



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

Лекция 9

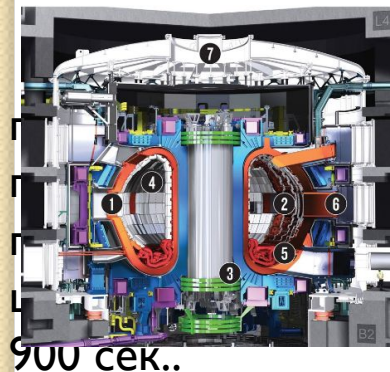
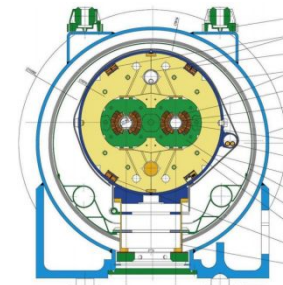
Профессор Е.Ю.Клименко



Потери в сверхпроводниках с сильным пиннингом

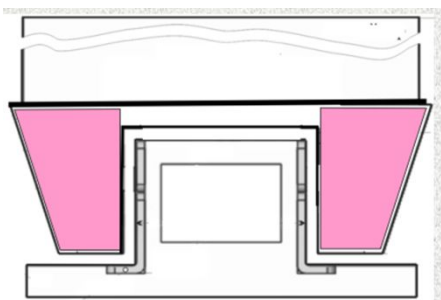
Все сверхпроводящие магниты работают в изменяющемся магнитном поле. В стационарные магниты ток эпизодически вводят и выводят.

В магнитах ускорителей необходимо увеличивать магнитное поле по мере увеличения энергии пучка частиц, чтобы удерживать их на постоянной орбите. Период изменения поля от 10 до 100 секунд.

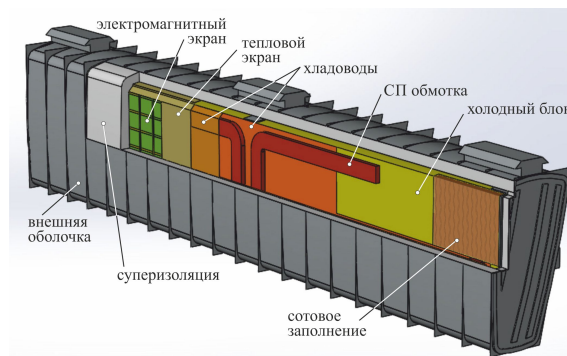


900 сек..

В токамаках классический способ зажигания шнура и тока заключается в изменении поля соленооида. (ЦС) В ИТЕРе поле ЦС соленооида изменяется от 13 Тл до -13 Тл за 900 сек..

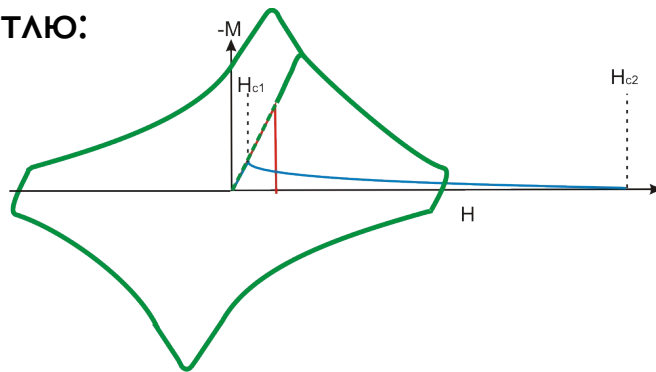


В магнитах подвеса и ЛСД левитирующего транспорта переменное поле наводится обмотками путевой структуры, а также за счет смещения обмотки

