

УДК 533.951

В.Б.ЮФЕРОВ, докт.техн.наук, ННЦ «ХФТИ»;
В.Ф.ТИХОНОВ, канд.техн.наук, ННЦ «ХФТИ»;
В.О.ИЛЬЧЕВА, ННЦ «ХФТИ»

ЗАЩИТА СВЕРХПРОВОДЯЩЕЙ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ С ВЫСОКОЙ ПЛОТНОСТЬЮ ТОКА

В надпроводящем соленоиде (с высокой плотностью тока, монолитного, с непрямым охлаждением) для разных плотностей транспортного тока определено время нагрева обмотки до установленной термомеханической границы, 50К, при его переходе в нормальное состояние. Для разных темпов выведения энергии из системы проведено сравнение напряжений на соленоиде для постоянного и переменного внешних сопротивлений.

For different densities of transport current in the superconducting solenoid (with high current density, monolith, with indirect cooling) the time of winding heating up to thermomechanical limit, 50K, is defined at its transition into the normal state. Comparison of a solenoid voltage for constant and variable resistances at different rates of energy release from the system the has been performed.

Повышение плотности транспортного тока в сверхпроводящих (СП) соленоидах до уровней больших, чем обычно используемые, $j \leq 10^4$ А/см², позволяет реализовать ряд преимуществ СП-систем: уменьшение веса, размеров, стоимости; снижение мощности обслуживающих криогенераторов [1]. Однако, для этого требуется использование новых материалов и технологий. Кроме того, большое значение приоб-

ретают вопросы электромеханической прочности, определяющей безопасность работы, в частности выведение энергии из сверхпроводящего соленоида, перешедшего в нормальное состояние. Аналогичные задачи неоднократно рассматривались [1-3], но при создании каждой крупной СП системы такой анализ проводится с учетом конкретных конструктивных и эксплуатационных требований.

В работе [4] представлены требуемые параметры сверхпроводящей магнитной системы сепаратора элементов и изотопов с максимальной величиной магнитного поля около 5 Тл. Магнитная система включает пять сверхпроводящих соленоидов общей длиной 310 см; диаметр «теплого» отверстия – 60 см. Материал СП-обмотки – Nb-Ti, стабилизированный медью, в лаковой изоляции. Запасенная энергия $W \sim 6$ МДж; конструктивная плотность тока $1,5 \cdot 10^4$ А/см².

Соленоиды выполнены в монолитном варианте с косвенной системой охлаждения (эта конструктивная особенность необходима для снижения общего запаса жидкого гелия и дальнейшего снижения веса всей системы, включая систему криообеспечения, а также с целью повышения надежности тоководов в случае появления нормальной фазы при больших величинах напряжений, которые задаются исходя из скорости нагрева обмотки. Обмотка соленоида – компактная, послойная, монолитная, коэффициент заполнения $\sim 0,6$. При такой технологии изготовления СП-соленоидов в обмотке достигаются транспортные токи, равные токам короткого образца [3]. Для монолитивания выбрана эпоксидная смола, тепловые характеристики которой представлены в [5]. Вычисленная интегральная величина теплоемкости этого изолятора в интервале 4К - 50К составляет:

$$c_{is} = \int_{4K}^{50K} c(T) dT = 5,6 \text{ КДж/кг.}$$

В настоящей работе рассмотрены проблемы, возникающие при повышении плотностей транспортного тока в СП магнитных системах до величин $\sim 8 \cdot 10^4$ А/см², близких к плотности тока сверхпроводящих материалов с улучшенными характеристиками [3]. Так как соленоиды системы [4] автономны и запитываются от независимых источников питания, проанализируем проблему защиты одного из них с $W = 1,26$ МДж и индуктивностью $L = 0,44$ Гн.

