

О НЕКОТОРЫХ ОСОБЕННОСТЯХ СВЕРХПРОВОДЯЩЕЙ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ С ВЫСОКОЙ ПЛОТНОСТЬЮ ТРАНСПОРТНОГО ТОКА

В.О. Ильичева, В.Ф. Тихонов, В.Б. Юферов

*Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»,
Харьков, Украина*

E-mail: v.yuferov@kipt.kharkov.ua

Рассмотрен процесс перехода сверхпроводящего соленоида (с высокой плотностью тока, замонотиченного, с косвенным охлаждением) в нормальное состояние для разных плотностей транспортного тока ($2 \dots 8 \cdot 10^4$ А/см² в магнитном поле ~ 6 Т; запасенная энергия 1,26 МДж. Получены величины электрических напряжений на соленоиде при разных темпах выведения энергии из него. Показаны преимущества внешнего возрастающего нелинейного сопротивления перед постоянным.

В настоящее время разработаны ниобий-титановые сверхпроводники с плотностями критического тока ($2 \dots 4 \cdot 10^5$ А/см² в полях 5...7 Тл для длинномерных кусков [1], в то время как величины плотности транспортного тока в сверхпроводящих (СП) соленоидах, как правило, находятся на уровне $1.5 \cdot 10^4$ А/см² [2]. Поэтому повышение плотности транспортного тока в обмотке сверхпроводящих соленоидов до величин, близких к плотности критического тока материала обмотки, является актуальным для реализации ряда преимуществ СП-магнитных систем. В данной работе продолжено исследование тепловых процессов, возникающих при повышении плотностей транспортного тока в СП-магнитных системах до $\sim 8 \cdot 10^4$ А/см² в полях ~ 6 Т.

В работе [3] представлены требуемые параметры сверхпроводящей магнитной системы плазменного сепаратора элементов и изотопов с величиной магнитного поля до 6 Тл. Магнитная система включает пять сверхпроводящих соленоидов общей длиной 310 см и диаметром "теплого" отверстия 60 см. Материал СП-обмотки - Nb-Ti, стабилизированный медью, в лаковой изоляции, диаметр провода 2 мм. Запасенная энергия $W \sim 6.0$ МДж; Соленоиды автономны и запитываются от независимых источников питания. Поэтому рассмотрим процесс перехода в нормальное состояние и вывод энергии для одного из них, где: $W=1.26$ МДж, $L=0.44$ Гн при разных плотностях транспортного тока: $(8.34; 4.0; 3.2; 2.4) \times 10^4$ А/см².

Соленоиды выполнены в замонотиченном варианте с косвенной системой охлаждения. Обмотка соленоидов компактная, послойная, коэффициент заполнения ~ 0.6 . При такой технологии изготовления СП-соленоидов в обмотке достигаются транспортные токи, равные токам короткого образца [1].

Тепловые характеристики стабилизирующего материала (Cu), материала замонотичивания (эпоксидная смола) и обмотки соленоида представлены на Рис.1,а и 1,б соответственно.

Пунктирные линии (Рис.1,б) показывают температуру, до которой нагреется выше указанный соленоид при выделении в нем 10, 50, 80 и, соответственно, 100% запасенной в нем энергии.

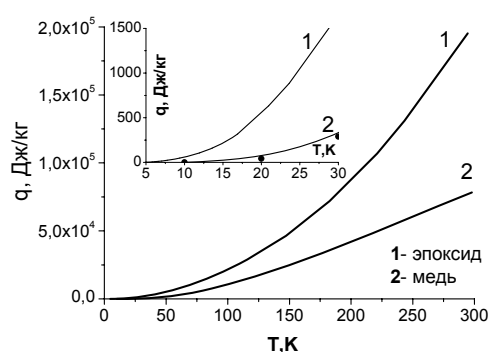


Рис.1,а. Удельное количество теплоты (1 - эпоксидная смола, 2 - медь) в зависимости от температуры