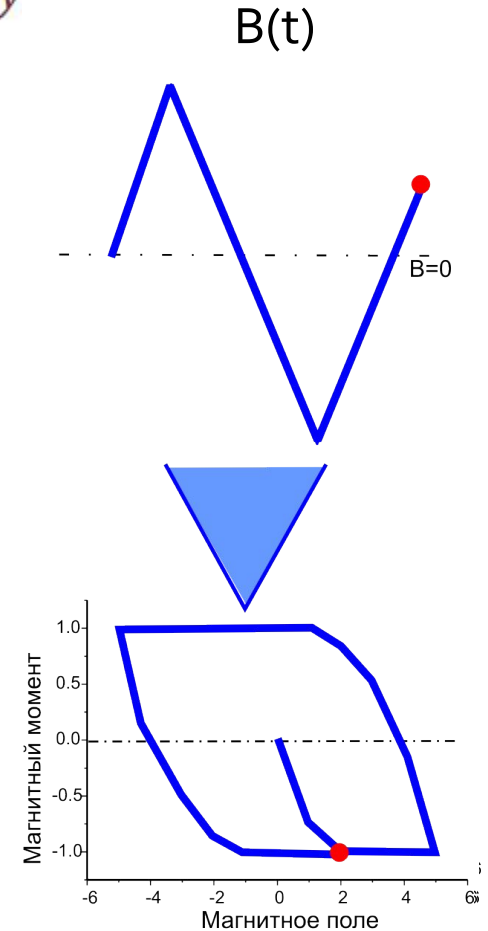
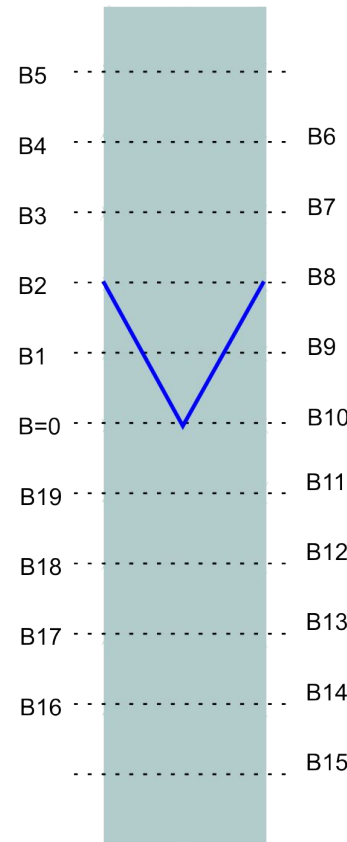


Гистерезисные потери в сверхпроводящей пластине

В четвертой лекции мы уже изучали, как магнитное поле проникает в сверхпроводник согласно модели критического состояния Ч.Бина. Изменению магнитного потока соответствует возникновение электрического поля, причем его направление совпадает с направлением тока. Поэтому в сверхпроводнике генерируется тепло. Если учесть зависимость критического тока от поля, получим приблизительно такую петлю:



$$M = 2 \int_0^a J(y) dy$$



Площадь гистерезисной петли равна тепловыделению при перемагничивании сверхпроводника

Гистерезисные потери в сверхпроводящей пластине

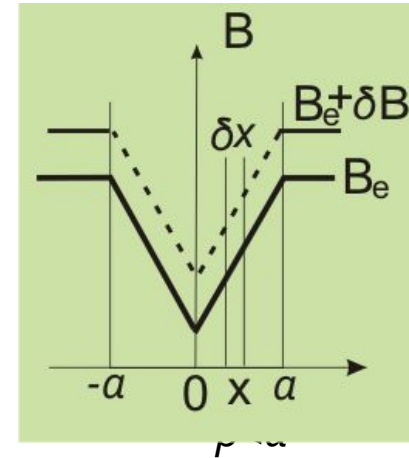
Мощность потерь в единице объема сверхпроводника:

$$dG(x) = j_c E(x) dx = j_c \frac{d\Phi(x)}{dt} dx$$

Потери при увеличении внешнего поля: (половина цикла)

$$q = \frac{1}{a} \int_0^p j_c \Delta\Phi(x) dx = \frac{1}{a} \int_0^p j_c \mu_0 j_c x^2 dx = \frac{\mu_0 j_c^2 p^3}{3a}$$

$$p = \frac{B}{\mu_0 j_c} \quad \text{глубина, на которую проникло поле } B, \text{ если}$$



Зависимость потерь Q за полный цикл от амплитуды поля B_m описывают следующим образом:

$$Q = \frac{B_m^2}{2\mu_0} \Gamma(\beta) \quad , \beta = \frac{B_m}{\mu_0 j_c a}$$

$\beta = 1$ соответствует полю, проникшему до средней плоскости пластины. Это соответствует максимуму потерь. При $\beta \ll 1$ потери малы за счет малой глубины проникания поля. При $\beta \gg 1$ за счет малой величины a .

