

## О ПОВЫШЕНИИ НАДЕЖНОСТИ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ МАГНИТНЫХ СИСТЕМ С ВЫСОКОЙ ПЛОТНОСТЬЮ ТОКА ПРИ ВЫСОКОМ ТЕМПЕ ВЫВЕДЕНИЯ ЗАПАСЕННОЙ ЭНЕРГИИ

*В.О. Ильичева, О.С. Друй, С.Н. Хижняк, В.Б. Юферов*

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

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

Повышение плотности транспортного тока сверхпроводящих (СП) соленоидов до величин, близких к плотности критического тока материала, позволяет уменьшить материалоемкость и, следовательно, стоимость СП-магнитных систем. При этом особую актуальность приобретает проблема повышения надежности СП-обмотки в случае перехода ее в нормальное состояние. Для повышения надежности СП-обмотки рассмотрен комплекс мер, который позволяет обеспечить безопасный процесс вывода около 90 % запасенной энергии за 0,1..1 с ( $dH/dt \approx 50...500$  кЭ/с) при переходе СП-обмотки в нормальное состояние.

Путем повышения плотности транспортного тока сверхпроводящих (СП) соленоидов возможно снизить материалоемкость СП-магнитных систем. В данной работе рассмотрены вопросы обеспечения надежности СП-магнитной системы плазменного резонансного сепаратора изотопов [1] при повышении плотности транспортного тока в обмотке до  $\sim 8 \cdot 10^4$  А/см<sup>2</sup> в полях  $\sim 5$  Тл.

Выбор СП-обмотки проводился в соответствии с критерием «минимум материалоемкости при максимуме надежности». В качестве сверхпроводящего материала могут использоваться современные СП-материалы с высокими токнесущими характеристиками (в частности, ниобий-титановый сверхпроводник, который имеет конструктивную плотность тока  $\sim 10^5$  А/см<sup>2</sup> при 5 Тл [2]).

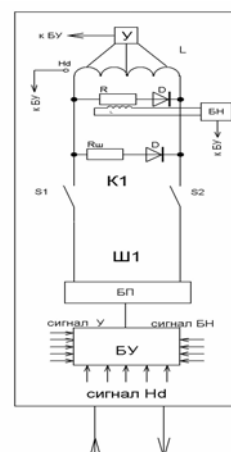
В целях сохранения целостности обмотки с некоторым запасом прочности задавалась невысокая допустимая температура нагрева обмотки (50 К) [3]. В связи с этим при переходе СП-обмотки в нормальное состояние требуется быстрое выведение запасенной энергии, чтобы предел допустимого нагрева обмотки не был превышен.

Для снижения уровня нагрева обмотки и уменьшения риска пробоев преимущество имеет компаундированная обмотка [4]. При достаточно низкой допустимой температуре нагрева (50 К) для уменьшения термомеханических напряжений требуется материал замоналичивания с высокой теплоемкостью, так как при низких температурах резко снижается теплоемкость материалов. В качестве компаунда рассматривался эпоксид, однако возможно использовать эпоксид с различными добавками и другие компаунды, имеющие высокую теплоемкость при низких температурах.

В различных системах используются разные схемы защиты обмотки, которые предполагают при переходе СП-обмотки в нормальное состояние частичное выведение энергии на каркас, либо частичное выведение энергии за счет использования межвиткового шунтирования внутри криостата [5]. При этом запасенная энергия остается внутри системы, увеличивая нагрузку на систему криообеспечения.

Особенностью переходного процесса в данном случае является быстрый вывод практически всей

запасенной энергии из системы:  $\sim 90$  % в течение 0,1..1 с на внешние сопротивления, имеющиеся в каждой секции обмотки (Рис.1), и энергия выводится одновременно из всех секций.



*Рис.1. Принципиальная схема системы защиты секции СП-магнитной системы плазменного сепаратора изотопов*

При этом возникает высокое напряжение на обмотке (до 10 кВ). Для уменьшения напряжения предусмотрено использование переменного, возрастающего во времени внешнего сопротивления. Использование сопротивления с переменной величиной уменьшает также величину начального напряжения на обмотке и оставляет меньше запасенной энергии в самом соленоиде, что позволяет увеличить плотность транспортного тока. В качестве внешнего сопротивления было выбрано вольфрамовое сопротивление  $R_w$  [3]. Поскольку все соленоиды в СП-магнитной системе запитываются автономно, был рассмотрен переходный процесс для одного соленоиды с запасенной энергией 1,26 МДж для различной плотности транспортного тока в обмотке: 1 и 5 –  $j = 8,34 \cdot 10^4$  А/см<sup>2</sup>; 2 и 6 –  $j = 4,0 \cdot 10^4$  А/см<sup>2</sup>; 3 и 7 –  $j = 3,2 \cdot 10^4$  А/см<sup>2</sup>; 4 и 8 –  $j = 2,4 \cdot 10^4$  А/см<sup>2</sup> для компаундированной и некомпьюндированной обмоток (Рис.2).

