

## Коммерческие ВТСП обмотки

Е. Ю. Клименко<sup>1,\*</sup>, К. Л. Ковалёв<sup>1,2</sup>

1 Московский авиационный институт, (Национальный исследовательский университет), Волоколамское шоссе, 4, 125993, Москва, Россия

2 Объединенный институт высоких температур Российской Академии Наук, ул. Ижорская, 13-2, 125412, Москва, Россия

\* email: klimenko\_e@mail.ru

Поступила в редакцию 28.10.2024, после переработки 01.11.2024, принята к публикации 02.11.2024.

Коммерческие сверхпроводящие обмотки должны удовлетворять традиционным техническим требованиям, к электротехническому оборудованию. Среди многих тысяч сверхпроводящих обмоток, изготовленных за последние шесть десятилетий далеко не во всех был достигнут расчетный ток, не все надежно защищены, а об управляемости обмоток практически никогда не вспоминают. На примере умозрительной конструкции ВТСП обмотки проиллюстрированы подходы к реализации этих важных требований к коммерческим ВТСП обмоткам.

Ключевые слова: материальное уравнение сверхпроводника; ВТСП лента; провод из пары лент без изоляции между ними; обтекание участков с повышенным сопротивлением; стабильность ВТСП провода.

DOI: 10.62539/2949-5644-2024-0-3-77-87

### 1. Введение

Сверхпроводящее сообщество имеет все основания гордиться успехами прикладной сверхпроводимости в индустриальной и камерной физике, а также в медицине. Оно скромно умалчивает о накопившемся за столетие долге компенсировать немалые капиталовложения и преумножить доходы, развивая коммерческие применения этого технического направления.

Отличие научных применений от коммерческих заключается в том, что результат первых ценен сам по себе и не имеет денежного эквивалента, вторые же возможны лишь в том случае, если финансовый результат превосходит затраты. Поэтому если при разработке сверхпроводящих обмоток в первом случае приемлем полет фантазии, наиболее вызывающим образом продемонстрированный в проекте ИТЭР [1], то второй возможен лишь при достаточном развитии научно-технических основ для проектирования и технологий, пригодных для организации массового производства обмоточных проводов и самих обмоток. Соответствующего уровня низкотемпературная сверхпроводимость достигла в нашей стране лет тридцать назад, но вмешалась история, и длительное время стране было не до коммерческих применений. В настоящее время назревшее решение [2], препятствует утвердившееся в молодом поколении мнение, что только высокотемпературная сверхпроводимость может обеспечить коммерческий успех. Это следствие конъюнктурных обещаний уважаемых персон в конце прошлого века, стремившихся создать благоприятные (психологические и финансовые) условия новому направлению. Анализ их тенденциозных и попросту ошибочных аргументов можно найти в [3]. Современные взаимодействия между высокотемпературной и низкотемпературной ветвями единой технической науки, какой должна была бы быть прикладная сверхпроводимость, отражены в замечательном логотипе нашего журнала. Стилизованная буква «S» образована двумя стрелками, направленными во взаимные тупики.

Рассмотрим проблемы коммерциализации на примере материала, на котором сейчас сосредоточено внимание сообщества. Современная ВТСП-лента имела пол века назад весьма близкий прототип с незавидной судьбой. Это ниобий-оловянная лента [4], получавшаяся,

например, при термообработке пятислойной ленты, состоящей из тонкой ниобиевой подложки с микронным медным покрытием и поверхностных слоев олова. Очевидные недостатки: высокая цена, хрупкость сверхпроводящего слоя, ограниченность возможных вариантов обмоток (плоские галеты). Из ленты были изготовлены один – два десятка обмоток, среди которых лабораторный соленоид с полем 15 Тл. После появления многоволоконных проволок с бронзовой матрицей [5] сообщество потеряло интерес к этому проводу. Из этого исторического примера можно извлечь рекомендацию искать для каждого нового сверхпроводника свои оптимальные конструкции и технологии. ВТСП-лента второго поколения унаследовала достоинства и недостатки описанного прототипа.

Ниже приведен анализ необходимых исследований для того, чтобы реализовать обещания о коммерческом использовании новых материалов. Вопрос о выборе рабочей температуры обсуждаться не будет. Можно надеяться на то, что новообращенные специалисты осознают, наконец, природу исходного обмана. Применение жидкого гелия было скомпрометировано тем, что затраты на компенсацию теплопритока 1 Вт при 4.2 К в 50 раз больше, чем при температуре 78 К. Однако, технически осмыслено совсем другое соотношение, а именно расход энергии на поддержание рабочей температуры обмотки при гелиевой и азотной температурах. Это отношение не более двух, так как радиационный теплоприток на уровень 4.2 К всегда снижен в 200 раз благодаря азотному экрану. Может быть, осознание этой истины несколько умерит энтузиазм поиска средств повышения рабочей температуры сверхпроводящих устройств, тем более, что критические свойства сверхпроводников существенно выше при низких температурах.