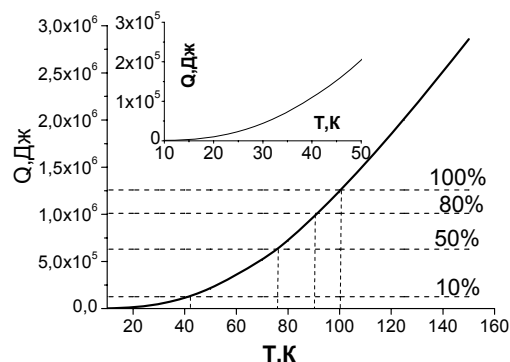


Рис.1,б. Теплосодержание обмотки соленоида ($W=1.26$ МДж) в зависимости от температуры

Если бы вся запасенная энергия этого соленоида при переходе его в нормальное состояние выделилась в обмотке, то произошел бы нагрев обмотки до температурного уровня 100 К, а при нагреве всей обмотки до 50 К выделяется лишь 16% от всей запасенной энергии соленоида.

Однако в виду малых величин скорости теплопередачи при спонтанном переходе замонотиченных СП-систем в нормальное состояние нагревается лишь небольшая часть обмотки [1]. Скорость роста температуры участка обмотки, перешедшей в нормальное состояние, определяется величиной $j^2 R / \text{ср}$. При неконтролируемом переходе этот локальный

нагрев может стать катастрофическим в плане сохранения прочностных и электроизоляционных свойств обмотки, поскольку механические напряжения в обмотке, связанные с ее локальным термическим расширением могут превысить величины ее прочности. Для большинства электроизоляционных материалов такой конструктивный термочрепностной предел, $T_{пк}$, находится на уровне 50 К. Для заданного $T_{пк}$ и крупных СП-систем энергия, идущая на нагрев части, перешедшей в нормальное состояние обмотки, не превосходит нескольких процентов от полной энергии, запасенной в обмотке. Поэтому оставшаяся запасенная энергия в соленоиде должна быть выведена на внешнюю нагрузку, $R_{внеш}$. Таким образом, время нагрева (τ_n) участка обмотки СП-системы, перешедшей в нормальное состояние, до термочрепностного предела $T_{пк}$, определяется плотностью транспортного тока, электросопротивлением и теплоемкостью обмотки: $\tau_n = cm\Delta T_n / I^2 \Delta R_n$. С другой стороны, τ_n равняется времени выведения энергии из всей СП-системы на внешнюю нагрузку: $\tau_n \approx \tau = L/R$, которое, в свою очередь, определяется индуктивной и активной составляющими цепи: $R = R_{сол} + R_{внеш}$.

При постоянной величине $R = R_{сол} + R_{внеш}$, где $R_{сол} \ll R_{внеш}$, и темп выведения, и напряжение на обмотке максимальны в начальный момент. Использование переменного, возрастающего во времени сопротивления, позволяет существенно снизить эти величины.

В качестве $R_{внеш}$ для постоянного сопротивления выбран сплав фехраль, FeCrAl, а в случае переменного сопротивления – вольфрам, R_w . [5].

Если при установившемся токе I_m соленоид на точечном участке кабеля длиной $l = 0.01$ м теряет сверхпроводимость, изменение тока во времени при переходе его в нормальное состояние t определяется как:

$$I(t) = I_m \cdot \exp\left(-\frac{t}{\frac{L}{R_{Cu} + R_{Fe(W)}}}\right), \quad (1)$$

где $R_{Cu} = \rho_{Cu}(T(t)_{Cu}) \cdot \frac{l}{S_{Cu}}$,

$$R_{Fe(W)} = \rho_{Fe(W)}(T(t)_{Fe(W)}) \cdot \frac{4 \cdot l_{Fe(W)}}{\pi \cdot d_{Fe(W)}^2}. \quad (2)$$

Здесь: $\rho_{Cu}(T(t)_{Cu})$, $\rho_{Fe(W)}(T(t)_{Fe(W)})$ – удельные электрические сопротивления соответственно меди и материала внешнего сопротивления (фехраль либо вольфрам) в зависимости от их температуры; $l_{Fe(W)}$, $d_{Fe(W)}$ – длина и диаметр соответствующего внешнего сопротивления.

