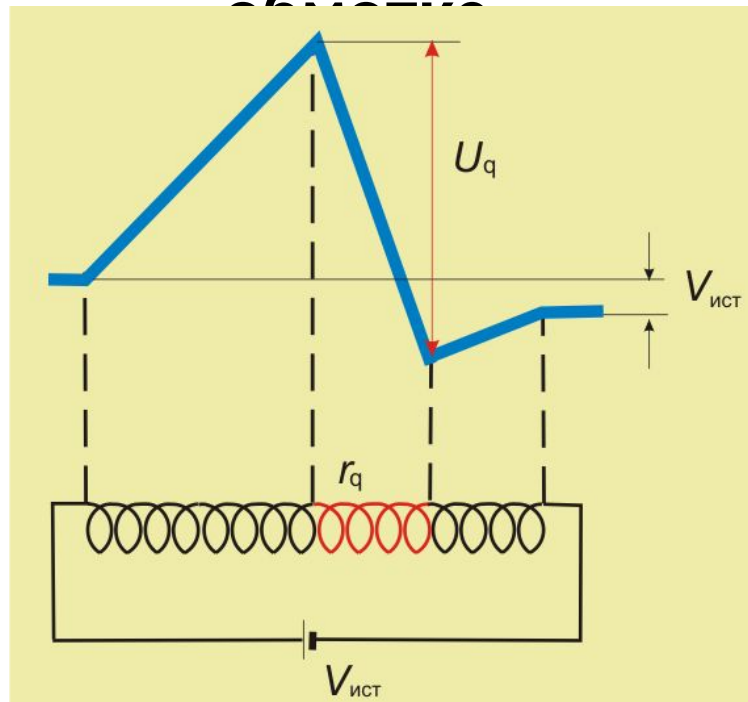


Рис. 9.1. Функции  $U(\theta)$  для различных проводников и обмотки типичного магнита небольших размеров.

1 — медь с остаточным сопротивлением  $\rho_0 = 10^{-10}$  Ом·м; 2 — медь,  $\rho_0 = 5 \cdot 10^{-11}$  Ом·м; 3 — алюминий,  $\rho_0 = 5 \cdot 10^{-11}$  Ом·м; 4 — обмотка, состоящая по объему из 23 % сплава Nb—Ti, 47 % Cu и 30 % эпоксидного компаунда. Штриховой линией показана аппроксимация  $U(\theta) \sim \sqrt{\theta}$ . На рисунке отсутствуют функции  $U(\theta)$  для сплава Nb—Ti и соединения Nb<sub>3</sub>Sn, поскольку в приведенном масштабе эти функции слишком малы из-за очень высокого удельного сопротивления данных материалов в нормальном состоянии.

# Электрические напряжения в



Распределение электрического напряжения вдоль обмотки СП магнита при появлении в нем нормальной зоны

Высокое напряжение возникает внутри обмотки на возникшей нормальной зоне.

Для нормальной зоны:

$$U_q(t) = I(t)r_q(t) + L_q \frac{dI(t)}{dt}$$

$$I(t)r_q(t) + L \frac{dI(t)}{dt} = 0$$

$$U_q(t) = I(t)r_q(t) \left[ 1 - \frac{L_q}{L} \right]$$

перешедшем участке несколько уменьшает активное.

Высокое напряжение способно пробить изоляцию и привести к возникновению дуги, необратимо повреждающей обмотку.

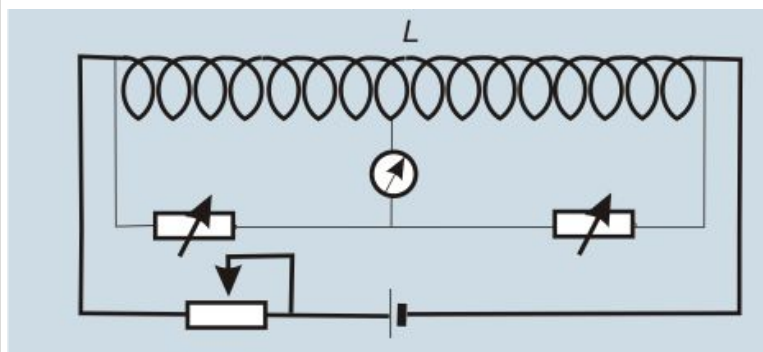


# Обнаружение нормальной зоны

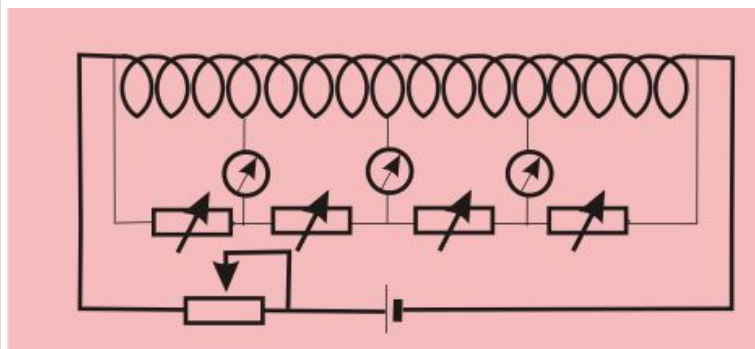
## зоны

Защита включается при обнаружении возникшей в обмотке нормальной зоны. Желательно обнаружить нормальную зону как можно раньше, когда активное напряжение на ней порядка 10-100 мкВ. Как правило, нормальная зона возникает во время увеличения тока в обмотке, когда напряжение на концах обмотки 1-10 В.