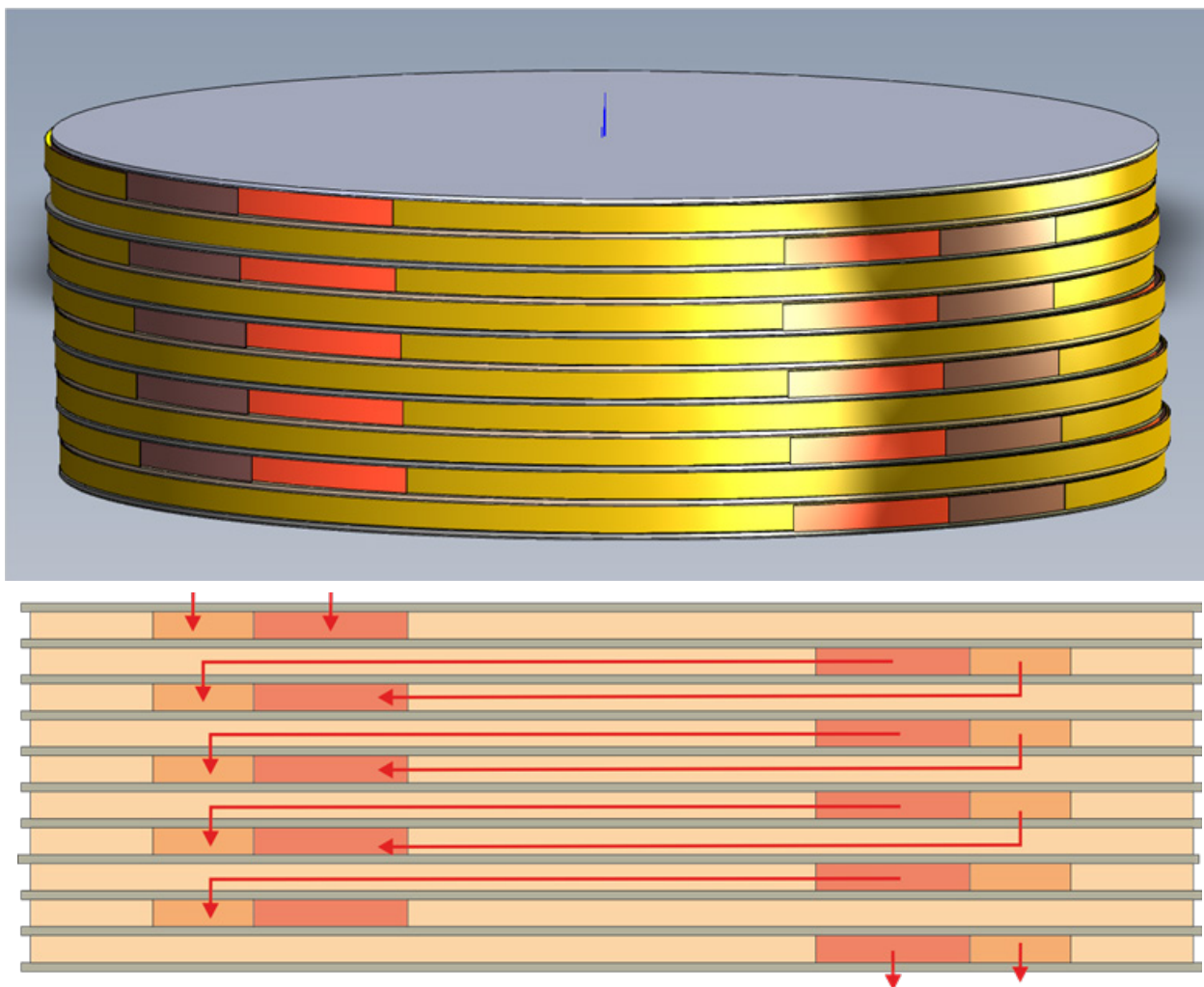
## 2. Конструкция обмотки

Для того, чтобы сделать последующее обсуждение более наглядным рассмотрим одну из возможных конструкций ВТСП обмотки. Её схема приведена на рис. 1. Основные характеристики приведены в Таблице 1. Обмотка выполнена парой неизолированных лент с надежной межвитковой изоляцией этой пары. Этот способ часто применяется [6], как разумная альтернатива экстравагантному предложению наматывать всю ВТСП обмотку неизолированным проводом, чтобы избежать ее деградации из-за локальных слабых мест или импульсных тепловыделений при деформации обмотки магнитными силами. Идея этого предложения заключается в том, что при появлении небольшого локального сопротивления в одной из лент ток в этом месте уменьшится благодаря перетеканию в соседнюю ленту через малое сопротивление контакта. Аналогичную роль должна играть идеальная индуктивная связь между лентами.