Для определения $l_{Fe(W)}$, $d_{Fe(W)}$, обеспечивающих температуру участка l , которая не превышает $T_{пк}$ (50 К), необходимо решить систему уравнений:

$$I(t)^2 \cdot R_{Cu} \cdot dt = (c_{Cu}(T(t)_{Cu}) + c_{is}(T(t)_{Cu}) * k) \cdot \delta_{Cu} \cdot l \cdot S_{Cu} \cdot dT_{Cu},$$

$$I(t)^2 \cdot R_{Fe(W)} \cdot dt = c_{Fe(W)}(T(t)_{Fe(W)}) \cdot \delta_{Fe(W)} \cdot l_{Fe(W)} \cdot \frac{\pi \cdot d_{Fe(W)}^2}{4} \cdot dT_{Fe(W)} +$$

$$+ \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T(t)_{Fe(W)}^4 - 293^4) \cdot \frac{\pi \cdot d_{Fe(W)}^2}{4} \cdot dt. \quad (3)$$

Здесь: $c_{Cu}(T(t)_{Cu})$, $c_{is}(T(t)_{Cu})$ – удельные теплоёмкости меди и изолятора соответственно; $c_{Fe(W)}(T(t)_{Fe(W)})$ – удельные теплоёмкости внешнего сопротивления (фехраль или вольфрам); k – коэффициент отношения масс изолятора и меди; δ_{Cu} , δ_w – плотности меди и вольфрама соответственно; σ – постоянная Стефана-Больцмана; ε – степень черноты.

Используя экспериментальные данные для $\rho_{Cu}(T)$, $\rho_{Fe(W)}(T)$, $c_{Cu}(T)$, δ_{Cu} , $c_{Fe(W)}(T_{Fe(W)})$ и $\varepsilon_{Fe(W)}$, система уравнений (3) решалась методом Рунге-Кутты с начальными условиями: $T(0)_{Cu} = 4K$, $T(0)_{Fe(W)} = 293K$ для плотностей тока в обмотке: $j = 8.34 \cdot 10^4 A/cm^2$ (варианты 1 и 5); $j = 4.0 \cdot 10^4 A/cm^2$ (варианты 2 и 6); $j = 3.2 \cdot 10^4 A/cm^2$ (варианты 3 и 7); $j = 2.4 \cdot 10^4 A/cm^2$ (варианты 4 и 8).

Результаты расчётов с использованием переменного и постоянного сопротивления представлены на Рис.2,3: варианты 1-4 – обмотка не компаундирована, т.е. $k=0$, и варианты 5-8 – компаундированная обмотка.

Как видно из Рис.2, компаундированная обмотка в адиабатическом режиме имеет преимущества перед незамоноличенной по более низким величинам температуры нагрева, что уменьшит тепловую нагрузку на систему криообеспечения.

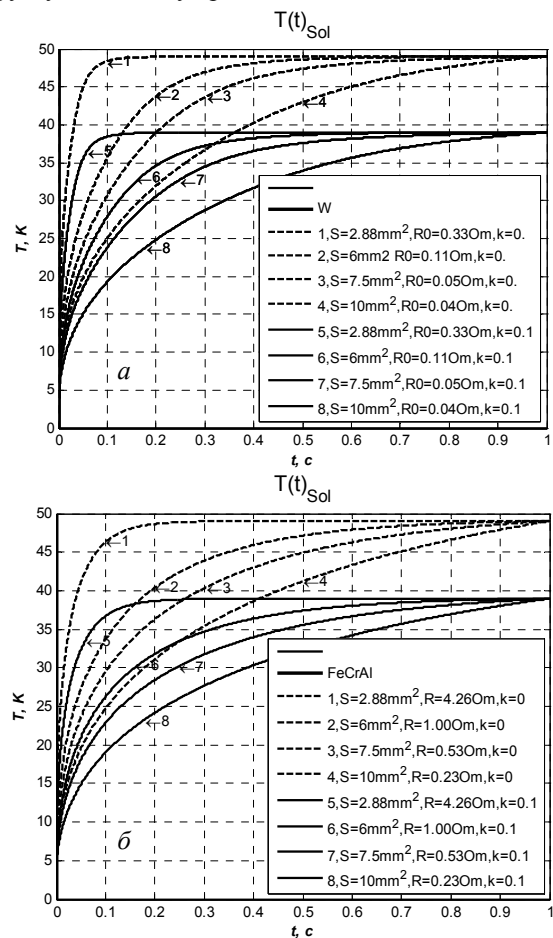


Рис.2. Нагрев обмотки соленоида во времени для различных величин плотности тока и величин переменных (а) и постоянных (б) внешних сопротивлений

Для магнитной системы с высокой плотностью транспортного тока в обмотке компаундирование материалом с достаточно высокой теплоемкостью при низких температурах [4] имеет важное значение, так как не происходит трения витков друг об друга с последующим разрушением обмотки.