Чтобы выделить сигнал нормальной зоны нужно скомпенсировать индуктивный сигнал. Это можно сделать с помощью мостовой схемы.



Важно, чтобы ветви контактировали непосредственно со .  
этой обмоткой (не с  
ст  
позволит  
которой возникает нормальная



Если контакт со средней точкой обмотки нежелателен (например, из соображений электрической прочности), можно использовать компенсирующую катушку, индуктивно связанную с обмоткой. Тонкий изолированный провод можно намотать вместе с обмоткой..

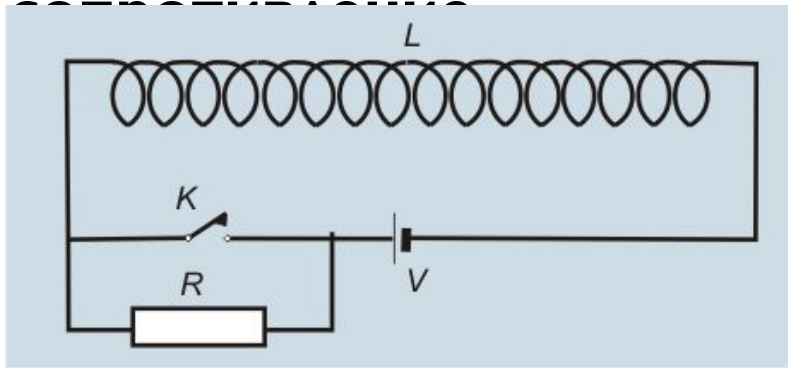
Работе схемы обнаружения нормальной зоны мешают импульсные сигналы большой амплитуды, возникающие из-за скачков магнитного потока в проводе, движения витков в обмотке, деформации обмотки, коротких замыканий.



Такие события желательно исключить при разработке и изготовлении СП магнита путем выбора достаточно стабильного провода, использования достаточно жесткой силовой структуры, надежной фиксации витков, безусловного исключения коротких замыканий.

В те времена, когда мы не умели этого делать, мы вводили в схему защиты задержку на 10 мс. Защита включалась, если сигнал не исчезал за это время.

# Защита с выводом энергии на внешнее



Балластное сопротивление  
БФК 250 А, 440 В

В рабочем состоянии ключ  $K$  замкнут. При зарегистрированном сигнале появления нормальной зоны, ключ размыкают и ток в обмотке затухает с

$$\tau = L/R$$

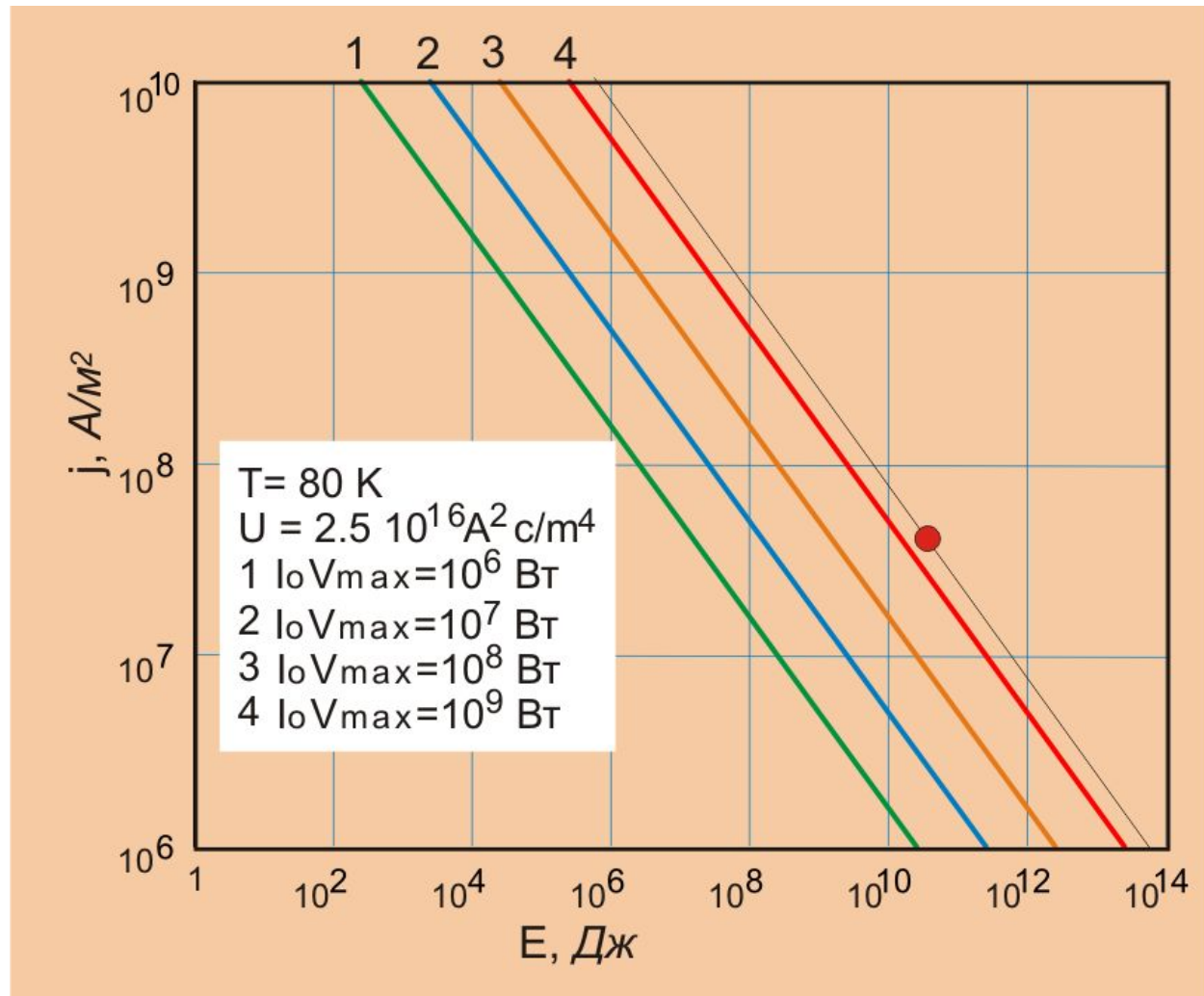
Из этого выражения и  $\tau = \frac{2U}{j_0^2}$