Материал обмотки — ВТСП-лента шириной 12.5 мм, возможно, с двусторонним сверхпроводящим слоем [7]. Межвитковая изоляция – стеклолента-препрег толщиной 0.1–0.3 мм. Выбор широкой ленты обусловлен следующими соображениями. Во-первых, чем больше рабочий ток, тем проще конструкция и технология обмотки. Во-вторых, хотя предпочтение обычно отдается ленте шириной 4 мм, способ ее изготовления путем разрезания на три части широкой ленты вызывает настороженность: нередко наблюдается саблевидность узкой ленты, что делает ее непригодной для изготовления традиционной галетной обмотки. Не надо опасаться так называемых скачков потока в широкой ленте. При характерной для современной ленты размытости ВАХ не приходится ждать импульсных тепловыделений при скачкообразном распаде экранирующих токов. При не слишком большой скорости изменения тока в обмотке экранирующие токи успевают затухнуть, что было убедительно продемонстрировано еще в 1976 г. при исследовании крупного, по тем временам, ниобий-оловянного соленоида [8, 9]. Овальная форма обмотки выбрана, исходя из допущения, что наиболее востребованными коммерческими обмотками будут квадрупольные обмотки внешнего вращающегося индуктора. Максимальное поле на внутренних витках таких обмоток в местах наибольшей кривизны меньше, чем в случае прямоугольных обмоток.

В ней использован известный принцип [10] максимальной разгрузки сверхпроводяще-

го провода от действующих магнитных сил (ламинарные обмотки [3, 10]). Суммарную силу, стремящуюся превратить овал в круг, воспринимает каркас из тонких дисков и колец, форма которых обеспечивает высокие значения момента сопротивления. Он рассчитан так, чтобы его деформации не превышали значений, допустимых для провода. Галеты приклеены к элементам каркаса клеем ВК-36 [11]. Прочность клеевого слоя на сдвиг (100 МПа) и минимальная его толщина (100 мкм) гарантируют надежную передачу на пластину действующей на каждый виток силы.



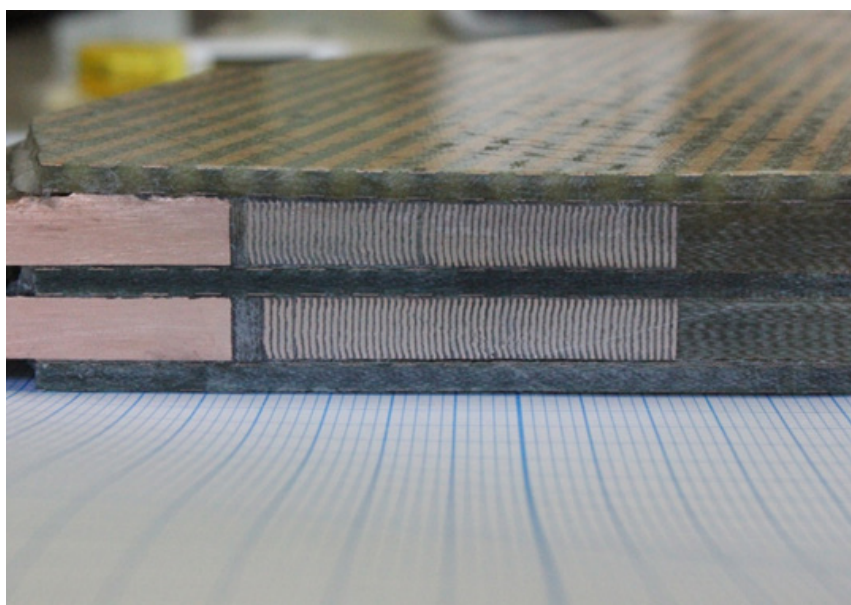
**Рис. 1** Внешний вид и схема овальной галетной обмотки. Красными линиями условно указаны внешние контакты при использовании пары лент в обмоточном проводе. Схема внутренних контактов аналогична.

**Таблица 1.** Параметры обсуждаемой обмотки.

| Параметр                                 | Размерность | Значение |
|------------------------------------------|-------------|----------|
| Внутренний малый радиус обмотки          | мм          | 100      |
| Внутренний большой радиус обмотки        | мм          | 200      |
| Высота обмотки                           | мм          | 147      |
| Количество галет                         | шт          | 10       |
| Количество витков в галете               | шт          | 19.5     |
| Рабочий ток                              | кА          | 5.0      |
| Максимальное поле на внутреннем витке    | Тл          | 8.847    |
| Минимальное поле на внутреннем витке     | Тл          | 7.415    |
| Поле на оси на расстоянии 1 см от фланца | Тл          | 6.307    |

Хотя лента в принципе позволяет изготовить двойную галету из одного отрезка, переходный между галетами внутренний виток не просто закрепить. Поэтому выбрана обмотка из одинарных галет с паяным контактом на внутреннем диаметре. На рис.1 соединения между галетами показаны условно красными линиями. При массовом производстве обмоток потребуется организовать промышленное производство соединительных элементов.

Выбор овальной формы позволяет не рассматривать наивные варианты пропитанных обмоток, использующих прочность подложки ленты или дополнительной стальной ленты, наматываемой совместно с проводом. Такие варианты традиционно предлагаются [6] для бандажирования цилиндрических обмоток. Хотя этот метод теоретически обеспечивает прочность обмотки, но ничтожный момент сопротивления такого бандаж не может предотвратить деформации реальной обмотки, в которой действуют конечные изгибающие моменты и, следовательно, не избавляет обмотку от деградации.