Снижение плотности тока в обмотке позволяет существенно снизить скорости выведения энергии из соленоида, что явно уменьшает величины электрических напряжений на концах сверхпроводящей обмотки и уменьшает требования к материалам электроизоляции.

Для безопасной работы соленоидов использование переменного внешнего сопротивления вместо постоянного имеет также определенные преимущества. На Рис.3 показаны временные зависимости напряжений на соленоидах в процессе выведения энергии. Из рисунка видно, что величины напряжений на соленоиде с внешним переменным сопротивлением ниже, чем для внешнего постоянного сопротивления.

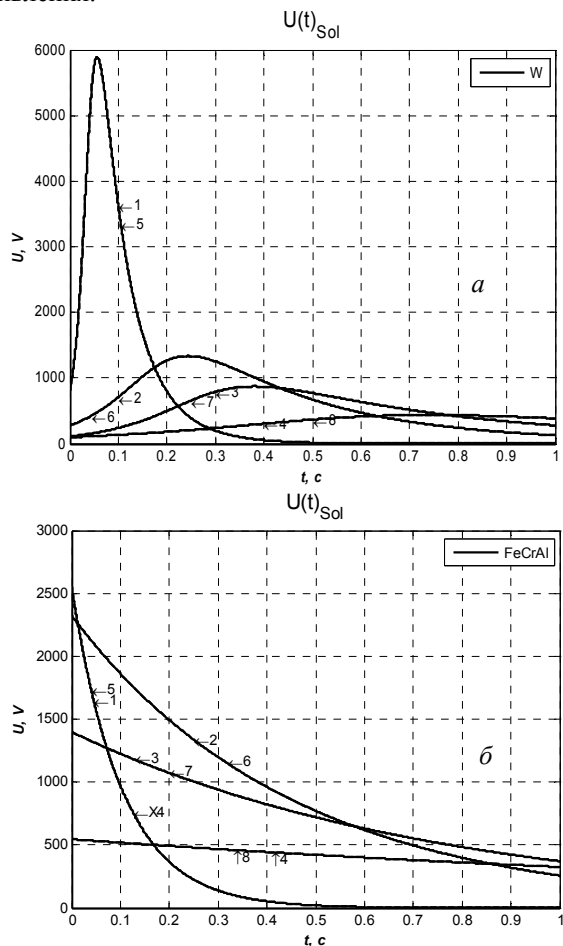


Рис.3. Зависимость напряжения на соленоиде от темпа выведения энергии (величины внешнего сопротивления) для различных величин плотности тока и величин переменных (а) и постоянных (б) внешних сопротивлений

В данной работе мы ограничились в расчетах первым приближением, без учета тепловыделения в обмотке за счет величины dH/dt , хотя переменные величины магнитного поля H в обмотке индуцируют переменные величины dH/dt в объеме СП-магнитной системы, что приводит к переменному

тепловыделению по объему в обмотке, причем в объеме значительно большем, чем распространяющаяся нормальная фаза.

Поэтому для безопасной работы магнитной системы необходим также учет тепловыделений в обмотке не только за счет растущей нормальной фазы, но и за счет величин dH/dt , которые максимальны в областях появления нормальной фазы.

ВЫВОДЫ

Рассмотрен процесс перехода сверхпроводящего соленоида (с высокой плотностью тока, замоналиченного, с косвенным охлаждением) в нормальное состояние. Для разных плотностей транспортного тока: $(2-8) \cdot 10^4 \text{ A/cm}^2$ в магнитном поле около 6 Т и запасенной энергии около 1 МДж определено время нагрева обмотки до установленного термостойкого предела $T_{пк}=50 \text{ К}$. Определены величины электрических напряжений на соленоиде при разных темпах выведения энергии.