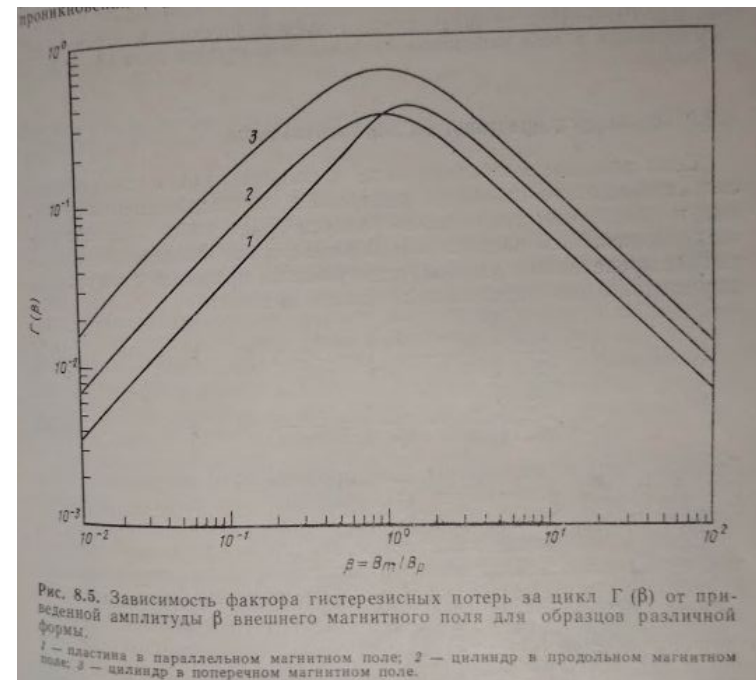



Рис. 8.5. Зависимость фактора гистерезисных потерь за цикл $\Gamma(\beta)$ от приведенной амплитуды β внешнего магнитного поля для образцов различной формы.
1 — пластина в параллельном магнитном поле; 2 — цилиндр в продольном магнитном поле; 3 — цилиндр в поперечном магнитном поле.

Все эти упражнения на понимание модели критического состояния. Они не имеют другого смысла.

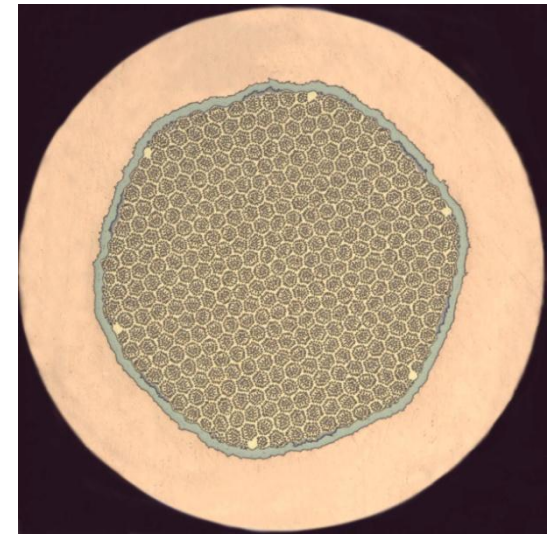


Существует множество работ, посвященных расчету потерь в различных модельных ситуациях. (М.Уилсон, Сверхпроводящие магниты, стр.196-208)
Само перечисление ситуаций полезно, но степень приближения к реальности мала из-за приближенности модели и допущения постоянства критической плотности тока.

Мы не будем их здесь рассматривать, поскольку в принципе есть возможность численного решения точной задачи. *(но результатов пока нет!)*

Потери в многоволоконных проволоках

Сейчас для обмоток применяются только многоволоконные проволоки. Попытки решения точной задачи с учетом отдельных волокон, расположенных в матрице (медной или резистивной) мне неизвестны. Как правило применяется **модель анизотропного континуума**. Вдоль провода континуум считается сверхпроводящим с критической плотностью тока $j_{ac} = \lambda j_c$ λ - доля сечения провода, занятая сверхпроводником.



В поперечном направлении континуум имеет сопротивление, величина которого зависит от наличия поверхностного сопротивления на границе матрицы и сверхпроводящего волокна.

$\rho_t = \rho_m \frac{1 - \lambda}{1 + \lambda}$, если сверхпроводник шунтирует матрицу. Если же поверхностное сопротивление не позволяет току входить в СП волокна

$\rho_t = \rho_m \frac{1 + \lambda}{1 - \lambda}$. Второе утверждение проверено на сопоставлении проводимостей проводящей бумаги сплошной и прфорированной. Первое не поддается такой проверке и часто служит причиной недоразумений.

Потери в многоволоконных проволоках

Если в проволоке волокна параллельны оси проволока длинная, то потери в ней не отличаются от потерь в сплошной сверхпроводящей проволоке, поскольку экранирующие токи замыкаются на концах образца через малое сопротивление и затухают очень медленно. Такие проволоки сейчас никто не применяет.

Потери в многоволоконной проволоке значительно сокращаются, если она скручена (*твистирована*) вокруг оси, так что волокна имеют форму винта с шагом твиста t .

Экранирующие токи в этом случае замыкаются через матрицу на всей длине провода.

