

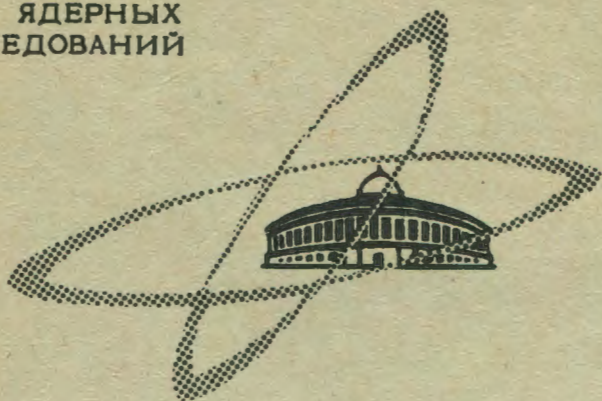
M-152

20/1

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

13 - 4186



Л. Г. Макаров

ЛАБОРАТОРИЯ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

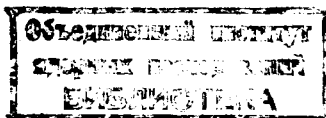
ВЫСОКОВОЛЬТНЫЙ СОЛЕНОИД
И ЕГО ХАРАКТЕРИСТИКИ

1968

13 - 4186

Л. Г. Макаров

ВЫСОКОВОЛЬТНЫЙ СОЛЕНОИД
И ЕГО ХАРАКТЕРИСТИКИ



Высоковольтный соленоид рассчитан и сконструирован с учетом следующих условий.

1. Импульсное магнитное поле должно иметь в рабочей зоне между катушками максимальную напряженность не менее 130 кэ с однородностью поля на диаметре 8 см не хуже 5% и по оси Z не хуже 0,1%. Общий объем поля высокой напряженности должен быть не менее 1 литра.

2. Высоковольтный соленоид должен надежно выдерживать по изоляции рабочее напряжение не менее 20 кв и без деформаций справляться с импульсной механической нагрузкой, возникающей от взаимодействия магнитного поля с током. Изоляция должна удовлетворительно отводить тепло при длительной работе высоковольтного соленоида в импульсном режиме.

3. Зазор между катушками - 22 мм.

4. Технология изготовления высоковольтного соленоида должна быть простой, дешевой и предусматривать использование широко доступных материалов.

Конструктивно высоковольтный соленоид (рис. 1) выполнен из двух самостоятельных катушек. Токоподводы являются продолжением провода, которым намотаны катушки. Длина этих выпусков - 1,5 м. На расстоянии 50 см от катушек токоподводы заизолированы стеклолентой с эпокси-дом. В непосредственной близости от катушек они имеют усиленную изоляцию и выгнуты по силовым магнитным линиям.