Легко получить

$$j_0 = \sqrt{\frac{U(T)I_0V_{max}}{E}}$$

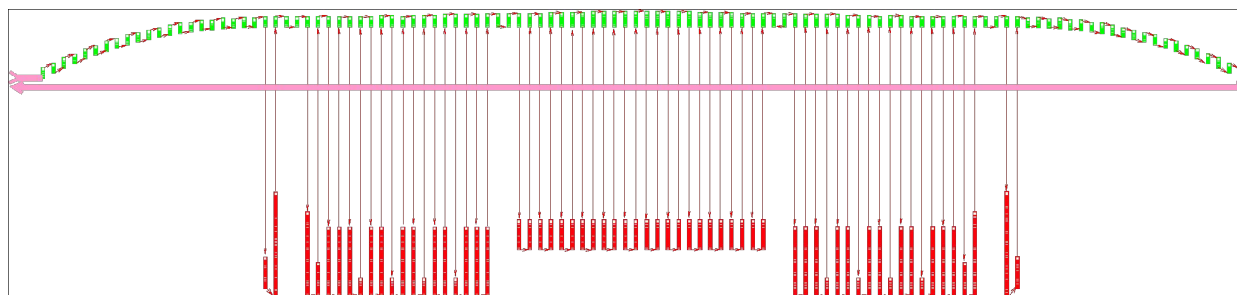
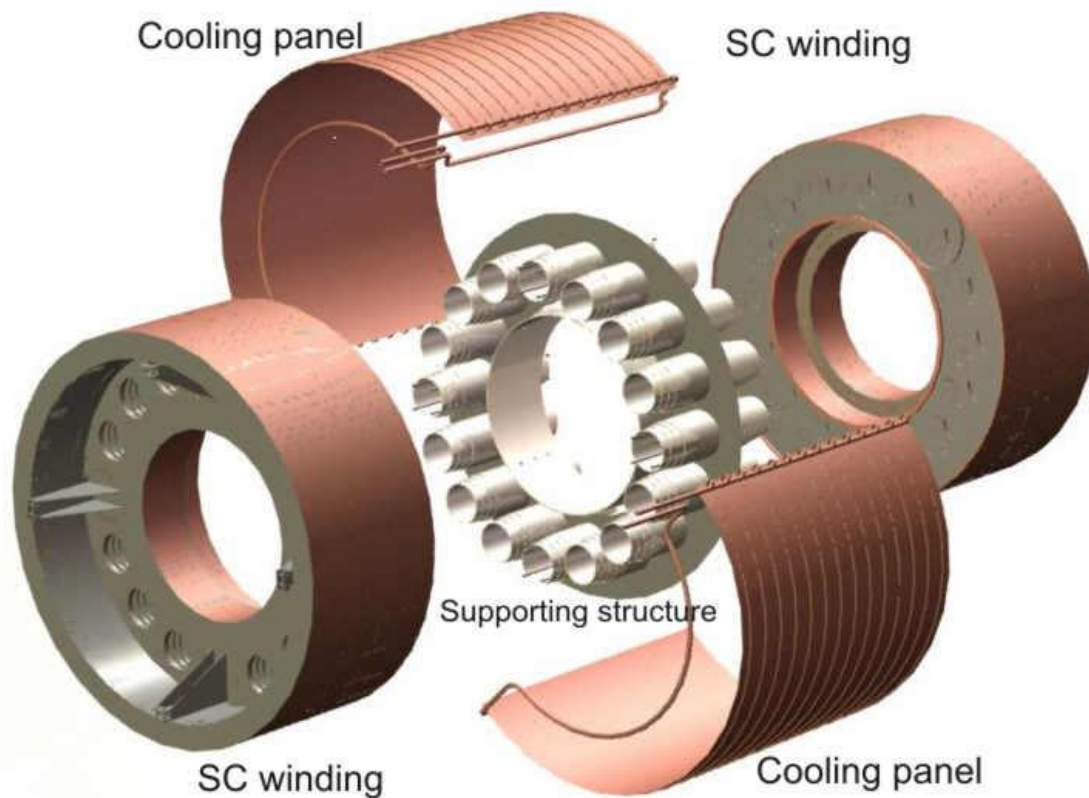
Допустимая плотность тока уменьшается с ростом энергоемкости. Для ее увеличения нужно увеличивать мощность вывода тока.