Как известно, при спонтанном переходе монолитных СП систем в нормальное состояние нагревается лишь небольшая часть обмотки [3]. Скорость роста температуры нормального участка обмотки определяется величиной $j^2 R/c_p$. 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 термочрезнопрочностной предел, $T_{пк}$, находится на уровне 50К и определяется прочностными и электроизоляционными свойствами материала замоноличивания обмотки и изоляционного лака на СП-кабеле. 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, $R_{внеш.}$, чтобы не испарять хладагент – жидкий гелий. Таким образом, время нагрева ($\tau_{п}$) участка обмотки СП-системы, перешедшей в нормальное состояние, до термочрезнопрочностного предела $T_{пк}$, определяется плотностью транспортного тока, электросопротивлением и интегральной теплоемкостью обмотки: $\tau_{п} = cm\Delta T_{п}/I^2\Delta R_{п}$. С другой стороны, $\tau_{п}$ равняется времени выведения энергии из всей СП-системы на внешнюю нагрузку: $\tau_{п} \approx \tau = L/R$, которое, в свою очередь, определяется индуктивной и активной составляющими цепи: $R = R_{сол} + R_{внеш.}$

Дополнительными, но чрезвычайно важными параметрами при этом процессе являются не только электрическое напряжение, возникающее на соленоиде $U = L dI/dt$, определяющее не только темп и количество выведенной энергии, но и нагрев всей обмотки за счет величины $dH/dt \sim dI/dt$ в обмотке соленоида. Переменная величина dH/dt в объеме СП-системы может вызвать значительное тепловыделение в обмотке, причем в объеме значительно большем, чем, распространяющаяся нормальная фаза, что также является одним из факторов безопасной работы магнитной системы. Ограничимся пока первым приближением, без учета тепловыделения в обмотке за счет величины dH/dt .

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. Будем считать, что выведение энергии на внешнюю нагрузку происходит без временной задержки, одновременно с появлением нормальной фазы в соленоиде. При этом электросхема отключает СП-соленоид от системы питания, и его энергия начинает выделяться на внешней нагрузке. Для определенности, в качестве материала внешнего электросопротивления в случае постоянного сопротивления был выбран фехраль ($R_{Fe} = Const$), а в случае переменного сопротивления выбран вольфрам, R_w .

Возьмем участок кабеля длиной $l=0.01$ м, на котором происходит локальная потеря сверхпроводимости. Его можно считать точечным, так

как его длина на пять порядков меньше длины кабеля. Если при установившемся токе Im соленоид на участке протяженностью l теряет сверхпроводимость, переходя в нормальное состояние, убывание тока во времени t определяется:

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

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 нахождения $l_{Fe(W)}$, $d_{Fe(W)}$, обеспечивающих температуру участка 1, которая не превышает $T_{пк}$ (50K), необходимо решить следующую систему уравнений:

$$\begin{aligned} I(t)^2 \cdot R_{Cu} \cdot dt &= \\ &= (c_{Cu}(T(t)_{Cu}) + c_{is}(T(t)_{Cu}) \cdot k) \cdot \delta_{Cu} \cdot l \cdot S_{Cu} \cdot dT_{Cu}. \\ I(t)^2 \cdot R_{Fe(W)} \cdot dt &= \\ &= c_{Fe(W)}(T(t)_{Fe(W)}) \cdot \delta_{Fe(W)} \cdot l_{Fe(W)} \cdot \frac{\pi \cdot d_{Fe(W)}^2}{4} \cdot dT_{Fe(W)} + \\ &+ \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T(t)_{Fe(W)}^4 - 293^4) \cdot \frac{\pi \cdot d_{Fe(W)}^2}{4} \cdot dt. \end{aligned} \quad (3)$$

Здесь: $c_{Cu}(T(t)_{Cu})$, $c_{is}(T(t)_{Cu})$, k , δ_{Cu} ; $c_W(T(t)_W)$, δ_W – удельные теплоемкости меди и изолятора соответственно, коэффициент отношения масс изолятора и меди, плотности меди и вольфрама соответственно; σ – постоянная излучения, ε – излучательная способность вольфрама.