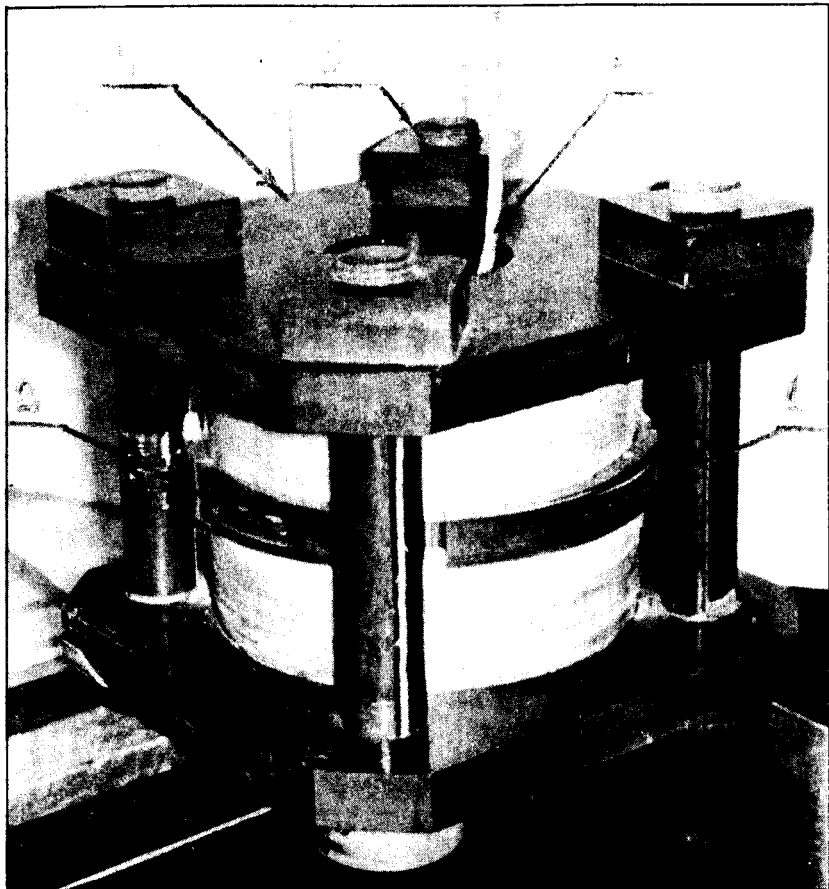


Рис.1. Общий вид высоковольтного соленоида. 1 - прокладка из текстолита толщиной 22 мм, 2 - окно, через которое вставляется исследуемый объем в рабочую зону между катушками; 3 - токоподвод; 4 - плита из гетинакса толщиной 40 мм; 5 - болт из текстолита диаметром 50 мм.

Окончательному выбору геометрии катушек высоковольтного соленоида предшествовали аналитические расчеты вариантов геометрии на электронно-вычислительной машине БЭСМ-3М. На рис. 2 показана геометрия оптимального варианта высоковольтного соленоида, принятого для производства. За исходное уравнение для подсчета напряженности магнитного поля на оси круглого витка с током плотностью j принято выражение:

$$dH = \frac{2\pi}{10} \frac{j y^2}{(x^2 + y^2)^{3/2}} dx dy, \quad (1)$$

где y - радиус витка, x - расстояние от его центра до точки, в которой измеряется магнитное поле.

При прохождении электрического тока в витке выделяется тепловая мощность

$$dW = 2\pi j^2 \rho dx dy, \quad (2)$$

где ρ - удельное электрическое сопротивление.

Независимо от формы соленоида и вида функции распределения плотности тока напряженность магнитного поля в центре соленоида можно связать с потребляемой им мощностью общим соотношением:

$$H_0 = G \left(\frac{W \lambda}{\rho y_1} \right)^{1/2}, \quad (3)$$

где H_0 - напряженность магнитного поля в центре соленоида в эрстедах, W - затрачиваемая мощность в ваттах, λ - коэффициент заполнения, ρ - удельное сопротивление в омах на сантиметр, y_1 - внутренний радиус обмотки в сантиметрах, G - формфактор, величина которого зависит от формы обмотки и распределения плотности тока в ней.

При конструировании соленоидов и их сравнительной оценке исходят, главным образом, из выражения (3). Это выражение называют основной формулой соленоида.

Формфактор соленоида определяется из выражения:

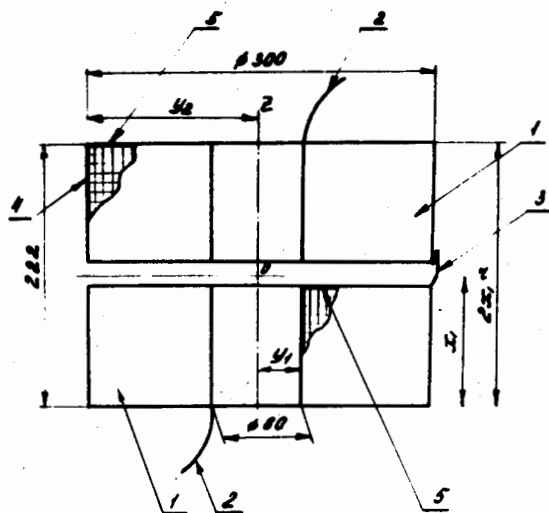


Рис.2. Геометрия оптимального варианта высоковольтного соленоида. 1 - катушки соленоида; 2 - токоподводы; 3 - межкатушечное соединение; 4 - бандаж из стеклоленты с эпоксидом; 5 - эпоксидная изоляция с наполнителем из кварцевого песка. Основные размеры соленоида: y_1 - внутренний радиус = 4 см; y_2 - наружный радиус = 14,5 см; x_1 - половина длины соленоида = 11,1 см.