Этот метод защиты весьма сильно ограничивает допустимую плотность тока. Для защиты обмоток с большой энергоемкостью он непригоден. Тем не менее для защиты тороидальной обмотки ИТЭР выбран этот метод. Рабочий ток 68 кА, защитное напряжение 40 кВ. плотность тока ?



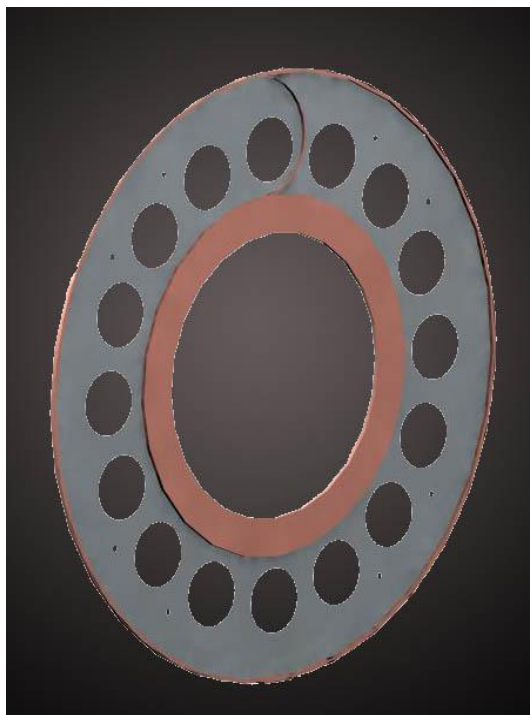
# Форсированный перевод обмотки (quench back)

Сверхпроводящие галеты приклеены к металлическим листам, что обеспечивсет хороший тепловой контакт. При переходе обмотки листы разогреваются вихревыми токами и переводят всю обмотку в нормальное состояние.



## Основные параметры магнита

|                                |                       |           |
|--------------------------------|-----------------------|-----------|
| Main winding                   | Unit                  | New       |
| Inner diameter                 | <i>mm</i>             | 860       |
| Apperture                      | <i>mm</i>             | 780       |
| Outer diameter                 | <i>mm</i>             | 1136      |
| Length                         | <i>mm</i>             | 943       |
| Length of a slot               | <i>mm</i>             | 382       |
| Number of turns                |                       | 2802      |
| Total area                     | <i>m<sup>2</sup></i>  | 2072.130  |
| Shielding winding              |                       |           |
| Minimum diameter               | <i>mm</i>             | 1458      |
| Maximum inner diameter         |                       | 1600      |
| Outer diameter                 | <i>mm</i>             | 1635      |
| Length                         | <i>mm</i>             | 1540      |
| Number of turns                |                       | 1308      |
| Total area                     | <i>m<sup>2</sup></i>  | -2071.974 |
| Precision of area compensation |                       | 7.5E-5    |
| Field in center                | <i>T</i>              | 5.0       |
|                                | <i>Tm</i>             | 6.337     |
| Maximum field at the winding   | <i>T</i>              | 7.43      |
| Nominal operating current      | <i>A</i>              | 2846      |
| Critical current               | <i>A</i>              | 4626      |
| Inductance                     | <i>H</i>              | 3.417     |
| Stored energy                  | <i>MJ</i>             | 13.84     |
| Total magnetic moment          | <i>Am<sup>2</sup></i> | 444       |
| Length of conductor            | <i>km</i>             | 13.72     |
| Cold Mass                      | <i>kg</i>             | 2500      |