**Рис.2.** Опытная двойная ВТСП галета, приклеенная к стеклотекстолитовой пластине.

Ламинарная конструкция обладает рядом преимуществ перед традиционными вариантами обмоток и пригодна для массового производства. Она и ее технология предельно просты, а объем механической обработки минимален. Пластины из прочного алюминиевого сплава, образующие каркас обмотки, покрыты прочным изолирующим слоем окисла и не имеют электрического контакта друг с другом. Таким образом, даже при минимальной толщине изоляции электрический пробой обмотки на корпус исключен. Пластины являются идеальным хладагентом, все витки охлаждаются одинаково. На Рис.1 не изображены трубки с хладагентом, приклеенные к пластинам, поскольку обмотки могут представлять коммерческий интерес только в составе электротехнических устройств, например, индуктора электрогенератора. Способ подвода холода к пластинам будет определяться компоновкой всего агрегата.

Лaminaрные обмотки остаются едва ли не единственным вариантом устранения деградации крупных низкотемпературных обмоток без значительного снижения конструктивной плотности тока. Успешный опыт [12] испытаний обмотки, изготовленной из сплюсненного многоволоконного ниобий-оловянного провода сечением  $0.4 \times 4$  мм, позволяет надеяться на успех и с ВТСП лентой. Надежность применения этой конструкции для ВТСП обмоток, используемых при 4.2 К, пока не проверена, поскольку до сих пор изготовлена единственная крупная обмотка [13] предельно экзотической конструкции. Плавные деформации обмотки можно изучать расчетными методами, моделируя их стопкой мембран, закрепленных на краях. Скачкообразные деформации можно измерять на малых образцах обмоток с помощью низко-

температурных силовых устройств [14].

### 3. Электродинамика ВТСП проводов

Первым шагом на пути создания абсолютно надежных коммерческих сверхпроводящих обмоток должен быть физически и технически обоснованный метод их проектирования. Расчет рабочего тока обмотки не может опираться на такой суррогатный параметр, как «критический ток» провода, определяемый при произвольно назначенном уровне электрического поля. Этот наскоро придуманное много лет назад определение заменило привычное, интуитивно воспринимаемое представление о критическом токе, в качестве третьего фундаментального параметра, определяющего критическую поверхность, четко разграничивающую сверхпроводящее и нормальное состояние материала. Неоднозначность возникла в связи с обнаружением некоего «резистивного состояния» [13], отделяющего «истинно сверхпроводящее» состояние провода от теплового срыва вольт-амперной характеристики. В дальнейшем выяснилось, что никакого «истинно сверхпроводящего» состояния у технических сверхпроводников нет, а резистивное состояние просто является их сопротивлением, экспоненциально увеличивающимся с ростом температуры, индукции или плотности тока [14].

Ныне детально разработана тензорная электродинамика [15] изотропных сверхпроводников типа твердых растворов (сплавы НТ и НИЦ), обладающих экспоненциальной ом-амперной характеристикой. Она возникла в результате подробного исследования [16] материального уравнения ( $\rho(T, B, J)$  или  $\sigma(T, B, j)$ ) этих материалов в широком диапазоне температур и магнитных полей, перпендикулярных току.

Проводимость сверхпроводника описана тензором  $J_a = \sigma_{a\beta} E^\beta$ . Описание отражает известный факт зависимости сопротивления сверхпроводника от угла между током и индукцией. В главных направлениях повода тензор проводимости выглядит так

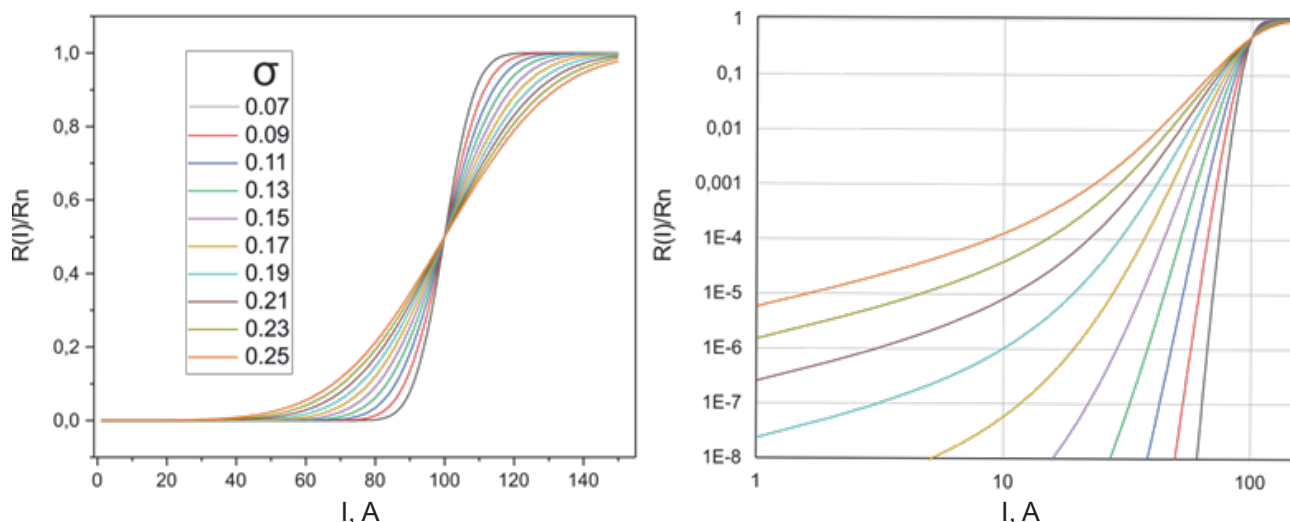
$$\begin{vmatrix} \sigma_t & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_t & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_l \end{vmatrix}, \text{ где } \sigma_t(T, B, J) = \sigma_n \left\{ 1 + \exp \left[ \frac{1 - \frac{T}{T_c} - \frac{B}{B_{c2}} - \frac{J}{J_{c2}}}{\delta} \right] \right\} \text{ для тока,}$$