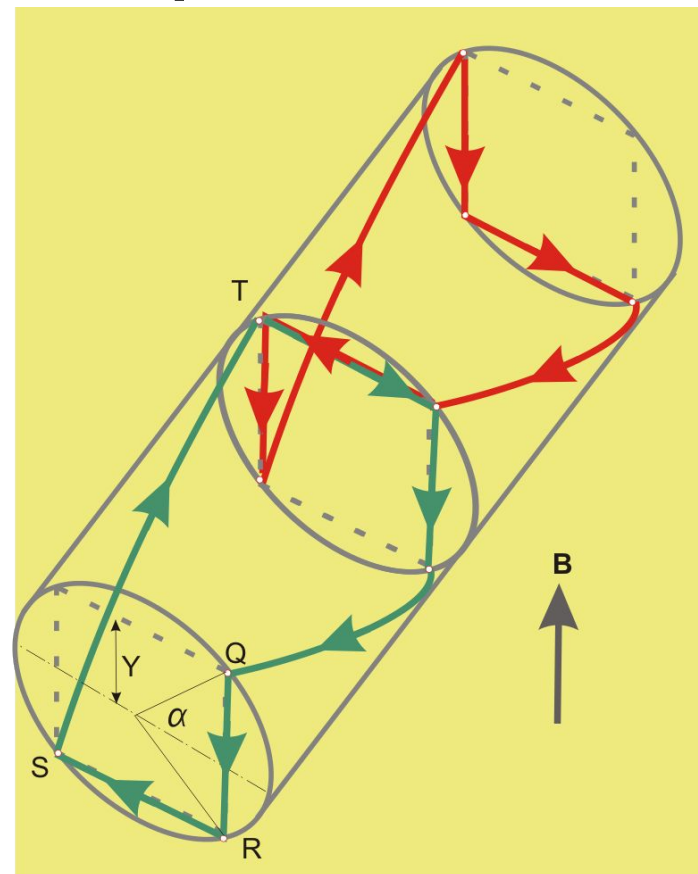


Потери в многоволоконных проволоках

Рассчитаем ток, текущий через матрицу в однородном изменяющемся магнитном поле \dot{B}_e , перпендикулярном оси проволоки.

Выберем пару волокон на произвольном, расстоянии от центра проволоки, так чтобы их сечения лежали на прямой QR, параллельной увеличивающемуся полю, и симметричную им пару по другую сторону от центра проволоки.

Построим два контура и рассчитаем циркуляцию электрического поля на их длине. Поскольку волокна сверхпроводящие в них найдется линия нулевого электрического поля. В направлении SR электрического поля нет, поскольку на этом участке поля соседних контуров направлены встречно. Таким образом, электрическое поле параллельно магнитному полю.



Электрическое поле параллельно магнитному полю.

$$\int_Q^R E dl = \int_Q^P \dot{B} a \cdot \cos \alpha \cdot dz = \int_0^{\alpha 1} (\dot{B}_e - \dot{B}_i) a \cdot \cos \alpha \frac{t d\alpha}{2\pi} = \frac{2\Delta \dot{B} t Y}{2\pi}$$

(Циркуляция берется по проекции контура на плоскость, перпендикулярную магнитному полю.) Поскольку контур был произвольным, а величина циркуляции пропорциональна Y , то поперечное электрическое поле однородно по всей проволоке.

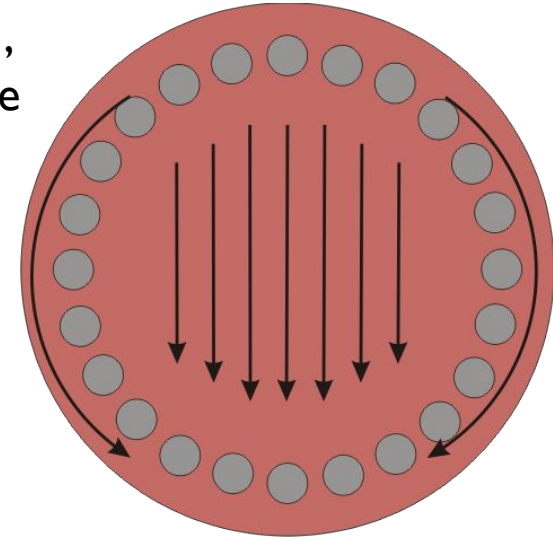
Рассчитанный ток протекает поперек матрицы, имеющей поперечное сопротивление. Потери, создаваемые этим током, получили в отечественной литературе название кооперативных в связи с некоторым ветеринарным оттенком прямого перевода английского термина «coupling loss».

Существование сопротивления в рассмотренном контуре приводит к затуханию экранирующего тока с некоторой постоянной τ .