Отдельная галета

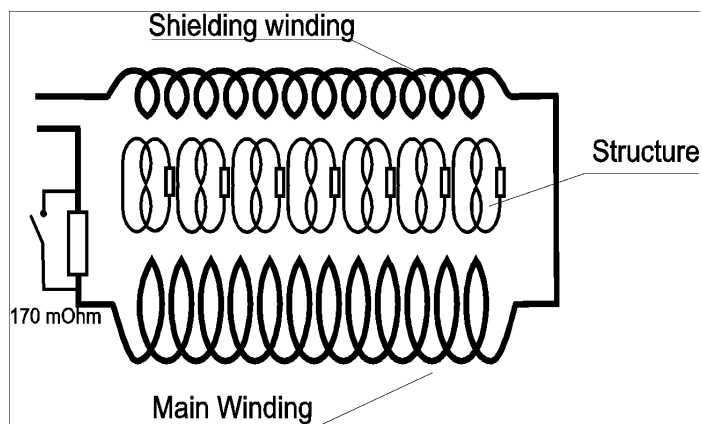
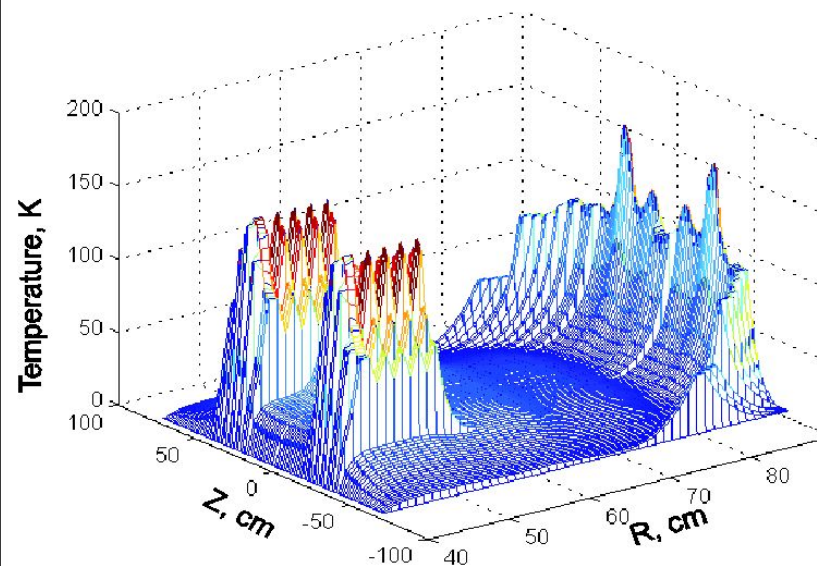
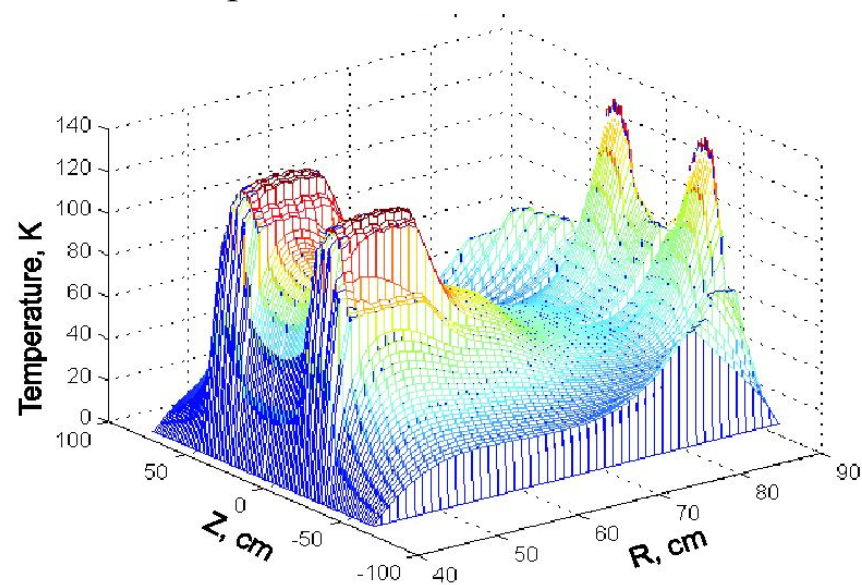