Используя экспериментальные данные для $\rho_{Cu}(T)$, $\rho_{Fe(W)}(T)$, $c_{Cu}(T)$, δ_{Cu} , $c_{Fe(W)}(T_{Fe(W)})$ и $\varepsilon_{Fe(W)}$ [6-8], система уравнений (3) решалась методом Рунге-Кутты с начальными условиями: $T(0)_{Cu} = 4K$, $T(0)_{Fe(W)} = 293K$ для плотностей тока в обмотке (рис. 1-8):

- варианты 1 и 5 – $j = 8,34 \cdot 10^4$ А/см²;
- варианты 2 и 6 – $j = 4,0 \cdot 10^4$ А/см²;
- варианты 3 и 7 – $j = 3,2 \cdot 10^4$ А/см²;
- варианты 4 и 8 – $j = 2,4 \cdot 10^4$ А/см².

Результаты расчетов с использованием переменного сопротивления представлены на рис. 1-4: варианты (1-4) – обмотка не компаундирована, то есть $k = 0$, и варианты (5-8) – компаундированная обмотка.

Результаты расчетов с использованием постоянного сопротивления представлены на рис. 5-8: варианты (1-4) – обмотка не компаундирована, то есть $k = 0$, и варианты (5-8) – компаундированная обмотка.

Из рис. 2 в случае максимальной плотности тока мы видим, что ее величина падает практически до нуля за 0,5 с. Температура участка обмотки l (рис. 2) не превышает 50К, температура вольфрамового сопротивления (рис. 4) не превышает температуры плавления вольфрама (3500К). При этом, как показали расчеты на участке l компаундированной обмотки соленоида в течении одной секунды выделяется энергия, равная 0,22 Дж, а на вольфрамовом сопротивлении 1,12 МДж (омические потери). Если параллельно соленоиду подключить только диод, без внешнего сопротивления, то при срыве сверхпроводимости на участке l температура участка непрерывно со временем растет и уже по истечении 0,1 с превышает 60 К. Максимальное напряжение на вольфрамовом сопротивлении ~ 6 КВ (рис. 5). Уменьшить напряжение на вольфрамовом сопротивлении можно, увеличив площадь сечения меди кабеля соленоида (кривые 2-4, 6-8, рис. 3).

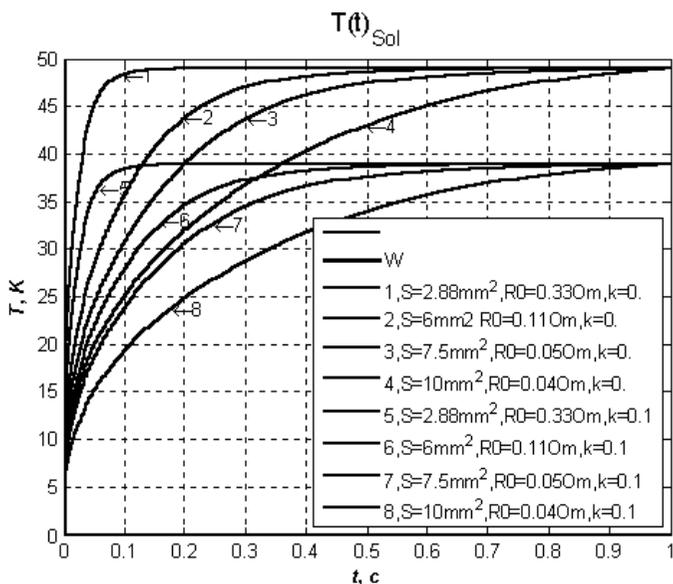


Рисунок 1 – Нагрев обмотки соленоида во времени для различных величин плотности тока и величин переменных внешних сопротивлений