перпендикулярного индукции, и  $\sigma_l(T, B, J) = \sigma_n \{ 1 + \exp[(1 - T/T_c - B/B_{c2})/\delta] \}$  для тока направленного вдоль индукции. В последнем выражении токовый член в показателе экспоненты отсутствует, поскольку сила Лоренца равна нулю и  $J_{c2} \rightarrow \infty$ . Здесь  $\sigma_t$  и  $\sigma_l$  — компоненты тензора проводимости,  $T, B, J$  — параметры состояния,  $T_c, B_{c2}, J_{c2}$  — критические значения, соответствующие половине нормального сопротивления,  $\delta$  — параметр, определяющий крутизну сверхпроводящего перехода. Заметим, что при  $\delta \rightarrow 0$  предложенное описание соответствует общепризнанной модели критического состояния.

Критической поверхностью при этом подходе названа плоскость, соответствующая половине нормального сопротивления материала в соответствии с общепринятыми определениями критической температуры и критического поля в материалах с размытым сверхпроводящим переходом. Естественно, что критической плотностью тока  $J_{c2}$  названа плотность тока, при которой сопротивление равно половине нормального. Эта величина обычно не достигается в эксперименте из-за разогрева образца током, но легко рассчитывается по регистрируемой экспоненциальной характеристике. Чтобы можно было применять разработанный подход к сверхпроводящим проводам, необходимо учесть реальную анизотропию пиннинга в них.

Электродинамику ВТСП ленты можно построить по этому образцу. К сожалению, до сих пор никто не озаботился исследованием материального уравнения ВТСП ленты, поэтому приведенное ниже рассмотрение чисто умозрительно. Отличия от образца заключаются в необходимости учесть сильную анизотропию критического тока в ленте и отличную форму ом-ам-

перной характеристики. Исходным моментом служит то, что сверхпроводящий переход на большом протяжении описывается степенной закономерностью (рис. 3), как у многоволоконных ниобий-титановых и ниобий-оловянных проводов, так и ВТСП ленты. При кардинальном различии в материалах оба этих объекта продольно неоднородны, что, скорее всего, означает, что причина такой формы ВАХ не физическая, а статистическая. В двойном логарифмическом масштабе эта зависимость линейна на большой протяженности.



**Рис. 3.** Ом-амперные характеристики продольно неоднородного провода со средним критическим током 100 А при различных значениях дисперсии.

Для включения в модель известной зависимости сопротивления ленты от угла между током и магнитным полем его приходится описывать тензором:  $E_\alpha = r_{\alpha\beta} J^\beta$ . В главных осях ленты тензор имеет вид:

$$r_{\alpha\beta} = \begin{vmatrix} \rho_{t1} & 0 & 0 \\ 0 & \rho_{t2} & 0 \\ 0 & 0 & \rho_l \end{vmatrix} \quad (1)$$

Различие между  $\rho_{t1}$  и  $\rho_{t2}$  моделирует анизотропию «критического тока» в ленте в магнитных полях, перпендикулярных току и направленных поперек поверхности ленты и вдоль неё.  $\rho_l \ll \rho_{t2} < \rho_{t1}$ .

Материальное уравнение, описывающее степенной характер ВАХ

$$\frac{E}{R_n J_{\frac{c}{2}}} = \frac{J}{J_{c/2}} \int_0^p \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{q}{\sigma}\right)^2\right] dq = \frac{J}{J_{c/2}} [1 + \exp(-1 + p)] \quad (2)$$

Критическую поверхность полагаем плоской из-за отсутствия в настоящее время оснований для выбора более сложной формы. Для различных компонентов вектора индукции параметр  $p$  в выражении (2) в главных направлениях ленты, принимает одно из трех значений:

$$\begin{aligned}
p1 &= \frac{T}{T_c} + \frac{B}{B_{c2}^{t1}} + \frac{J}{J_{c/2}^{t1}} \\
p2 &= \frac{T}{T_c} + \frac{B}{B_{c2}^{t2}} + \frac{J}{J_{c/2}^{t2}} \\
p3 &= \frac{T}{T_c} + \frac{B}{B_{c2}^{t2}}
\end{aligned} \tag{3}$$

$p1$  соответствует магнитному полю, перпендикулярному току и плоскости ленты,  $p2$  — магнитному полю в плоскости ленты,  $p3$  — случаю магнитного поля, параллельного току. В обмотке не возникает магнитных полей, параллельных току, поэтому тензор сопротивлений при произвольной ориентации  $\alpha$  поля в плоскости, нормальной к току, вычисляется умножением тензора (1) на тензор поворота вокруг оси  $z$ :

$$\begin{vmatrix} \cos(\alpha) & -\sin(\alpha) & 0 \\ \sin(\alpha) & \cos(\alpha) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \rho_{t1} & 0 & 0 \\ 0 & \rho_{t2} & 0 \\ 0 & 0 & \rho_l \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \rho_{t1}\cos(\alpha) & -\rho_{t2}\sin(\alpha) & 0 \\ \rho_{t1}\sin(\alpha) & \rho_{t2}\cos(\alpha) & 0 \\ 0 & 0 & \rho_l \end{vmatrix} \tag{4}$$