В зависимости от плотности транспортного тока были определены величины  $R_w$  (Рис.3), которые определяют темп вывода запасенной энергии из обмотки.

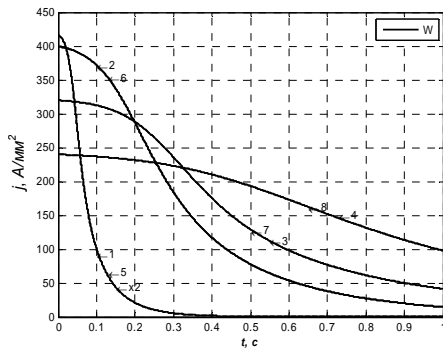


Рис.2. Плотность тока  $j(t)$  для некомпандинрованной (1-4) и компандинрованной (5-8) обмоток

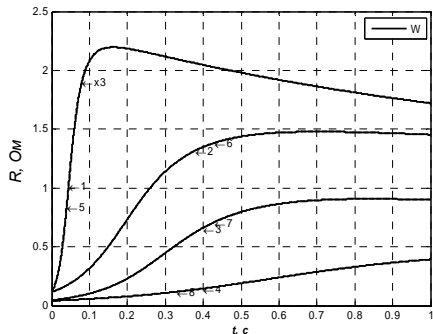


Рис.3. Зависимость  $R_w(t)$  для различных величин плотности транспортного тока [3] в СП-соленоиде:

- 1,5 –  $R_{0w} = 0,33 \text{ Ом}$ ; 2,6 –  $R_{0w} = 0,11 \text{ Ом}$ ;
- 3,7 –  $R_{0w} = 0,05 \text{ Ом}$ ; 4,8 –  $R_{0w} = 0,04 \text{ Ом}$

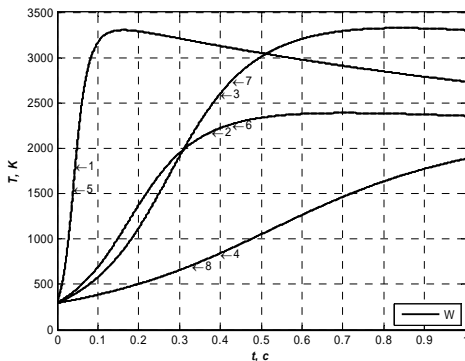


Рис.4. Динамика нагрева внешнего сопротивления  $R_w$

При этом температура вольфрамового сопротивления  $T_w(t)$  меньше температуры плавления вольфрама (Рис.4), а нагрев СП-обмотки меньше 50 К [3], что в заданных условиях обеспечивает требуемый уровень надежности СП-обмотки.

Запасенная энергия выводится на внешнее сопротивление с высоким темпом,  $dH/dt \approx 500 \text{ кЭ/с}$ , что приводит к росту токов Фуко. Для определения общего нагрева обмотки СП-соленоида при переходе его в нормальное состояние была проведена оценка повышения температуры обмотки за счет индукционных токов. В случае СП-соленоидов с высокой плотностью тока для оценки энергопотерь были использованы экспериментальные данные [6] и величина теплосодержания  $Q_t$  единичного отрезка длины обмотки соленоида, полученной из расчета общего теплосодержания обмотки [3]. Экспериментально измеренные величины энерговыделений для частот  $f = 500$  и  $20 \text{ Гц}$  и  $B \approx 2 \text{ Тл}$  представлены на Рис.5. Путем экстраполяции данных (кривые 1 и 2) к величинам  $dH/dt$  и уровню магнитных полей 3...5 Тл для величин  $dH/dt \approx 50 \text{ кЭ/с}$  в интервале

температур 4...40 К и несинусоидальной формы импульса была получена зависимость 3.