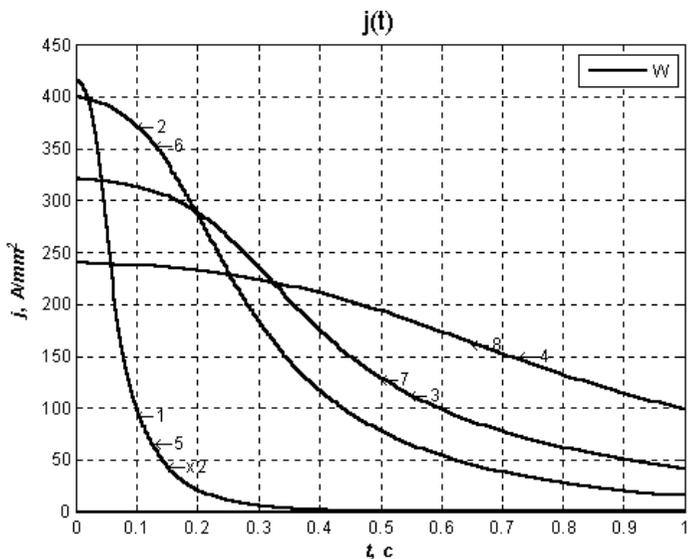


Рисунок 2 – Зависимость плотности тока в соленоиде от времени; величина плотности тока для кривых 1 и 5 должна быть удвоена(x2)

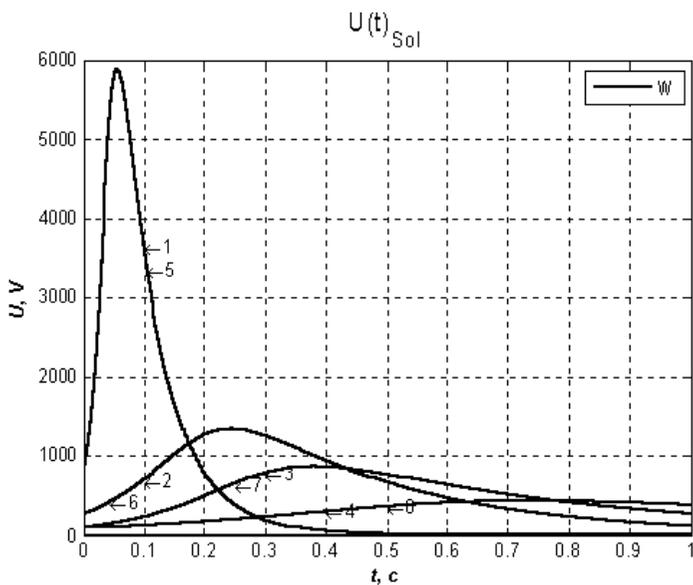


Рисунок 3 – Зависимость напряжения на соленоиде от темпа вывода энергии (величины внешнего сопротивления)

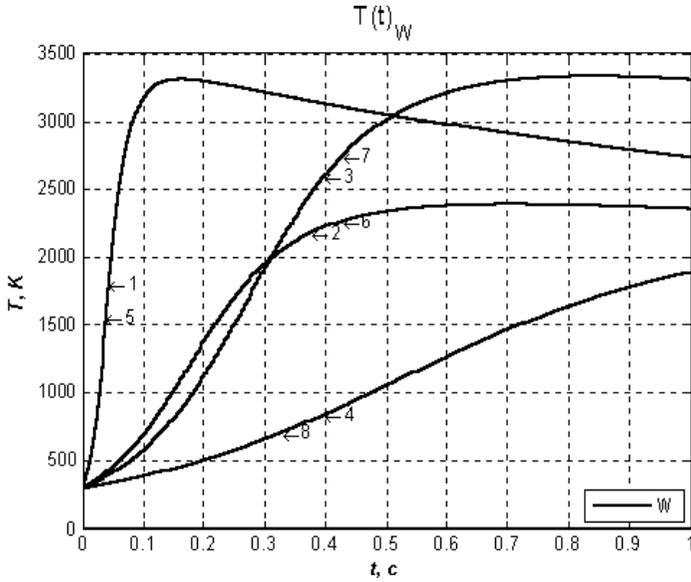


Рисунок 4 – Зависимость температуры внешнего сопротивления от времени для различных плотностей тока и параметров $R0w$