Схема защиты

Разогрев обмотки с нерж. листами



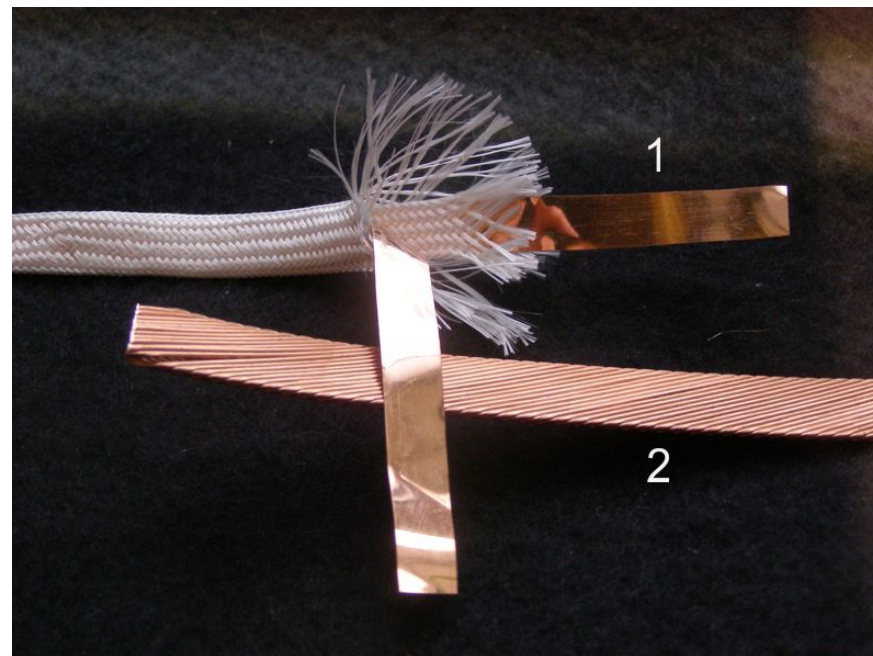
Разогрев обмотки с АМГ листами



# Разогрев обмотки с помощью встроенного нагревателя

СПИН 30 МДж Проект защиты обмотки. Длина провода 8.1 км, масса 0.8 т. Число секторов 18. Плотность тока  $5.1 \cdot 10^8 \text{ А/м}^2$

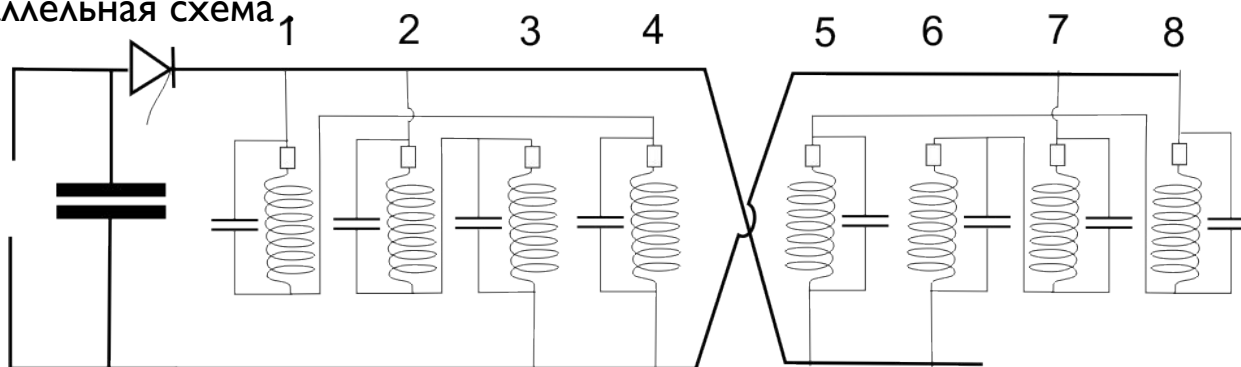
В нагревателе выделяется энергия, запасенная в конденсаторе. Для того, чтобы нагреть весь провод в секторе от 4.2 до 10 К (выше критической температуры) достаточно 135 Дж. С учетом возможных потерь выбрана емкость 12.5 мФ, при напряжении 400 В запасаящая 1 кДж. Чтобы уменьшить постоянную времени используется последовательно-параллельная схема

