

05.4

ПРЕДЕЛЬНЫЕ ТОКИ СВЕРХПРОВОДЯЩЕГО КАБЕЛЯ С РАЗЛИЧНОЙ СТЕПЕНЬЮ НЕЛИНЕЙНОСТИ ВОЛЬТ-АМПЕРНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЕГО КОМПОНЕНТ

© *А.В.Гаврилин, В.Р.Романовский*

Одной из основных задач, возникающих при проектировании сверхпроводящих магнитных систем (СМС), является определение предельного тока, который может быть введен с заданной скоростью в токонесущий элемент (ТНЭ) без разрушения его сверхпроводящих свойств. Наиболее полно эта проблема изучена для ТНЭ, изготовленного из единичного композитного провода [1-5]. В то же время в магнитных системах, предназначенных для работы в переменных магнитных полях (индукторах и полоидальных обмотках токамаков, индуктивных накопителей энергии, электрических машинах, работающих на переменном токе, и др.) предпочтительнее ТНЭ, состоящие из большого числа транспонированных сверхпроводящих композитных проводов. Они имеют ряд преимуществ по сравнению с монолитными ТНЭ [6]. Однако в процессе их эксплуатации могут иметь место различные явления, ограничивающие максимально достижимый рабочий ток. В последнее время значительное внимание уделяется объяснению причин деградации тока при его вводе в сверхпроводящие кабели различного типа, например, [7-9]. Эта проблема известна как "ramp rate limitation" [10]. Выполненные многочисленные экспериментальные исследования показывают, что общий введенный в кабель ток, нормированный на суммарное количество жил, может быть меньше тока, протекающего при аналогичных условиях в единичной жиле. Основные физические причины этого явления полностью не изучены [11], что существенно ограничивает возможности использования многожильных ТНЭ.

В настоящей работе на основе численного эксперимента проведен анализ условий перехода сверхпроводящего кабеля в нормальное состояние при вводе в него тока с постоянной скоростью. При этом предполагалось, что вольт-амперные характеристики (ВАХ) компонент кабеля (отдельных жил) различаются друг от друга. Решение данной проблемы имеет непосредственный практический интерес, так как возможное технологическое несовершенство

процесса изготовления как кабеля в целом, так и его компонент неизбежно приводит к разбросу основных физических параметров, влияющих на вид ВАХ [2].

Рассмотрим охлаждаемый сверхпроводящий кабель, представляющий собой композицию N прямолинейных изолированных друг от друга компонент, находящихся в постоянном однородном магнитном поле. Используя результаты работы [4], будем определять текущее изменение температуры и тока в k -й компоненте кабеля на основании решения упрощенной системы уравнений вида ($t > 0$, $k = \overline{1, N}$)

$$c_k \frac{dT_k}{dt} = -\frac{h_k p_k}{S_k} (T_k - T_0) + \eta_k [J_c(T_k) - \Delta I_k] \frac{1}{S_k} \int_s E_k ds,$$

$$\sum_{j=1}^N M_{kj} \frac{dI_j}{dt} + I_k R_k(\dot{I}_k, T_k) = U, \quad (1)$$

$$\sum_{k=1}^N \dot{I}_k = \frac{dI}{dt},$$

$$T_k(0) = T_0, \quad I_k(0) = 0.$$

Здесь c_k — теплоемкость k -й жилы в кабеле, h_k — коэффициент теплоотдачи к хладагенту, p_k — охлаждаемый периметр жилы, S_k — площадь ее поперечного сечения, n_k — коэффициент заполнения, T_0 — температура хладагента, $\{M_{k,j}\}$ — матрица индуктивностей композиции, dI/dt — заданная скорость изменения тока в общей цепи, $J_c(T_k)$ — температурная зависимость критической плотности тока сверхпроводника с заданными критическими параметрами J_{c0} и T_{CB} в данном магнитном поле

$$J_c(T_k) = J_{c0} \frac{T_{CB} - T_k}{T_{CB} - T_0},$$

E_k , $R_k(\dot{I}_k, T_k)$ — напряженность электрического поля внутри жилы и его электрическое сопротивление, обусловленные изменением тока в цепи. Их соответствующие значения для проводника круглого сечения с радиусом a и протяженностью l вычисляются по формулам [2]

$$E_k(r, t) = \frac{\mu_0 \dot{I}_k}{2\pi} \ln \frac{r}{x_{p,k}(t)}, \quad R_k(\dot{I}_k, T_k) = \frac{2l}{I_k a^2} \int_{x_{p,k}}^a E_k r dr,$$