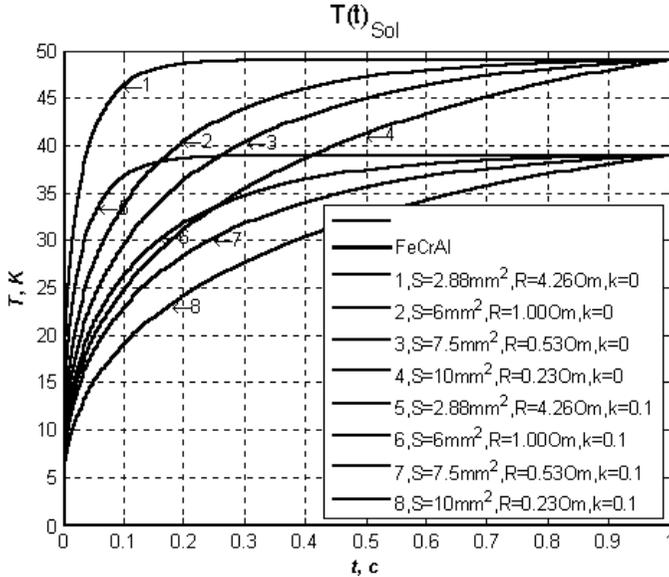


Рисунок 5 – Нагрев обмотки соленоида во времени для различных величин плотности тока и величин внешних постоянных сопротивлений

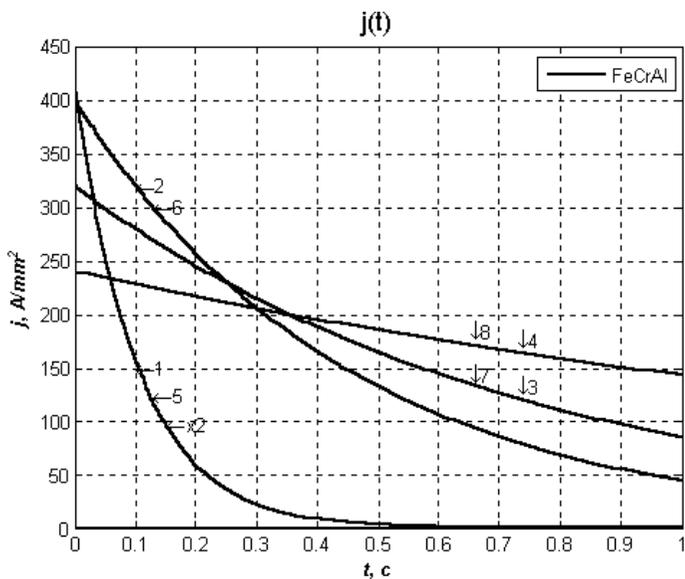


Рисунок 6 – Зависимость плотности тока в соленоиде от времени; величина плотности тока для кривых 1 и 5 должна быть удвоена(x2)

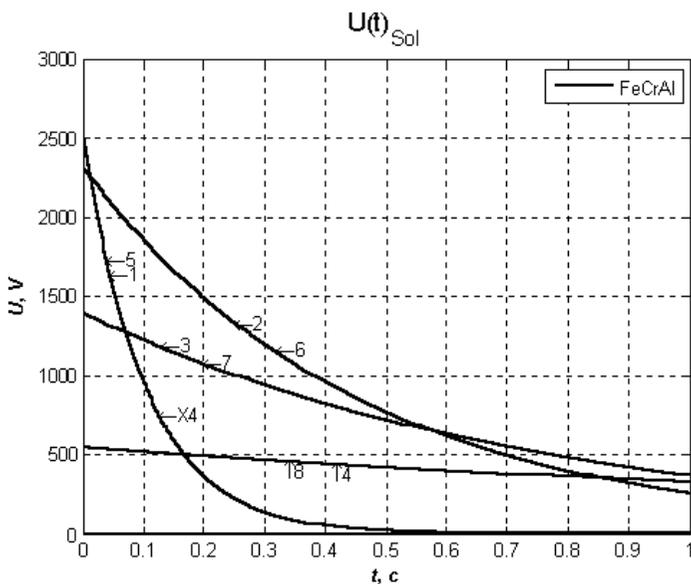


Рисунок 7 – Зависимость напряжения на соленоиде от темпа выведения энергии (величины внешнего сопротивления) напряжение для кривых 1 и 5 умножаются, x4.