Детальный расчет учитывает кооперативные токи, протекающие по оболочке проволоки и вихревые потери в ней. Вычисляется некоторое ρ_{eff}

$$\tau = \frac{\mu_0}{2\rho_{eff}} \left(\frac{t}{2\pi}\right)^2$$

Есть еще, однако, явление, не учитываемое классической теорией: магнитное поле может проникать между волокон, изменяя B_i .



Потери в многоволоконных проволоках

Характерное время затухания кооперативных токов позволяет оценить связанную с ними мощность потерь:

В нарастающем поле:

$$P = \frac{B_i^2}{\rho_{eff}} \left(\frac{t}{2\pi} \right)^2 = \frac{2B_i^2}{\mu_0} \tau$$

Или потери за треугольный цикл: $Q = \frac{B_e^2}{2\mu_0} \frac{8\tau}{T}$, где $T > \tau$

Здесь T - время нарастания поля в цикле.

Предложены различные выражения для потерь в циклах различной формы (М.Уилсон, Сверхпроводящие магниты, стр.214-215).

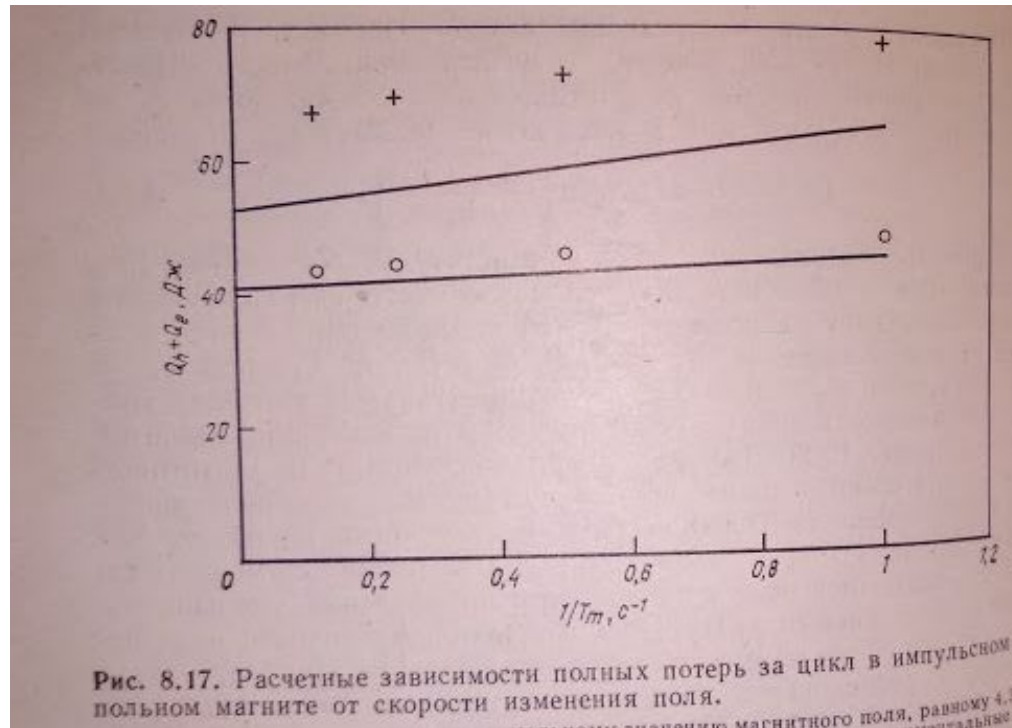
Наряду с кооперативными потерями существуют гистерезисные потери в волокнах. Если в наружном слое волокон достигнут критический ток, слой становится прозрачным для внешнего поля и проведенное рассмотрение нужно повторить для следующего слоя волокон внутри. Слой в котором достигнут критический ток называют насыщенным, поскольку все сечение волокон заполнено током. Потери в этом слое зависят от установившегося сопротивления волокон, но с этим модель критического состояния справиться не может.

Расчеты по существующим моделям только качественно совпадают с экспериментальными данными (например квадратичная зависимость потерь от шага твиста). Количественного согласия не достигли.

