

12 Фундаментальные характеристики проводов для контролируемых сверхпроводящих обмоток

© Е.Ю. Клименко

Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет), Москва, Россия
E-mail: klimenko_e@mail.ru

Поступило в Редакцию 7 февраля 2022 г.
В окончательной редакции 24 апреля 2022 г.
Принято к публикации 9 мая 2022 г.

Работоспособность (стабильность) сверхпроводящих проводов обеспечивается размытостью их переходных характеристик. Это же важное свойство можно использовать для создания надежно управляемых сверхпроводящих недеградирующих обмоток. Переходу в нормальное состояние таких обмоток предшествует возникновение электрического напряжения на участке, находящемся в максимальном магнитном поле. Величина устойчивого напряжения тем больше, чем более размыта переходная характеристика провода.

Ключевые слова: ламинарные обмотки, управляемость, неизотермическая вольт-амперная характеристика, обратная связь.

DOI: 10.21883/PJTF.2022.13.52738.19151

Досадная особенность современных крупных сверхпроводящих магнитов (не стабилизированных по Стекли [1]) заключается в том, что их переход в нормальное состояние при увеличении тока происходит без каких-либо предшествующих признаков и единственным управляющим действием в этом случае оказывается срочный вывод запасенной энергии по сигналу, полученному от схемы обнаружения появившейся и распространяющейся нормальной зоны. Такой непредсказуемый переход объясняют случайными тепловыми возмущениями, которые принято считать неустраняемыми [1]. Непредсказуемость придает современному проектированию сверхпроводящих обмоток „авантюрный привкус“ (например, при защите обмотки тороидального поля Международного термоядерного экспериментального реактора (ИТЭР) планируется срочно выводить на внешнее сопротивление энергию, эквивалентную 10t тротила). Устранение этого „привкуса“ является важнейшей принципиальной и прагматической задачей. Этой цели можно достичь лишь в обмотках, в которых устранены упомянутые случайные возмущения, например в ламинарных обмотках. Принципы конструирования таких обмоток, как и причины значительных затруднений в создании традиционных сверхпроводящих магнитов, описаны в обзоре [2]. В этом же обзоре приведены ссылки на первоисточники основных исходных утверждений, используемых в настоящей работе. В ламинарных обмотках провод на всей длине фиксирован на жестком каркасе, рассчитанном на восприятие магнитной силы при деформации, приемлемой для провода (достаточно жесткий каркас позволяет исключить деформацию чувствительных к ней проводов). Цель работы заключается в демонстрации возможности обеспечения надежной управляемости сверхпроводящих обмоток с высокой конструктивной плотностью тока за

счет применения проводов с калиброванной размытостью переходной характеристики.

Фундаментальной характеристикой провода, допускающей надежное проектирование систем управления обмотками, изготовленными из него, является его материальное уравнение, т. е. зависимость его проводимости от температуры, магнитного поля и тока. Благодаря размытости сверхпроводящего перехода неизотермическая вольт-амперная характеристика (ВАХ) сверхпроводника имеет устойчивый участок с положительной производной напряжения по току. Напряжение на этом участке можно использовать для организации необходимой для управления отрицательной обратной связи (в системе управления током ниобий-оловянного соленоида [3,4] для регистрации устойчивой ВАХ использована обычная мостовая схема [1] обнаружения нормальной зоны). До сих пор эта фундаментальная характеристика детально изучена только для ниобий-титановой и ниобий-циркониевой проволоки (НТ-50 и НЦ-50). Для построения неизотермической ВАХ и расчета максимальных значений тока и электрического поля, при превышении которых происходит неуправляемый срыв в нормальное состояние проводов с медной или иной матрицей, используется поперечная компонента тензора проводимости, т. е. переходная характеристика провода в магнитном поле, перпендикулярном оси провода:

$$\sigma(T, B, I) = \sigma_n^* \left\{ 1 + \exp \left[\left(1 - \frac{T}{T_c^*} - \frac{B}{B_{c2}^*} - \frac{I}{I_{c/2}^*} \right) \frac{1}{\delta^*} \right] \right\}.$$