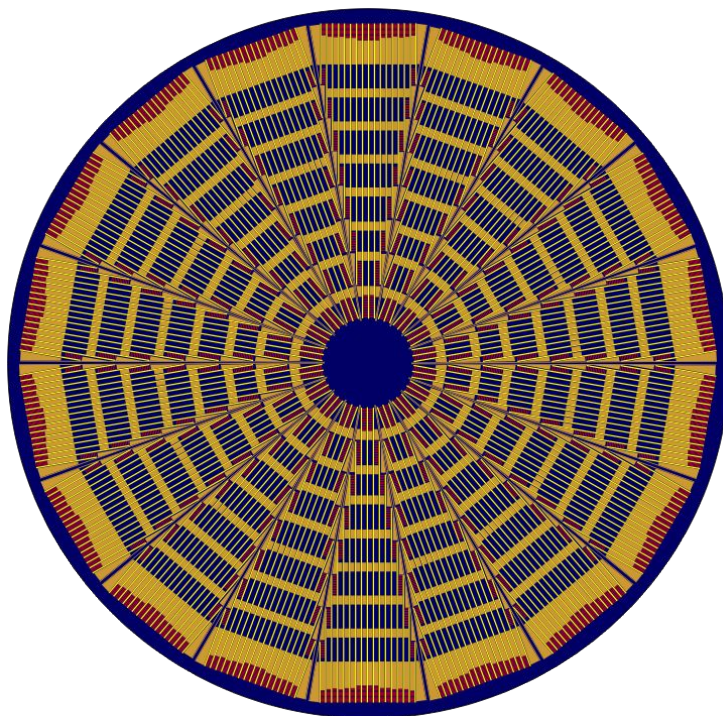


$L = 40 \text{ нГн/м}$   
 $\text{мкОм/м}$

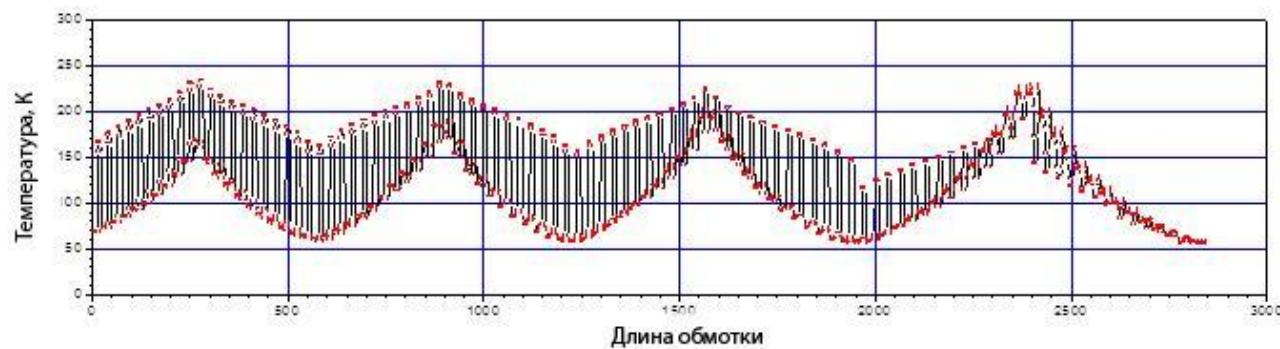
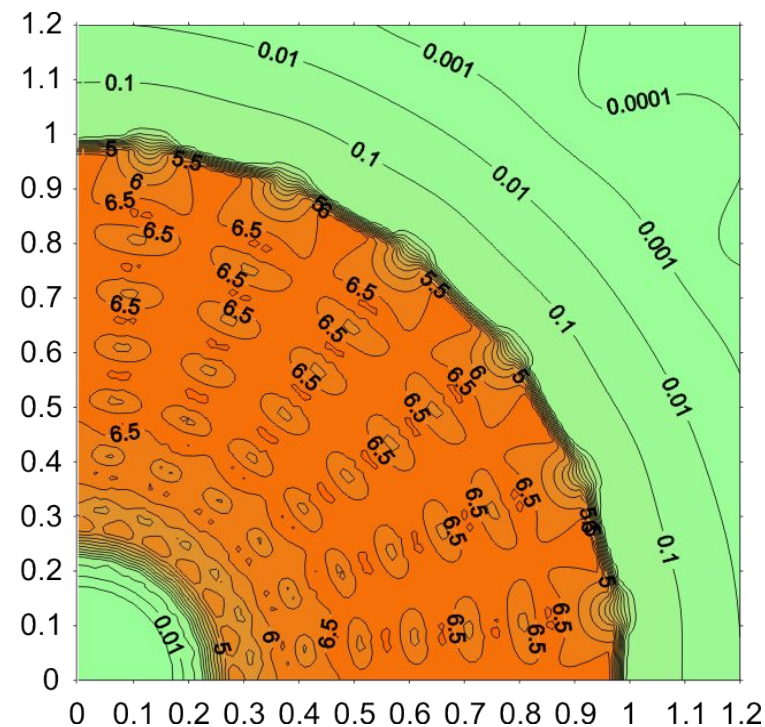
$C = 0.54 \text{ нФ/м}$