где $x_{p,k}$ — глубина проникновения магнитного потока, связанная с протекающим по проводнику током соотношением

$$I_k = \pi a^2 \eta_k [J_c(T_k) - \Delta J_k] \left[1 - \left(\frac{x_{p,k}}{a} \right)^2 \right],$$

в котором деградационная компонента токонесущей способности сверхпроводника ΔJ_k , обусловленная нелинейным характером ВАХ сверхпроводника, определяется как [4]

$$\Delta J_k = J_c(T_{q,k}) - J_{c0} i_{q,k}, \quad T_{q,k} = T_0 + \tau_{q,k}(T_{CB} - N_0),$$

$\tau_{q,k}$ и $i_{q,k}$ — соответствующие безразмерные значения температуры и тока, предшествующие возникновению неустойчивости в случае бесконечно медленного ввода тока. Для проводов с вольт-амперными характеристиками экспоненциального типа и параметрами размытия δ_k они равны [12]

$$i_{q,k} = 1 - \delta_k \left\{ 1 + \ln \left[r_k \left(\frac{\alpha i_{q,k} - 1}{\delta_k} i_{q,k} - 1 \right) \right] \right\},$$

$$\tau_{q,k} = \alpha i_{q,k} \left(\frac{i_{q,k}}{2} - \left(\frac{i_{q,k}^2}{4} - \frac{i_{q,k} \delta_k}{\alpha i_{q,k} - 1} \right)^{1/2} \right),$$

где

$$r_k = \frac{(1 - \eta_k) \rho_s}{\eta_k \rho_m}, \quad \alpha = \frac{J_c^2 \eta_k^2 \rho_m S_k}{(1 - \eta_k) h_k p_k (T_{CB} - T_0)},$$

ρ_s, ρ_m — удельные электрические сопротивления сверхпроводника и матрицы соответственно.

Решение системы (1) основывалось на методе Рунге-Кутты. При проведении вычислений исходные параметры принимались равными

$$l = 10 \text{ м}, a = 5 \cdot 10^{-4} \text{ м}, c_k = 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{м}^3 \cdot \text{К}}, \eta_k = 0.5, h = 1000 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}},$$

$$\rho_m = 2 \cdot 10^{-10} \text{ Ом} \cdot \text{м}, \quad \rho_s = 5 \cdot 10^{-7} \text{ Ом} \cdot \text{м},$$

$$J_{c0} = 4 \cdot 10^9 \frac{\text{А}}{\text{м}^2}, \quad T_{CB} = 9 \text{ К}, \quad T_0 = 4.2 \text{ К}.$$

Они описывают усредненные тепло- и электрофизические свойства ниобий-титанового сверхпроводника в медной матрице, охлаждаемого жидким гелием.

Собственная индуктивность k -й жилы и взаимная индуктивность между жилами в кабеле, расположенными друг от друга на расстоянии d , вычислялись по формулам

$$M_{k,j}[\Gamma\text{H}] = \begin{cases} 2l(\ln \frac{2l}{a} - 3/4) \cdot 10^{-7}, & k = j \\ 2l(\ln \frac{2l}{d} - 1) \cdot 10^{-7}, & k \neq j \end{cases} \quad (2)$$

в приближении прямых проводов, допустимом в случае, когда шаг скрутки компонент кабеля много больше их радиуса.

Для определения момента начала развития неустойчивости в кабеле, обусловленной ненулевой скоростью изменения тока, будем, следуя результатам работы [4], ограничивать величину его максимально допустимого повышения температур, после достижения которой сверхпроводящее состояние спонтанно разрушается необратимым образом. Тогда в рамках данной модели для жил с размытием ВАХ $1\% \leq \delta_k \leq 5\%$ неустойчивость для всех $x_{p,k} > 0$ не возникает, если

$$T_k(t) < T_{\max,k} = T_{q,k} + (T_{\text{СВ}} - T_0) \left(1 - \frac{\sqrt{I_k}}{\eta_k S_k J_{c0} i_{q,k}} \right)^3, \\ t > 0, \quad k = \overline{1, N},$$

а предельный случай $x_{p,k} \rightarrow 0$ означает начало перехода в данной жиле при полном заполнении ее поперечного сечения током.