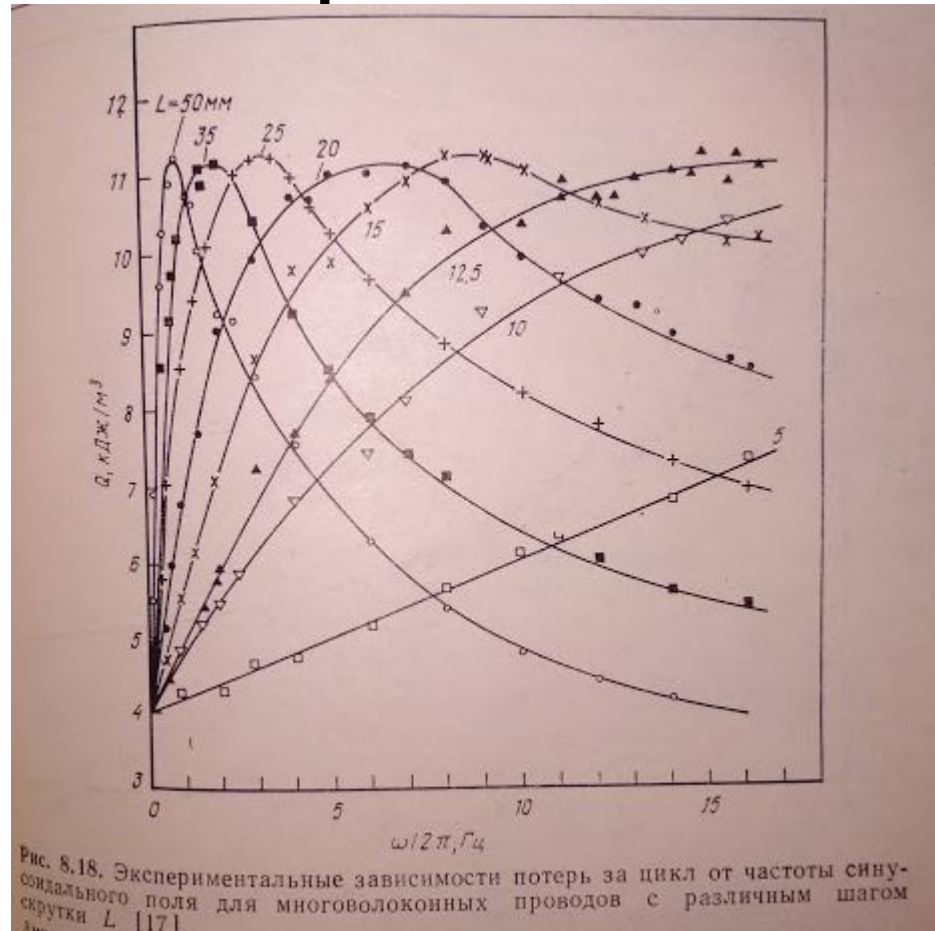
Конструкции проводов со сниженными потерями