Здесь $\sigma_n^* = k_n \sigma_n + (1 - k_n) \sigma_m$ — проводимость провода в нормальном состоянии, k_n — доля сечения провода, занятая сверхпроводником, σ_m — проводимость матрицы, σ_n — проводимость сверхпроводника в нормальном состоянии, стандартным критерием определения величин T_c^* , B_{c2}^* , $I_{c/2}^*$ является достижение

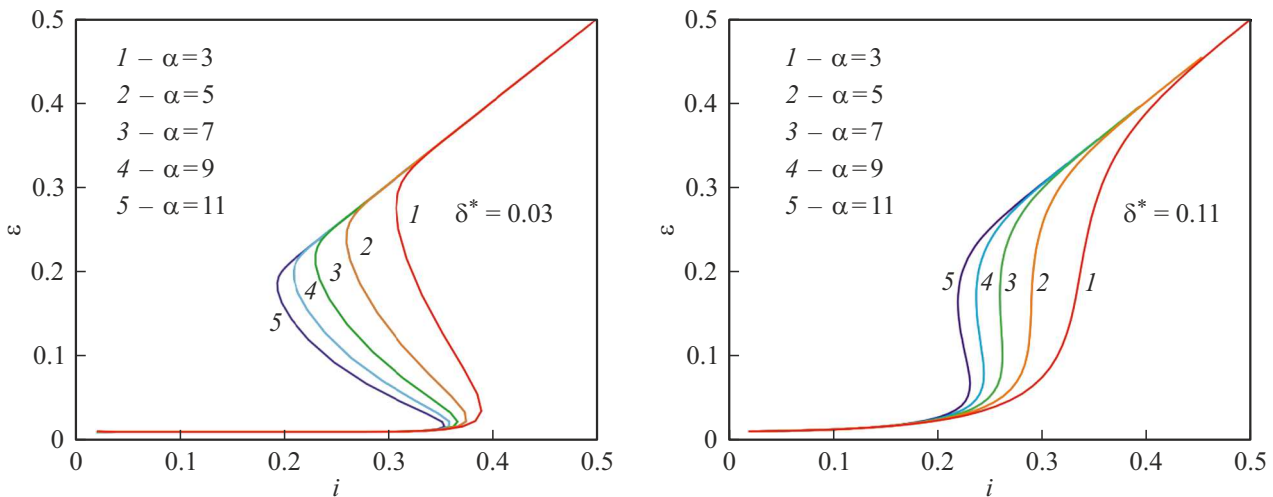


Рис. 1. Примеры безразмерных неизоотермических вольт-амперных характеристик провода для нескольких значений параметров α и δ^* при $b = 0.5$.

сопротивлением провода половины его нормального значения ($1/\sigma_n^*$) при изменении одного из параметров состояния (температуры T , поля B или тока I) при нулевых значениях двух других параметров. Эти критические значения несколько меньше критических параметров собственно сверхпроводника из-за наличия матрицы с малым нормальным сопротивлением $A_c^* = A_c [1 - \delta \ln(k \frac{\sigma_m}{\sigma_n} + 1)]$, $k = (1 - k_n)/k_n$. Параметр, описывающий крутизну сверхпроводящего перехода,

$$\delta^* = \frac{\delta}{[1 - \delta \ln(k \frac{\sigma_m}{\sigma_n} + 1)]} > \delta,$$

напротив, несколько больше соответствующего параметра собственно сверхпроводника. Безразмерная неизоотермическая ВАХ провода в параметрической форме

$$\epsilon = iy, \quad i = \frac{-1 + \sqrt{1 + 4\alpha y(1 - p - b)}}{2\alpha y},$$

$$y = [1 + \exp(p)]^{-1}, \quad -1 < p < 1$$

является решением трансцендентного уравнения стационарного баланса при разогреве провода собственным током

$$-\delta^* \ln(\epsilon/i) = 1 - \alpha \epsilon i - i - b,$$

где

$$\epsilon = \frac{R(T, B, I)I}{R_n I_{c/2}^*}, \quad i = \frac{I}{I_{c/2}^*}, \quad \alpha = \frac{R_n I_{c/2}^{*2}}{\lambda S T^*}, \quad b = \frac{B}{B_{c2}^*},$$