Таблица 1

Замеры по приборам и датчикам.		Расчётные величины.		Разница в напряженности	
Напряженье на емкости, в кв.	Импульс тока, в а	Напряжённость в центре между катушками, в кэ	Импульс тока, в а	Напряжённость в центре между катушками, в кэ	Напряжённость между замером и расчетом, в кэ
3	546	20,7	600	22,7	2,7
5	920	35	1000	38,0	3,0
10	1900	72	2000	76,0	4,0
12	2300	87	2400	91,0	4,0
15	2880	110	3000	114,0	4,0
17	3350	124	3400	129,0	5,0
18,5	3500	134	3700	140,0	6,0

$$G = \left(\frac{2\pi}{5}\right)^{1/2} \left(\frac{\beta}{\alpha^2 - 1}\right)^{1/2} \ln \frac{\alpha + (\beta^2 + \alpha^2)^{1/2}}{1 + (\beta^2 + 1)^{1/2}} \quad (4)$$

В этом уравнении за единицу длины выбран внутренний радиус соленоида y_1 . Тогда отношение внешнего радиуса к внутреннему дает коэффициент $\alpha = \frac{y_2}{y_1}$, а отношение половины длины соленоида x_1 к радиусу y_1 дает коэффициент $\beta = \frac{x_1}{y_1}$.

При постоянной плотности тока по сечению в цилиндрическом соленоиде формфактор нельзя получить больше, чем 0,179. При выбранной геометрии $G = 0,177$.

Наличие изоляции в соленоиде учтено введением коэффициента заполнения

$$\lambda = \frac{V_1}{V_1 + V_2} \quad (5)$$

где V_1 - объем проводящей среды, V_2 - объем пространства, которое не заполнено проводником. Для двухкатушечного соленоида $\lambda = 0,84$. Для одной катушки $\lambda = 0,92$.

Результаты расчетов максимального значения напряженности магнитного поля в центре рабочей зоны и значение импульса тока в соленоиде в зависимости от приложенного импульсного напряжения приведены в таблице 1. Для сравнения в таблице также приведены результаты замера максимальной напряженности поля в центре высоковольтного соленоида и величина импульса тока при соответствующем напряжении.

На рис. 3 показана характеристика равномерности напряженности магнитного поля по оси соленоида как отношение H_z / H_{0z} . На рис. 4 показана характеристика равномерности магнитного поля по радиусу соленоида как отношение H_z / H_{0z} .

Кривые на рис. 3 и 4 построены по опытным замерам при $H_{0z} = 500$ эрстед.

Магнитное поле соленоида, в силу его симметрии, можно рассматривать состоящим из двух составляющих: аксиальной и радиальной. Этим составляющим соответствуют две пондемоторные силы. Аксиальная сила

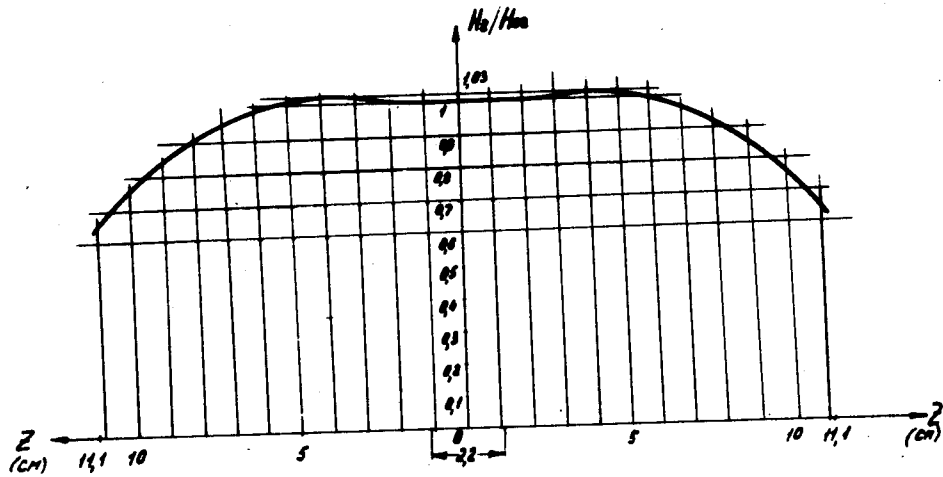


Рис.3. Характеристика равномерности напряженности магнитного поля по оси высоковольтного соленоида. H_z - значение напряженности магнитного поля на оси соленоида; H_{0z} - значение напряженности магнитного поля в центре соленоида между его катушками.