На рис. 1 изображены результаты расчета предельного тока $i_m = I_m / (N \eta_k S_k J_{c0})$ при $d = 2a$, $I/N = 100 \text{ A/c}$ для двух конструктивных схем сверхпроводящего кабеля — двухжильного и трехжильного — с компонентами, имеющими различное “качество” сверхпроводника (т. е. различные значения параметра размытия ВАХ). Выбор заданной скорости ввода тока определялся условием наибольшего влияния параметра размытия на предельный ток [4], а диапазон варьирования δ соответствует вероятному интервалу изменения параметров размытия Nb-Ti сверхпроводника [13]. Кривые 1 и 2 показывают предельные токи двух и трехжильного кабелей, вычисленные в предположении, что все жилы одинаковы, но в первом случае $\delta_k = 1\%$, $k = \overline{1, N}$, а во втором — $\delta_k = \delta$, $k = \overline{1, N}$ и значение δ варьировалось. Штрихпунктирная линия описывает изменение предельного тока двухжильного кабеля, в котором параметр размытия одной жилы фиксировался ($\delta_1 = 1\%$), а у другой (будем условно называть ее “плохой”) — изменялся в интервале

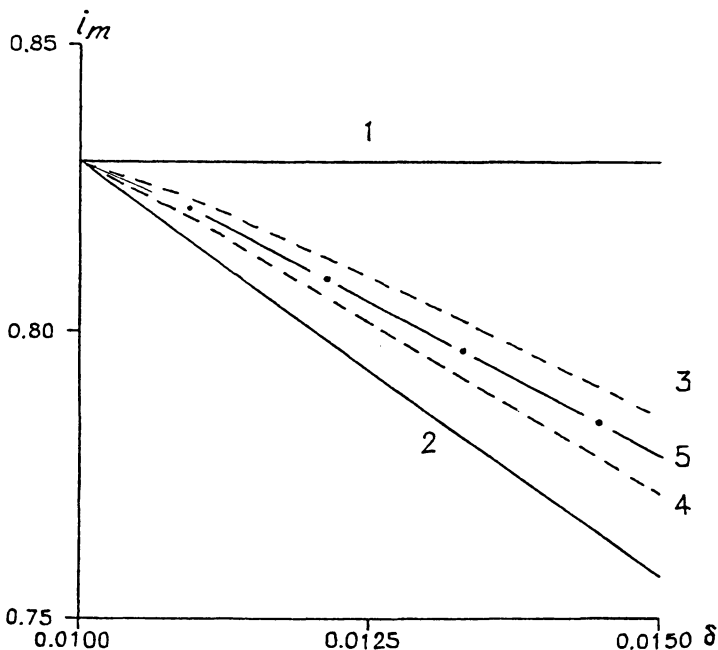


Рис. 1. Зависимость безразмерного предельного тока сверхпроводящего кабеля от параметров размытия ВАХ его жил и наличия в кабеле компоненты с повышенным значением δ (условно обозначена как \bullet): 1 — ∞ , \odot , 2 — $\bullet\bullet$, $\bullet\bullet$, 3 — \odot , 4 — $\bullet\bullet$, 5 — ∞ .

$\delta_1 \leq \delta \leq 1.5\delta_1$, $\delta_2 = \delta$. Пунктиром построены предельные токи трехжильного кабеля в случае, когда он имеет одну ($\delta_3 = \delta$, $\delta_1 = \delta_2 = 1\%$ — кривая 3) либо две ($\delta_2 = \delta_3 = \delta$, $\delta_1 = 1\%$ — кривая 4) “плохие” жилы.

На рис. 2 приведены предельные токи в зависимости от числа жил в кабеле при наличии в нем только одной “плохой” жилы ($k = 1$). При вычислениях предполагалось, что индуктивная связь между жилами удовлетворяет соотношениям (2). Данное модельное представление матрицы $\{M_{k,j}\}$ в некоторой степени упрощено. Но оно допускает проведение качественного анализа условий устойчивости. В то же время общая форма записи системы (1) позволяет без труда выполнить анализ стабильности реального ТНЭ в случае задания соответствующей матрицы индуктивностей. В частности, проведенные вычисления показывают, что предельный ток может в сильной степени зависеть от величины взаимных индуктивностей компонент кабеля, когда $\{M_{k,j}\}$ несимметрична. В случае, если матрица индуктивностей симметрична, то последние весьма слабо изменяют конеч-