$\lambda S T^*$ — поток тепла от провода к подложке через слой электрической изоляции, $T^* = T_c(B) - T_s$ — превышение температурой образца температуры охлаждающей подложки T_s , S — площадь контакта провода с подложкой, $R(T, B, I)$ — материальное уравнение. Величина α является аналогом параметра Стекли [1] и отличается

от него тем, что вместо отвода тепла к кипящему гелию учитывается поток тепла через электрическую изоляцию к охлаждаемому каркасу, на котором зафиксирован сверхпроводящий провод. Варианты неизоотермических ВАХ для нескольких значений α и δ^* приведены на рис. 1. Все они имеют устойчивый начальный участок, который заканчивается, когда $di/d\epsilon = 0$. Этому моменту соответствует электрическое поле срыва ϵ_q . С точки зрения стабильности оно определяет максимальную скорость выравнивания распределения тока по сечению провода, а его роль для управляемости заключается в том, что оно определяет максимум регистрируемого напряжения на участке обмотки, на котором достигнут предельный устойчивый ток.

На рис. 2 изображены карты величин i_q и ϵ_q для практически интересных диапазонов параметров α и δ^* . Чтобы получить значения максимального тока в амперах, следует умножить безразмерный ток на критический ток $I_{c/2}^*(T_s)$. Электрическое поле равно произведению $\epsilon R_n I_{c/2}^*$.

Рис. 2 позволяет оценить устойчивые параметры для произвольного провода. Например, для провода прямоугольного сечения $2 \times 3.5 \text{ mm}$ с $S_{\text{Nb-Ti}}/S_{\text{Cu}} = 0.6$, $R_n = 5 \cdot 10^{-3} \Omega/\text{m}$, $I_{c/2}^*(4.2 \text{ K}, 0 \text{ T}) = 7000 \text{ A}$, $\delta^*(0) = 0.03$, $I_{c/2}^*(4.2 \text{ K}, 5.5 \text{ T}) = 3500 \text{ A}$, $\alpha = 8$ получаем $i_q = 0.68$, $\epsilon_q = 0.025$. Максимальный устойчивый ток $I_{\text{max}} = 2380 \text{ A}$. Электрическое поле срыва $E_q = 0.437 \text{ V/m}$. Легко регистрируемый сигнал 1 mV/cm появится при токе 2070 A .

Таблица демонстрирует влияние степени размытости переходной характеристики на достижимые значения рабочего тока и регистрируемого напряжения в двух проводах, различающихся только этим параметром. Можно видеть, что в проводе с более размытым переходом уровень сигнала обратной связи в 26 раз превышает аналогичную величину для конкурирующего провода при сохранении технически приемлемого уровня крити-