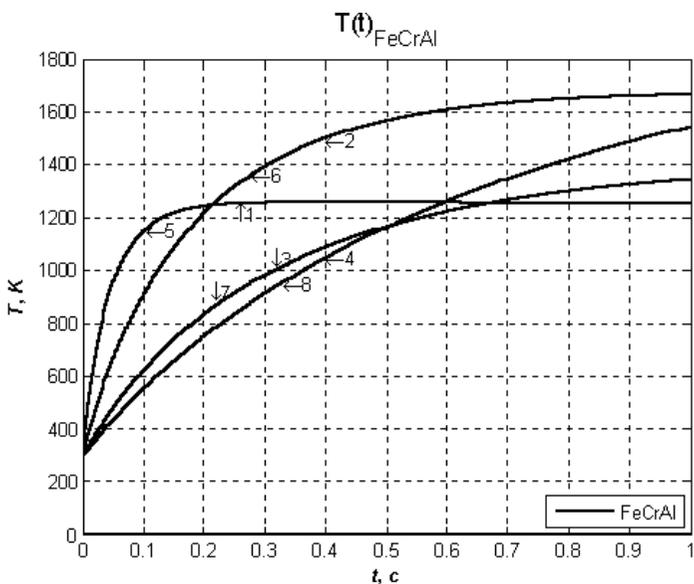


Рисунок 8 – Зависимость температуры внешнего сопротивления от времени для различных плотностей тока и параметров R_{FeCrAl}

Выводы. Рассмотрен процесс перехода сверхпроводникового соленоида (с высокой плотностью тока, замоналиченного, с косвенным охлаждением) в нормальное состояние. Для разных плотностей транспортного тока определено время нагрева обмотки до установленного термopрочного предела, 50K. Определены величины электрических напряжений на соленоиде при разных темпах выведения энергии.

Результаты свидетельствуют о работоспособности СП- соленоидов при достаточно высоких плотностях тока в обмотке, то есть тепловые и электроизоляционные характеристики не являются критическими и могут быть получены при выборе необходимых параметров. В свою очередь, использование «сухих» соленоидов, вместо погружных, способствует повышению надежности системы.

При переходе СП магнитной системы в нормальное состояние и выводе из нее энергии необходимо рассмотреть также способ уменьшения температурных градиентов в обмотке при наведении токов Фуко, то есть при быстром изменении величины поля в обмотке, dH/dt .

Использование сопротивления с переменной величиной, на которое выводится запасенная энергия соленоида, позволяет увеличить плотность транспортного тока в соленоиде, а также существенно снижает напряжение и уменьшает величину dH/dt , то есть 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.

Вместе с тем, необходимо провести анализ пондеромоторных и термомеханических сил и способы их уменьшения. Влияние последней компоненты может быть уменьшено при использовании компаундов «холодного» отверждения при замоноличивании обмотки, а в многовитковой обмотке следует учесть эффект бандажировки максимально нагруженных витков – внешними, менее нагруженными.

Список литературы: 1. Сверхпроводящие машины и устройства. – М., Мир, 1977. 2. *В.С.Высоцкий* Проблемы создания сверхпроводящих устройств переменного тока // Труды ФИАН. – Том 205. – М.: Наука, 1991. 3. *В.Б.Юферов, О.С.Друй, Е.И.Скибенко, Ю.В.Холод, О.В.Черный, В.О.Ильичева, Е.В.Муфель, А.Н.Рыбалко* Сверхпроводящие магнитные системы сложной формы и высокой плотностью транспортного тока // *Электротехніка і Електромеханіка*, ISBN 966–593–254–3. – № 2. – 2003. – С. 81-89. 4. *В.Б.Юферов, В.О.Ильичева, О.С.Друй, Е.В.Муфель, С.В.Шарый* О некоторых особенностях сверхпроводящей системы плазменного сепаратора изотопов // Вестник национального технического университета «ХПИ». – № 24. – 2007. 5. *Круглов А.Б.* Теплофизические свойства стеклоэпоксидов и эпоксидных смол при криогенных температурах // Автореферат, МИФИ. – М., 2007. 6. Таблицы физических величин. – М., Атомиздат, 1976. 7. *Дж.Кэй, Т.Лэби* Таблицы физических и химических постоянных. – М., 1962. 8. Справочная информация ООО «Нихром». – Киев, Украина, 2007.

Поступила в редколлегию 15.01.2009.