Из-за сильной зависимости сопротивления сверхпроводника от температуры уравнение (2) следует дополнить уравнениями генерации тепла и теплопроводности.

$$G = \mathbf{j} \cdot \mathbf{E} \quad \text{и} \quad C(T) \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla_{\alpha} \left( \kappa_{\alpha\beta}(T) \nabla_{\beta} T \right) + G(T) \tag{5}$$

Эти уравнения в сочетании с уравнениями Максвелла позволяют рассчитать процессы диффузии магнитного поля в ленту. Стационарное (т.е. соответствующее выбранному значению однородного в сечении провода электрического поля) распределение тока в витке можно найти с помощью более простого алгоритма. Магнитное поле в любой точке сечения ленты является суммой полей витков обмотки и собственного поля тока витка. Самосогласованное распределение поля и плотности тока в конкретном сечении витка находится итерациями для нескольких десятков ячеек, разбивающих виток с учетом локальных величины и направления магнитного поля для каждого из элементов (численный расчет магнитного поля от произвольно распределенного тока в витке в наше время тривиален). Адекватность предложенной модели должна быть проверена экспериментом. Вне зависимости от того, будет ли она подтверждена или опровергнута, она дает возможность спланировать такой эксперимент, предварительно определив входящие в модель параметры (материальные уравнения, критические параметры, нормальное сопротивление ленты, ее теплоемкость от 4.2 К до  $B_{c2}$ , тензор теплопроводности и пр.)

#### 4. Стабильность ВТСП обмотки

Проблема стабильности сверхпроводящих обмоток была первой в истории прикладной сверхпроводимости, подвергнутой аналитическому исследованию. Актуальность проблемы была связана с обнаружением обескураживающей деградации свойств провода в обмотках. Детальный анализ явления [17] на основе модели критического состояния не дал удовлетворительного результата. Только учет реальной размытости переходной характеристики провода [9] продемонстрировал, что у каждого сверхпроводящего провода есть область надежной стабильности, в которой он может работать в отсутствие возмущающих факторов. Две особенности ВТСП проводов, казалось бы, должны обеспечить их стабильность: значительная размытость переходной характеристики и температурный запас между рабочей и критической

температурами. Ниже показано, что только первый из этих факторов существенен для стабильности. Высокая теплоемкость при повышенных температурах, которая, как ожидалось, должна обеспечить отсутствие чувствительности к импульсным тепловым возмущениям, ограничивает скорость распространения нормальной зоны в обмотке и затрудняет регистрацию преждевременных локальных переходов, связанных с дефектами сверхпроводящего слоя или с механотермическими возмущениями.

На рис. 4 приведены стационарные неизотермические (учитывающие разогрев провода протекающим током) вольт-амперные характеристики в безразмерных параметрах:

$\epsilon = \frac{E}{R_n I_{c/2} (B, T)}$  и  $i = I/I_{c/2}$ . Параметр Стекли для ВТСП  $\alpha = R_n I_{c/2}^2 / (k T_c^*)$ , здесь  $T_c^*$  — разность температур: критической и охлаждаемой пластины. У обмоток с высокой конструктивной плотностью тока этот параметр может быть весьма большим. Рисунки 4–6 построены для  $\alpha=10$ .

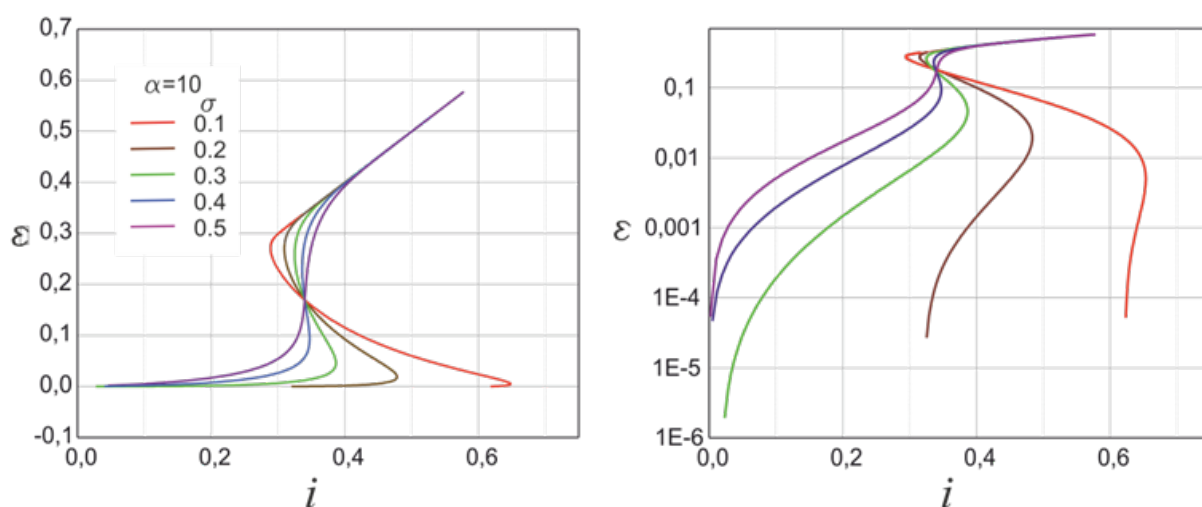


Рис. 4. Стационарные неизотермические ВАХ (в линейном и логарифмическом масштабах).