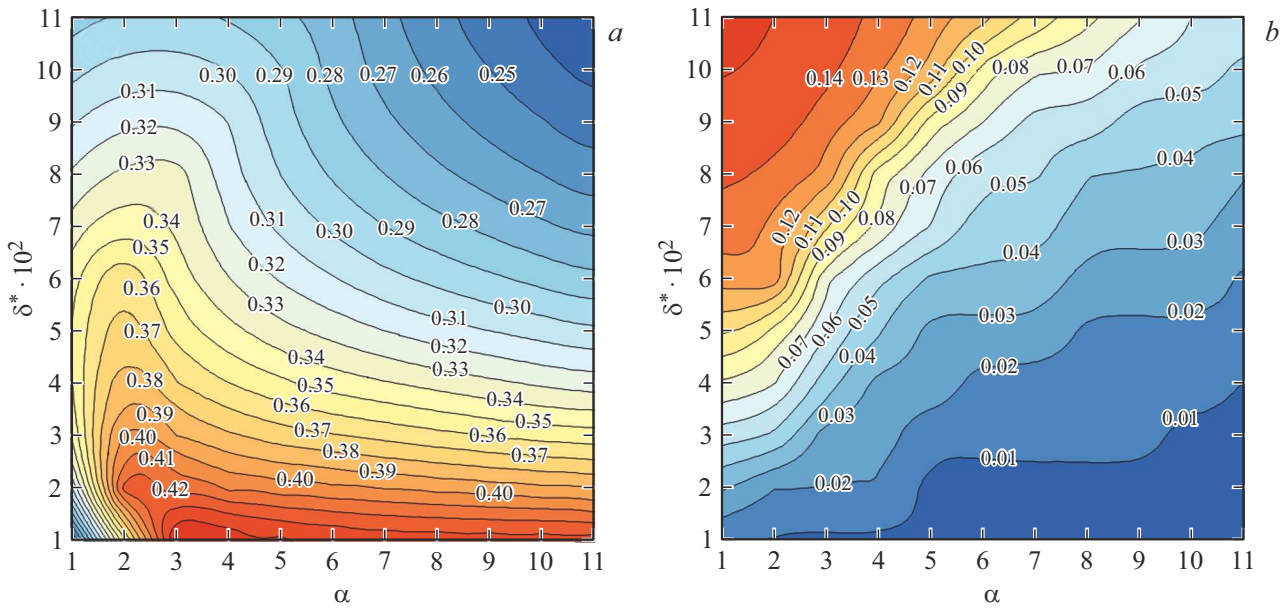


Рис. 2. Зависимость безразмерных величин максимальных значений устойчивого тока (а) и электрического поля (b) от параметров α и δ^* при $b = 0.5$.

Оценка максимального (I_{max}) и рабочего (I_{oper}) токов и соответствующих электрических полей (E_q и E_{oper}) в проводе сечением $2 \times 3.5 \text{ mm}$ ($R_n(4.2) = 5 \cdot 10^{-3} \Omega/\text{m}$) в магнитном поле 5.5 Т

$I_{c/2}^*$ (0 K, 0 T), А	$I_{c/2}^*$ (4.2 K, 0 T), А	α	δ^*	I_{max} , А	E_q , V/m	I_{oper} , А	E_{oper} , mV/m
13000	6890	8	0.06	2050	0.906	1637	122
13000	6890	8	0.01	2480	0.034	2411	4.7

ческого тока. Заметим также, что этот провод значительно стабильнее [4] конкурента, поскольку однородность распределения плотности тока в сечении устанавливается в 26 раз быстрее. Размытость переходной характеристики позволяет выбрать оптимальное соотношение между рабочим током и регистрируемым напряжением при сохранении некоторого запаса по сравнению с током неконтролируемого перехода. При проектировании сверхпроводящих обмоток в технические требования к проводу наряду с критическим током следует включать необходимую степень размытости сверхпроводящего перехода, определяющую как стабильность провода в конкретных условиях эксплуатации обмотки, так и необходимую чувствительность системы управления. Разработка методов регулирования размытости перехода — новая задача для технологов сверхпроводящих проводов.

Финансирование работы

Исследование выполнено при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2020-770).

Конфликт интересов

Автор заявляет, что у него нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] M.N. Wilson, *Superconducting magnets* (Oxford Clarendon Press, 1983). [М. Уилсон, *Сверхпроводящие магниты* (Мир, М., 1985)].
- [2] Е.Ю. Клименко, УФН, **191** (8), 861 (2021). DOI: 10.3367/UFNr.2021.01.038918 [E.Yu. Klimenko, Phys. Usp., **64** (8), 815 (2021). DOI: 10.3367/UFNe.2021.01.038918].
- [3] N.A. Chernoplekov, in *Proc. of the 6th Int. Conf. on magnet technology (MT-6)* (ALPHA, Bratislava, 1977), vol. 1, p. 3–7.
- [4] Е.Ю. Клименко, Н.Н. Мартовецкий, С.И. Новиков, ДАН СССР, **261** (6), 1350 (1981). [E.Yu. Klimenko, N.N. Martovetskii, S.I. Novikov, Sov. Phys. Dokl., **26**, 1180 (1981).].