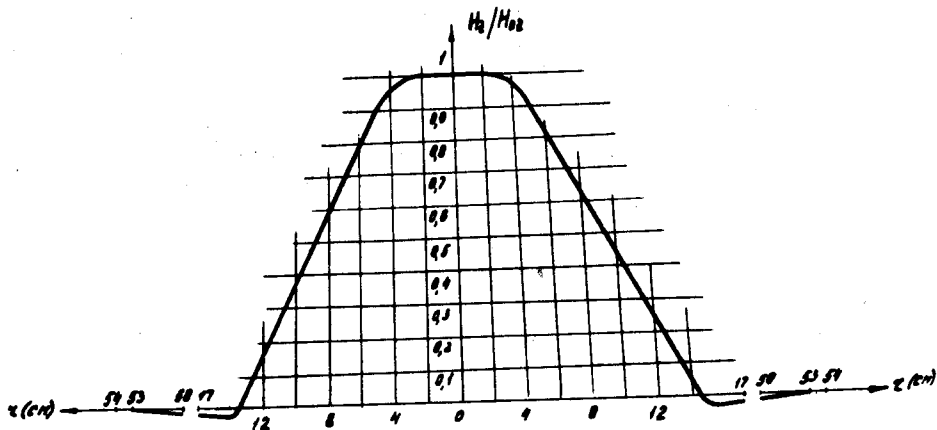


Рис.4. Характеристика равномерности напряженности магнитного поля в средней плоскости высоковольтного соленоида H_{0z} - значение напряженности магнитного поля в центре соленоида между его катушками; H_z - значение напряженности магнитного поля в плоскости, перпендикулярной оси z , лежащей между катушками соленоида; z - ось соленоида.

$F_z = 1/10 j H_z$, стремится сжать соленоид с торцов и сдвинуть витки катушек по оси z .

Радиальная сила $F_r = 1/10 j H_z$ направлена по радиусу наружу. Эта сила стремится разорвать катушки.

Оценочные расчеты показывают, что удельные нагрузки от радиальных сил меньше, чем удельные нагрузки от аксиальных сил. По оценочному расчету при $H_{0z} = 140$ кэ катушки высоковольтного соленоида сжимаются с усилием в 122 т. При этом средняя удельная нагрузка на торцевые поверхности катушек составляет 202 кг/см^2 , а максимальная нагрузка достигает 734 кг/см^2 .

Предел прочности эпоксидной смолы на сжатие - $1200-1500 \text{ кг/см}^2$.

О правильности расчетов по механическим усилиям можно судить только по испытаниям. За время испытаний (100 часов работы) трещин, сколов, сдвигов витков и других деформаций на катушках не обнаружено. То, что катушки выполнены монолитными и имеют бандажи из стеклоэпоксида, позволяет им удовлетворительно справляться с механическими усилиями, возникающими в высоковольтном соленоиде.

Подробно тепловые режимы соленоида здесь не освещены.

За номинальный режим работы высоковольтного соленоида принят режим работы, когда пауза между импульсами поля равна 18,3 сек. При таком режиме соленоид должен обдуваться воздухом комнатной температуры. Для этих целей имеется переносный вентилятор со шлангами. При указанных условиях максимальная температура в центральных витках катушек не будет превышать 60°C , а на поверхности изоляции - 32°C . Приведенные данные по температуре подтверждены опытными измерениями.

Технология изготовления катушек высоковольтного соленоида предусматривает использование эпоксидной смолы как для целей склейки, так и для усиления электрической изоляции. Катушки наматываются на разборную форму шпунечного вида. Форма изготавливается из металла. В процессе намотки хлопчатобумажная изоляция провода марки ПБД 7,4x2,8 обильно смачивается и пропитывается подготовленной эпоксидной смолой с отвердителем. Кроме того, эпоксидная смола кисточкой

наносится на уложенные витки в форме катушки. По наружной поверхности катушки обматываются стеклотентой, пропитанной в эпоксидной смоле. Толщина обмотки-бандажа - 5-6 мм. Удобно вести намотку катушек в центрах токарного станка.