S-образные характеристики при любой дисперсии имеют начальный устойчивый ( $d\epsilon/di > 0$ ) участок. Максимальный ток провода соответствует условию  $d\epsilon/di \rightarrow \infty$ . Участок стационарной характеристики с отрицательным наклоном неустойчив. Если электрическое поле меньше стационарного значения, провод возвращается в устойчивое состояние, в противном случае электрическое поле нарастает до значения, соответствующего протеканию тока по нормальному сопротивлению. Вследствие большой теплоемкости провода при повышенных температурах этот процесс происходит медленно, но всегда заканчивается тепловым повреждением участка провода. Повышение электрического поля над стационарным значением может быть вызвано тепловым возмущением выше, соответствующей стационарной характеристике температуры, которая, как легко показать, равна  $\epsilon i T_c^*$ . На рис. 5 показано стационарное распределение температур провода в точках ВАХ. Видно, что вызывающий развитие неустойчивости перегрев составляет единицы К, т. е. ВТСП обмотка, работающая при 4.2 К, может деградировать так же, как низкотемпературная. Для более точной оценки критических возмущений необходимо иметь сведения о теплоемкости провода в интервале 4–10 К.

Зависимость тока от напряжения однозначна (рис. 5). Поэтому неизотермическую ВАХ образца провода можно зарегистрировать непосредственно, если запитывать его не от источника тока, а от источника напряжения. Это не удалось сделать в семидесятых прошлого века [9] из-за высокой скорости развития перехода в ниобий-титановой проволоке. При современном экспериментальном оснащении и заторможенности процессов в ВТСП ленте такое измерение кажется тривиальным.

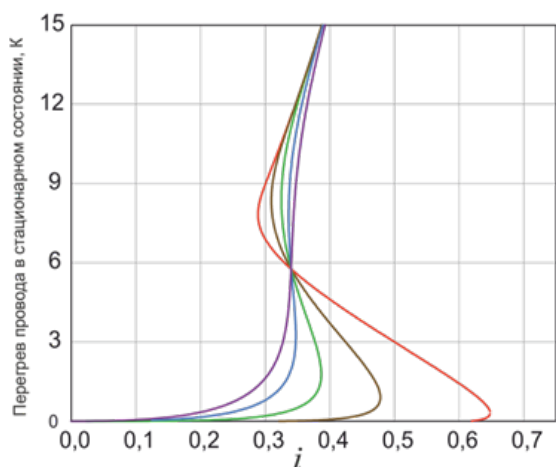


Рис. 5. Разогрев провода в стационарном состоянии

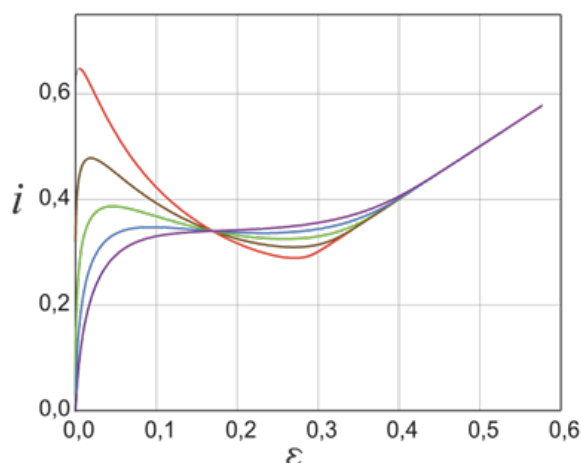


Рис. 6. Однозначная зависимость тока от электрического поля.

Заметим, что интуитивное стремление увеличить критический ток за счет достижения нулевой дисперсии в конце концов ведет к утрате работоспособности провода.

## 5. Системы питания, диагностики и защиты

Наличие устойчивого участка неизотермической ВАХ позволяет надежно управлять сверхпроводящей обмоткой [19]. Чем меньше неоднородность провода, тем ближе к  $I_{c/2}$  устойчивый рабочий ток, но он не достигает единицы из-за учитываемого в выражениях (3) влияния температуры и поля. Но, чем меньше дисперсия, тем при меньшем электрическом поле произойдет неуправляемый срыв. Конструктору сверхпроводящей обмотки всегда придется искать компромисс между свойствами обмоточного провода, конструктивной плотностью тока в обмотке, уровнем надежной чувствительности схемы диагностики. Малая скорость распространения нормальной зоны может осложнить управляемость из-за скрытого дефекта обмоточного провода, повреждения ленты при изготовлении обмотки или импульсного тепловыделения при деформации обмотки магнитными силами. Потребуется тщательная отработка технологии ламинарных ВТСП – обмоток, чтобы исключить последнюю из этих причин. Надежно управляемая не стабилизированная стационарно обмотка описана в [8, 9]

## 6. Заключение

Современный уровень технологии ВТСП обмоток не позволяет перейти к их коммерческому использованию. Потребуется большая и кропотливая работа по отработке технологии обмотки, построению электродинамики ВТСП проводов, исследованию их свойств, что необходимо для расчета неизотермической ВАХ и определения скорости распространения нормальной зоны в зависимости от температуры, магнитного поля и тока. Возможно, эта статья поможет спланировать необходимые исследования.