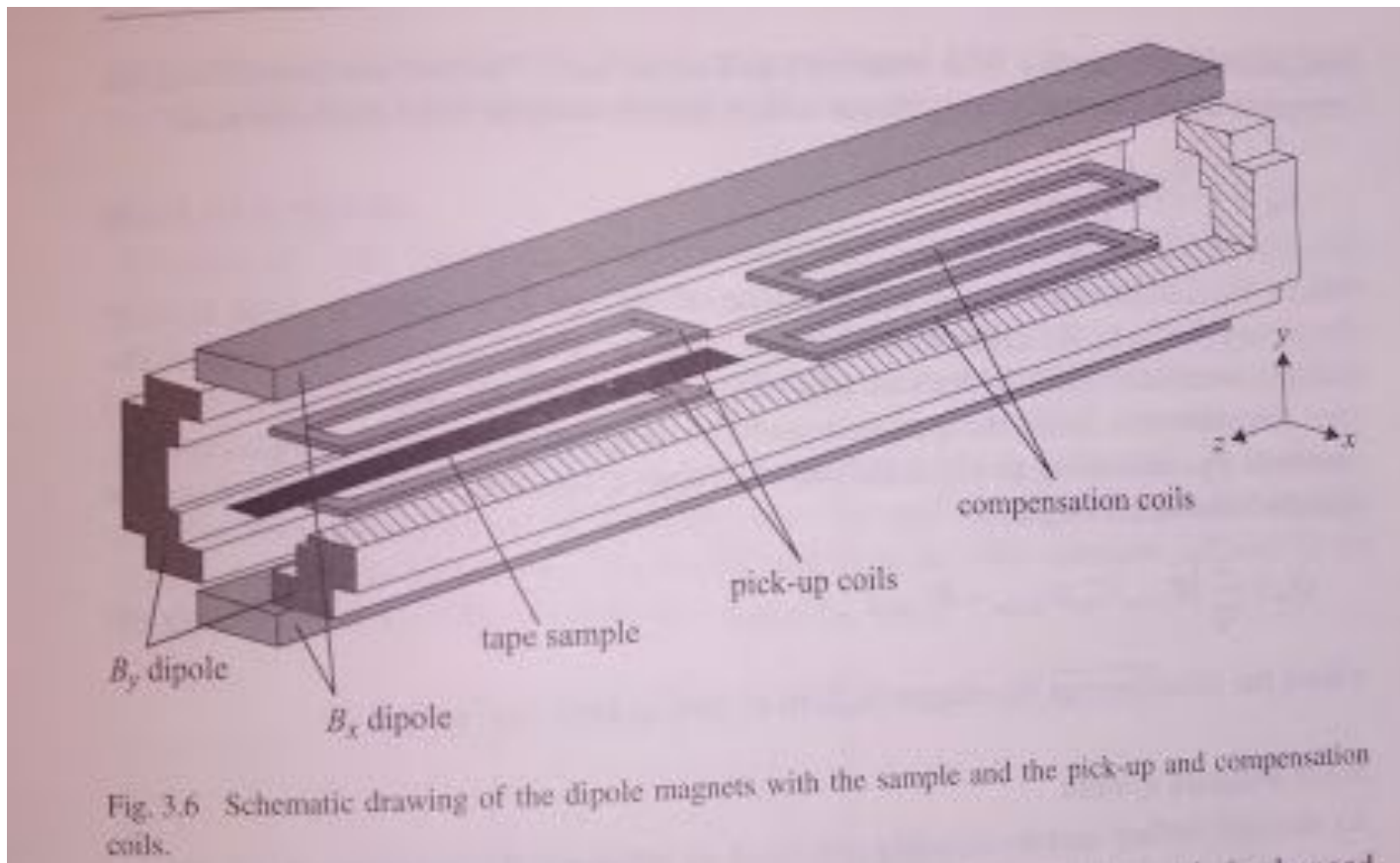
Результаты измерений



Результаты измерений



Методика измерений



Методика измерений

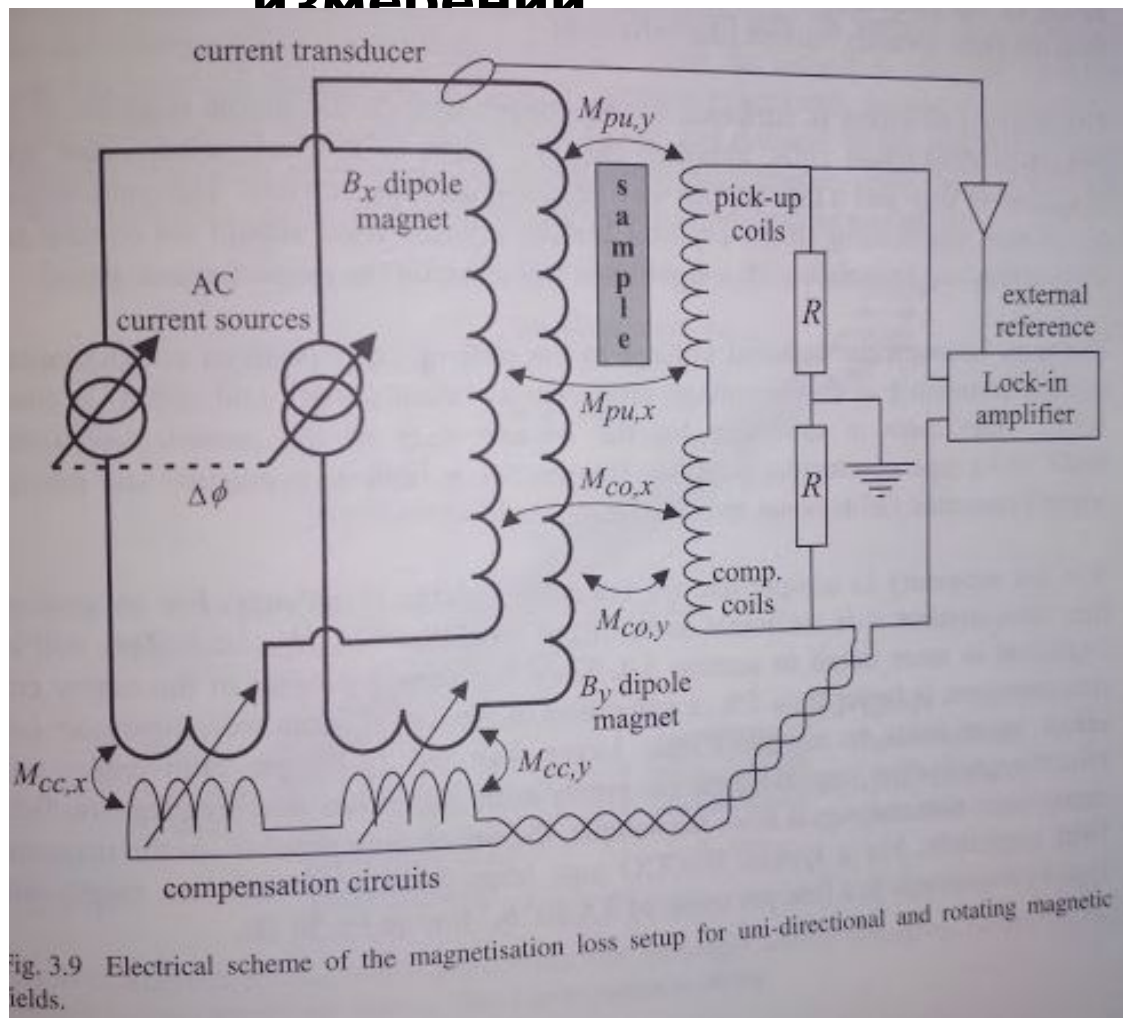