$R = 500$



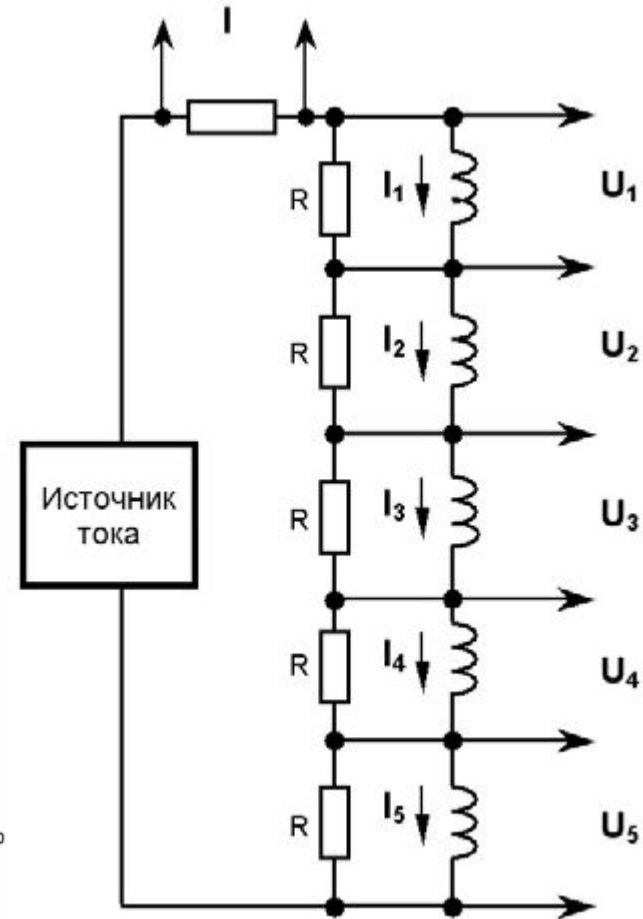
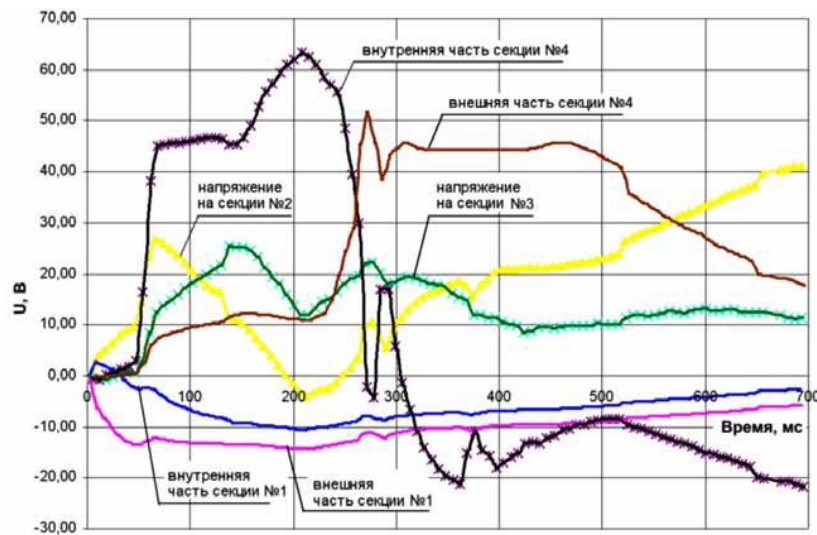
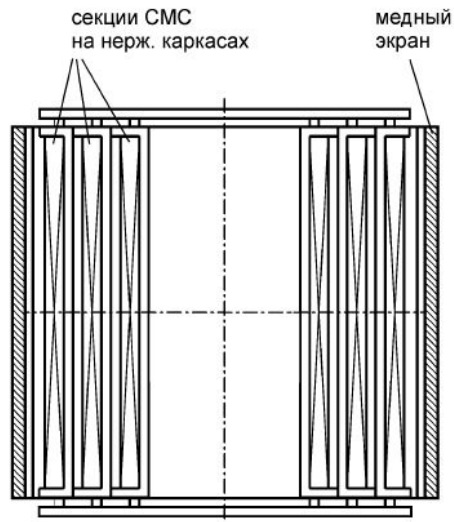


При  
традиционном  
способе  
защиты  
допустимая  
плотность тока  
 $2.36 \cdot 10^8 \text{ A/m}^2$



Распределение температуры по длине провода в половине сектора по окончании разряда при начальном нагреве обмотки до 10 К

# Защита лабораторных соленоидов ванием и медным экраном

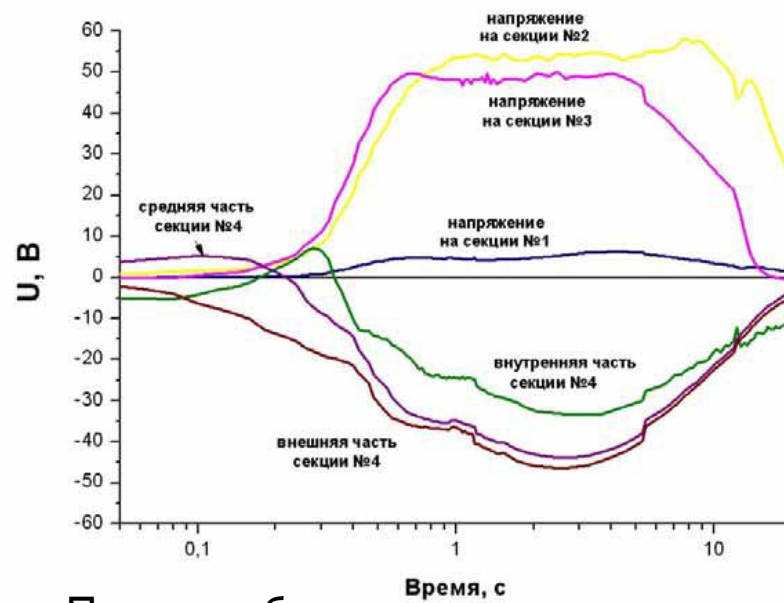


Переход секционированной обмотки



Экран толщиной 10 мм

Применение экрана затягивает процесс перехода, ограничивает напряжения в обмотке и, повидимому исключает перераспределение тока в секционированной обмотке.



Переход обмотки с медным экраном



**Спасибо за внимание**