## Литература

- [1] L. Muzzi, G. De Marzi, A. Di. Zenobio and A della Corte, Supercond. Sci. and Techn. **28**, 053001 (2015). DOI 10.1088/0953-2048/28/5/053001
- [2] Е.Ю.Клименко, Сверхпроводимость: фундаментальные и прикладные исследования **1**, 6 (2023). DOI: 10.62539/2949-5644-2023-0-1-6-21
- [3] Е.Ю.Клименко, УФН **191**, 861 (2021). DOI:10.3367/UFNr.2021.01.038918
- [4] H. J. Levinstein, E. Buehler, Trans. Metall. Soc. AIME **230**, 1314 (1964).
- [5] A. R. Kaufman and J. J. Pickett, Bull. Am. Phys. Soc. **15**, 833 (1970).
- [6] A. Badel , K. Takahashi , A. Zampa, IEEE Trans. Appl. Supercond. **34**, 4301205 (2024). DOI: 10.1109/TASC.2024.3367620

- [7] С. Самойленков, А.Кауль, Способ получения двухстороннего сверхпроводника второго поколения, Пат. RU 2386732 С1 (2010).
- [8] N. A. Chernoplekov, in Proc. of Conf. on Magnet Technology MT-6 **1**, 3 (1977).
- [9] Е.Ю. Клименко, Н.Н. Мартовецкий, С.И. Новиков, Доклады АН СССР **261**, 1350 (1981).
- [10] E.Yu.Klimenko, IEEE Trans. Appl. Supercond. **261**, 1350 (2018).
- [11] Справочник «Авиационные материалы» **10**, М.: ВИАМ (2019).
- [12] E.Klimenko, S. Novikov, V. Omelyanenko et al., Cryogenics **32S**, 328 (1992). DOI: 10.1016/0011-2275(92)90174-9
- [13] D. G. Whyte, B. LaBombard, J. Doody et al. IEEE Trans. on Appl. Supercond. **34**, 1 (2023). DOI: 10.1109/TASC.2023.3332823
- [14] E. Yu. Klimenko, S. I. Novikov, IEEE Trans. Appl. Supercond. **12**, 155 (2002).
- [15] Y. B. Kim, C. F. Hempstead, A. R. Strnad Phys. Rev. Lett. **9**, 306 (1962).
- [16] Е.Ю.Клименко, А.Б. Именитов, С.В. Шавкин, П.В Волков, ЖЭТФ **127**, 56 (2005). DOI:10.1134/1.1866198
- [17] E.Yu. Klimenko, V.R. Chechetkin, et al., Cryogenics **50**, 359 (2010). DOI:10.1016/j.cryogenics.2010.03.001
- [18] Г.Л. Дорофеев, А.Б. Именитов, Е.Ю. Клименко, Препринт ИАЭ 2987. М.: 1978.
- [19] Р.Г. Минц, А.Л. Рахманов, Неустойчивости в сверхпроводниках. М.: Наука, 1984.
- [20] Е.Ю.Клименко, Письма в ЖТФ **48**, 17 (2022). DOI:10.21883/PJTF.2022.13.52738.19151

## Commercial HTS Windings

**E. Yu. Klimenko<sup>1\*</sup>, K. L. Kovalev<sup>1,2</sup>**

1 Moscow Aviation Institute. Volokolamsk highway, 4, 125993, Moscow, Russia

2 Joint Institute for High Temperature of the Russian Academy of Sciences, ul. Izhor'skaya, 13-2, 125412, Moscow, Russia

\* e-mail: klimenko\_e@mail.ru

Commercial superconducting windings must meet traditional technical requirements for electrical equipment. Among the many thousands of superconducting windings manufactured over the past six decades, not all have achieved the rated current, not all are reliably protected, and the controllability of the windings is almost never remembered. Using the example of the speculative design of the HTS winding, approaches to the implementation of these important requirements for commercial HTS windings are illustrated.

Keywords: material equation of a superconductor; HTSP tape, Wire from a pair of tapes without insulation between them, flow around sections with increased resistance, stability of HTSP wire.



Евгений Юрьевич Клименко — проф. д. ф.-м. н., пенсионер.

Prof. Evgeny Yu. Klimenko — Dr. of Sci. retiree.



Константин Львович Ковалёв — д. т. н., заведующий лаборатории Объединенного института высоких температур Российской академии наук, заведующий кафедры НИУ МАИ.

Dr. Konstantin L. Kovalev — Head of laboratory, Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences, Head of the Department of Moscow Aviation Institute (National Research University).