Результаты свидетельствуют о работоспособности СП-соленоидов при достаточно высоких плотностях тока в обмотке, т.е. тепловые и электроизоляционные характеристики при выборе необходимых параметров не превышают установленный термостойкий предел. Возможность повышения плотности тока позволит уменьшить вес обмоток, что позволит сократить стоимость системы.

В свою очередь, использование "сухих" соленоидов, вместо погружных, способствует повышению надежности системы: эта конструктивная особенность необходима для снижения общего запаса жидкого гелия и повышения надежности системы и дальнейшего снижения веса всей системы, включая систему криообеспечения, а также с целью повышения надежности токовыводов в случае появления нормальной фазы при больших величинах напряжений, которые задаются исходя из скорости нагрева обмотки.

Использование сопротивления с переменной величиной, на которое выводится запасенная энергия соленоида, увеличивает плотность транспортного тока в соленоиде, а также существенно снижает напряжение и уменьшает величину dH/dt , т.е. оставляет меньше запасенной энергии в самом соленоиде. Использование переменного внешнего сопротивления вместо постоянного имеет преимущество также в том, что максимальное падение напряжения на нем ниже падения напряжения на постоянном сопротивлении.

Следует отметить, что при переходе СП-магнитной системы в нормальное состояние и выводе из нее энергии необходимо также рассмотреть способ уменьшения температурных градиентов в обмотке при быстром изменении величины поля в обмотке dH/dt . Вместе с тем, необходимо провести анализ пондеромоторных и термомеханических сил и способов их уменьшения.

ЛИТЕРАТУРА

1. В.Б. Юферов, О.С. Друй, Е.И. Скибенко и др. Сверхпроводящие магнитные системы сложной

- формы и с высокой плотностью транспортного тока // *Электротехника і Електромеханіка*, ISBN 966-593-254-3, 2003, №2, с.81-89.
2. *Сверхпроводящие машины и устройства*. М.: "Мир", 1977.
 3. В.Б. Юферов, В.О. Ильичёва, О.С. Друй, Е.В.Муфель, С.В. Шарый. О некоторых особенностях сверхпроводящей системы плазменного сепаратора изотопов // *Вестник национального технического университета «ХПИ 24»*, 2007.
 4. А.Б. Круглов. *Теплофизические свойства стеклоэпоксидов и эпоксидных смол при криогенных температурах / Автореф.* М.: МИФИ, 2007.
 5. В.Б. Юферов, В.Ф.Тихонов, В.О. Ильичёва. Защита сверхпроводящей магнитной системы с высокой плотностью тока // *Вестник национального технического университета "ХПИ 11"* 2009.

Статья поступила в редакцию 28.10.2009 г.

ON SOME FEATURES OF THE SUPERCONDUCTING MAGNETIC SYSTEM WITH HIGH TRANSPORT CURRENT DENSITY

V.O. Ilicheva, V.F. Tikhonov, V.B. Yuferov

Process of transition of the superconducting solenoid (with high density of a current, compounded, with indirect cooling) in a normal state for different transport current densities of a $(2...8) \cdot 10^4$ A/cm² in a magnetic field of ~6 T and the reserved energy 1,26 MJ is considered. The voltage values in the solenoid are obtained at different rates of energy release from it. Advantages of external increasing nonlinear resistance before constant one are shown.

ПРО ДЕЯКІ ОСОБЛИВОСТІ НАДПРОВІДНОЇ МАГНІТНОЇ СИСТЕМИ З ВИСОКОЮ ЩІЛЬНІСТЮ ТРАНСПОРТНОГО СТРУМУ

В.О. Ільичева, В.Ф. Тихонов, В.Б. Юферов

Розглянуто процес переходу у нормальний стан надпровідного соленоїду (з високою щільністю струму, замоноличеного, з непрямым заходженням) для різних щільностей транспортного струму $(2...8) \cdot 10^4$ А/см² у магнітному полі ~6Т; накопичена енергія 1,26 МДж. Отримані значення електричної напруги на соленоїді для різних темпів виведення енергії з нього. Продемонстровано переваги зростаючого змінного нелінійного зовнішнього опору перед постійним.