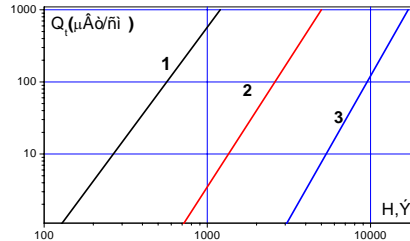


Рис.5. Энергопотери в СП-кабеле: 1,2 – при  $T=4 \text{ К}$  для частот 500 и 20 Гц соответственно; 3 – при  $dH/dt = 50 \text{ кЭ/с}$

Оценка величины нагрева СП-обмотки за счет индукционных токов составляет:  $\Delta T = Q_t I^2(t) \tau / c(T) m \approx 14 \text{ К}$ . Таким образом, вся ниобий-титановая обмотка перейдет в нормальное состояние, и из-за отсутствия локальных нагревов уменьшатся величины термомеханических напряжений в обмотке.

Важным моментом является использование тоководов из ВТСП-материалов [2], которые определяют параметры и эксплуатационные свойства системы. При этом для уменьшения теплопритока нет необходимости снижать величины транспортного тока в обмотках. Это существенно может уменьшить величины индуктивности секций магнитной системы и стоимость всей системы в целом. Использование ВТСП-тоководов (80...100 К) не только позволяет повысить транспортную плотность тока в обмотке, или коэффициент запаса – отношение транспортного тока в обмотке к току короткого образца,  $I_{Т,Т}/I_{к,о}$ , но и ведет к снижению напряжения на тоководах при аварийном выведении энергии из соленоидов ( $U \approx L dI/dt$ ). При этом оптимальным расположением СП-тоководов является область наружной части соленоида с минимальным значением магнитного поля [7].

Особое место занимают вопросы электроизоляции, которые возникают при аварийном выводе энергии из соленоидов с большой запасенной энергией и высокой плотностью транспортного тока. Сверхпроводящая обмотка (Рис.6) на алюминиевом цилиндре, охлаждаемом протоком гелия через трубки, приваренные на тепловой контакт, находится внутри радиационного экрана с температурой 30...40 К, который, в свою очередь, теплоизолирован от внешних стенок вакуумного объема с помощью многослойной суперизоляции. При этом для уменьшения материалоемкости системы и улучшения вакуумных условий криостаты СП-соленоидов могут использоваться одновременно в качестве вакуумных крионасосов.

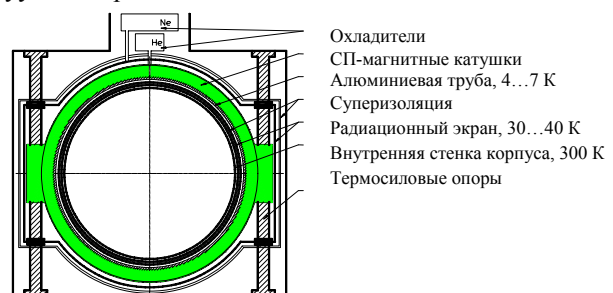


Рис.6. Поперечный разрез СП-магнитной системы плазменного сепаратора изотопов

Косвенное охлаждение обмотки обеспечивает повышение величины пробойного напряжения, а для снижения индукционных токов в конструкции предусмотрен алюминиевый каркас с незамкнутым контуром.

Таким образом, для повышения надежности СП-магнитной системы плазменного резонансного сепаратора изотопов [1] был применен комплексный подход, который включает: использование современных СП-материалов с высокими токонесущими характеристиками; низкую величину допустимого нагрева обмотки (50 К); компаундированную обмотку; быстрый вывод (0,1...1 с) почти всей запасенной энергии (~90 %) с высоким  $dH/dt$  (50...500 кЭ/с) на переменное возрастающее во времени внешнее сопротивление; электроизоляцию между тоководами, рассчитанную на напряжение 10 кВ; алюминиевый каркас с незамкнутым контуром; секционированную обмотку; косвенное охлаждение обмотки; наличие в криостате промежуточного радиационного экрана, охлаждаемого жидким неоном (30...40 К); использование ВТСП-тоководов (80...100 К); использование криостатов СП-соленоидов в качестве вакуумных крионасосов; оптимальное расположение СП-тоководов и СП-ключей.

### ВЫВОДЫ

Рассмотрены вопросы обеспечения надежности СП-магнитной системы плазменного резонансного сепаратора изотопов при высокой плотности транспортного тока в обмотке, вплоть до  $\sim 8 \cdot 10^4$  А/см<sup>2</sup> в полях  $\sim 5$  Тл. В данной работе особенностью переходного процесса является достаточно низкая величина (50 К) допустимого нагрева СП-обмотки с высокой плотностью транспортного тока при быстром темпе вывода запасенной энергии из нее, что в результате ведет к уменьшению тепловой нагрузки на систему криообеспечения и ускорению процесса возврата СП-системы в работоспособное состояние.