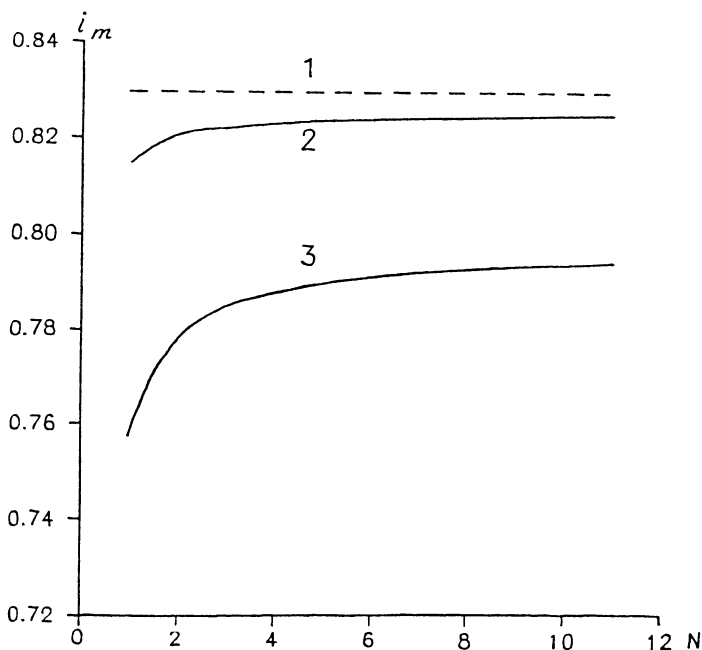


Рис. 2. Зависимость безразмерного предельного тока от числа жил в сверхпроводящем кабеле: 1 — $\delta_k = 1\%$, $k = \overline{1, N}$; 2 — $\delta_1 = 1.1\%$, $\delta_k = 1\%$, $k = \overline{2, N}$; 3 — $\delta_1 = 1.5\%$, $\delta_k = 1\%$, $k = \overline{2, N}$.

ное значение достигаемого предельного тока во всем диапазоне изменения скорости его ввода. Но при этом оказываются возможными ситуации, когда местоположение компоненты, в которой инициируется неустойчивость, будет зависеть от исходных параметров всех жил ТНЭ. Однако обсуждение данных результатов выходит за рамки настоящего сообщения и требует отдельного изложения.

Из рис. 1, 2 следует, что токонесущая способность кабеля ухудшается с увеличением параметров размытия ВАХ его жил. Причем в случае, когда δ монотонно увеличивается у всех проводов одновременно, деградация тока максимальна. В целом значения i_m зависят от количества и качества сверхпроводящих жил, и токонесущая способность кабеля ухудшается при появлении в нем даже одной “плохой” жилы. Поэтому может оказаться, что у двухжильного кабеля токонесущая способность (в пересчете на одну жилу) будет лучше, чем у трехжильного. Более того, при увеличении общего числа жил кабеля деградация тока может стать неизбежной даже при наличии в нем значительного числа жил с улучшенным качеством сверхпроводника (от-

носителем малыми значениями δ), и, как следствие этого, токонесущая способность кабеля, нормированная на общее число жил, будет заведомо ниже токонесущей способности единичного проводника.

Список литературы

- [1] Polak M., Hlasnik I., Krempasky L. // Cryogenics. 1973. V. 13. N 12. P. 702-711.
- [2] Гуревич А.В., Минц Р.Г., Разманов А.Л. Физика композитных сверхпроводников. М.: Наука, 1987. 240 с.
- [3] Klimenko E.Yu., Martovetsky N.N. // IEEE Trans. on Mag. 1988. V. 24. N 2. P. 1167-1169.
- [4] Кейлин В.Е., Романовский В.Р. // ЖТФ. 1993. Т. 63. В. 1. С. 10-21.
- [5] Tsuda M., Takamatsu H., Ishiyama A. // IEEE Trans. on Applied Superconductivity. 1993. V. 3. N 1. P. 503-506.
- [6] Уилсон М. // Сверхпроводящие магниты. М.: Мир, 1985. 407 с.
- [7] Atemiya N., Hlasnik I., Tsukamoto O. // Cryogenics. 1993. V. 33. N 9. P. 889-899.
- [8] Shimada T., Takada Y., Okazaki K., Tsuda M., Ishiyama A. // Cryogenics. 1995. V. 34. N 1. P. 555-558.
- [9] Krempasky L., Schmidt C. // Appl. Phys. Lett. 1995. V. 66. N 12. P. 1545-1547.
- [10] Lue J.W. // Cryogenics. 1994. V. 34. N 10. P. 779-786.
- [11] Verhaege T., Estop P., Tavergnier J.P. et al. // IEEE Trans. on Mag. 1994. V. 30. N 4. P. 1911-1914.
- [12] Клименко Е.Ю., Мартовецкий Н.Н., Новиков С.И. // ДАН СССР. 1981. Т. 261. № 6. С. 1350-1354.
- [13] Dorofeev G.L., Imenitov A.D., Klimenko E.Yu. // Cryogenics. 1980. V. 20. N 6. P. 307-312.

Поступило в Редакцию
4 декабря 1995 г.