После суточного пребывания намотанной катушки при комнатной температуре (процесс вяления) катушки проходят термообработку в нагревательной печи. Термообработка ведется по следующему режиму:

- а) подъем температуры до 100°C - 6 часов,
- б) подъем температуры от 100°C до 140°C - 6 часов,
- в) поддержание температуры 130°C - 140°C - 12 часов,
- г) остывание до окружающей температуры - 10-12 часов.

После такой термообработки эпоксидная смола полностью полимеризуется и катушки превращаются в монолит, состоящий из проводника и изоляции. Для изготовления катушек высоковольтного соленоида использован компаунд марки К-115 на базе эпоксидной смолы марки ЭД-5. В качестве отвердителя использован кристаллический гексаметилендиамин.

Рецепт клеящей основы следующий: 9 весовых частей гексаметилендиамина на 100 весовых частей К-115. Время жизни такого состава (от введения в смолу отвердителя до начала схватывания) 3-3,5 часа.

Ниже приводятся основные характеристики высоковольтного соленоида.

1. Количество витков в одной катушке	- 396
2. Количество витков в соленоиде	- 792
3. Объем одной катушки	- 6,6 л
4. Объем двух катушек	- 13,2 л
5. Объем межкатушечного пространства	- 1,53 л
6. Объем, в котором генерируется поле высокой напряженности	- 1,2 л
7. Отношение объема катушек соленоида к объему, в котором генерируется поле высокой напряженности - коэффициент K_c	- 11
Результаты измерений:	
8. Индуктивность соленоида в сборе	- 0,042 гн.

9. Омическое сопротивление соленоида при $t^0 = -20^{\circ}\text{C}$ - 0,42 ом.
10. Рабочее напряжение - 17 кв (импульс)
11. Испытательное напряжение - 30 кв (импульс)
12. Вес соленоида в сборе - 100 кг

Заключение

1. Двухкатушечный высоковольтный соленоид отличается от подобных устройств тем, что он многовитковый, имеет сравнительно большую индуктивность и способен работать на высоком напряжении.

2. В известных устройствах подобного типа коэффициент K_e имеет значительно большие значения. В этом отношении высоковольтный соленоид имеет явные преимущества в силу того, что канализация энергии для генерирования поля производится на высоком напряжении.

3. Высоковольтный соленоид имеет следующие конструктивные особенности:

а) каждая катушка высоковольтного соленоида представляет собой монолитное тело. Витки ее прочно скреплены друг с другом эпоксидной смолой. Смола выполняет роль электрической изоляции и является прочной решеткой, которая распределяет механические нагрузки наиболее равномерно на опорные поверхности и бандажи соленоида. Кроме того, эпоксидная смола при усадке плотно облегают каждую точку витка и этим нейтрализует возможные локальные механические перенапряжения в изоляции. Можно предположить, что, имея упругие свойства значительно лучше, чем медь, эпоксидная смола воспринимает механические усилия от витков и удовлетворительно работает при ударных нагрузках;

б) высоковольтный соленоид выполнен только из меди и изоляционного материала и не имеет деталей из других материалов;

в) выполнение токоподводов вблизи катушек по силовым магнитным линиям разрешает задачу их механической прочности и упрощает их конструкцию.

4. Небольшой вес, малые габариты, простота системы охлаждения весьма выгодно отличают высоковольтный соленоид как транспортабельное устройство.

Автор выражает благодарность Н.И. Павлову, Л.Н.Беляеву, А.А.Смирнову, Н.К.Соболеву, М.А.Невзорову за полезные советы и помощь в работе, а также Г.Г.Тахтамышеву и М.С.Журавлевой за выполненные расчёты на БЭСМ-3М.

Л и т е р а т у р а

1. П. Л. Калантаров, Л. А. Цейтлин. Расчет индуктивностей. ГЭИ, 1955.
2. В. Р. Карасик. Физика и техника сильных магнитных полей. Изд. "Наука", 1964.
3. В. В. Михайлов. Расчет и конструирование высоковольтной аппаратуры. ГЭИ, 1955.
4. К. И. Черник, Эпоксидные компаунды и их применение. Судпрогиз, 1959.
5. Н. И. Бачурин. Литая изоляция высокого напряжения. ГЭИ, 1963.

Рукопись поступила в издательский отдел

4 декабря 1968 года.