Проведено математическое моделирование переходного процесса в нормальное состояние СП-соленоида с запасенной энергией  $\sim 1,26$  МДж, в рамках которого был проведен расчет роста температуры внешнего вольфрамового сопротивления во времени для разной плотности транспортного тока  $(2...8) \cdot 10^4$  А/см<sup>2</sup> в полях  $\sim 5$  Тл при разном темпе вывода запасенной энергии ( $dH/dt \approx 50...500$  кЭ/с) из соленоида. Для повышения надежности СП-обмотки

рассмотрен комплекс мер, который позволяет обеспечить безопасный процесс вывода около 90 % запасенной энергии за 0,1...1 с при ее переходе в нормальное состояние. В частности, переменное возрастающее во времени сопротивление, на которое выводится запасенная энергия, используется для уменьшения напряжения на СП-обмотке, а для снижения индукционных токов предлагается алюминиевый каркас с незамкнутым контуром. Соблюдение рекомендованных мер в комплексе определяет уровень надежности СП-магнитной системы с высокой конструктивной плотностью тока.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. 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, с.99-103.
2. J. Schwartz, T. Effio, Liu Xiaotao, et al. High Field Superconducting Solenoids Via High Temperature Superconductors // *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. 2008, v.18, issue 2, p.70-81.
3. В.О. Ильичева, В.Ф. Тихонов, В.Б. Юферов. О некоторых особенностях сверхпроводящей магнитной системы с высокой плотностью транспортного тока // *Вопросы атомной науки и техники. Серия "Ядерно-физические исследования"*(53). 2010, в.2, с.74-77.
4. В.Б. Юферов, В.Ф. Тихонов, В.О. Ильичева. Защита сверхпроводящей магнитной системы с высокой плотностью тока // *Вестник национального технического университета "ХПИ"* (11), 2009, с.189-198.
5. A.V. Bragin, L.M. Barkov, S.V. Karpov, et al. Test Results of the Thin SC Solenoid for the CMD-3 Detector // *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. 2008, v.18, issue 2, p.399-402.
6. K. Kudo, A.C. Aihara. Loss of superconducting Nb-Ti-Zr alloys // *ICEC-4*. Eindhoven. Netherlands. 1972.
7. В.Б. Юферов, В.О. Ильичева, В.А. Сероштанов, С.В. Шарый. О выборе оптимального расположения тоководов и сверхпроводящих ключей в сверхпроводящих магнитных системах // *Вестник национального технического университета "ХПИ"* (7), 2008, с.112-117.

Статья поступила в редакцию 23.05.2011 г.

### ON A RELIABILITY INCREASE OF THE SUPERCONDUCTING MAGNETIC SYSTEMS WITH HIGH CURRENT DENSITY AT HIGH RATE OF RESERVED ENERGY RELEASE

V.O. Pichova, O.S. Druj, S.N. Khizhnjak, V.B. Yuferov

An increase of a transport current density in superconducting solenoids to the values close to a critical current density of a material, allows to reduce materials consumption, and, hence, cost of superconducting magnetic systems (SMS). Thus the problem of superconducting winding reliability in case of its transition to a normal condition is of special importance. In order to increase the reliability of the superconducting winding the complex of measures is presented, which provides safe process of about 90 % reserved energy release for  $\sim 0,1...1$  s ( $dH/dt \approx 50...500$  kOe/s) at superconducting winding transition to a normal condition.

### ПРО ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ НАДПРОВІДНИХ МАГНІТНИХ СИСТЕМ З ВИСОКОЮ ЩІЛЬНІСТЮ СТРУМУ ПРИ ВИСОКОМУ ТЕМПІ ВИВЕДЕННЯ ЗАПАСЕНОЇ ЕНЕРГІЇ

В.О. Ільїчова, О.С. Друй, С.М. Хижняк, В.Б. Юферов

Підвищення густини транспортного струму надпровідних (НП) соленоїдів до значень, близьких до густини критичного струму матеріалу, дозволяє зменшити матеріаломісткість і, отже, вартість НП-магнітних систем. При цьому особливої актуальності набуває проблема підвищення надійності НП-обмотки в разі переходу її в нормальний стан. Для підвищення надійності НП-обмотки був розглянутий комплекс заходів, який дозволяє забезпечити безпечний процес виводу  $\sim 90$  % запасеної енергії за 0,1...1 с ( $dH/dt \approx 50...500$  кЕ/с) під час переходу НП-обмотки в нормальний стан.