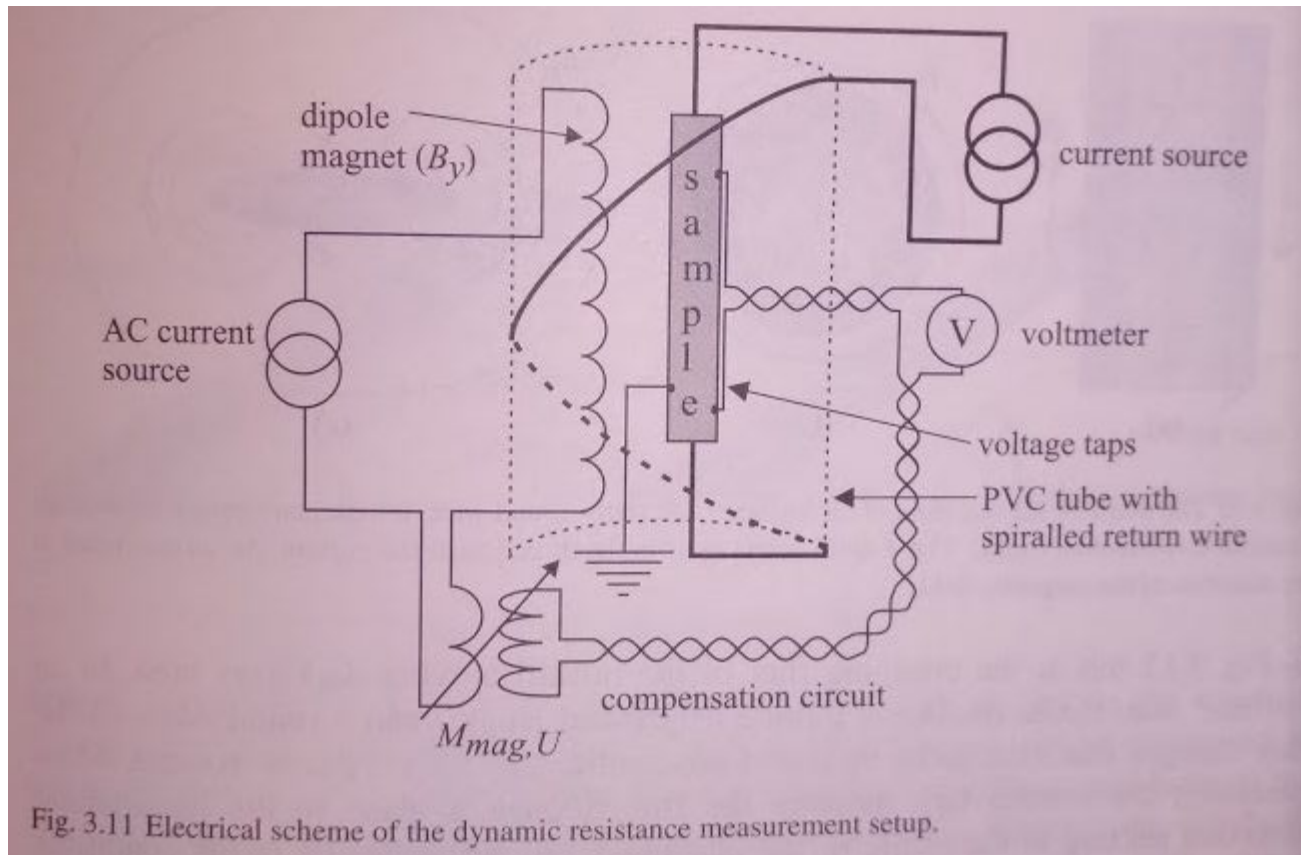


Fig. 3.9 Electrical scheme of the magnetisation loss setup for uni-directional and rotating magnetic fields.

Методика измерений





Спасибо за внимание