

05.4;09

©1993

АНОМАЛЬНЫЕ НЕЛИНЕЙНЫЕ ЭФФЕКТЫ В КЕРАМИЧЕСКИХ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ СВЕРХПРОВОДНИКАХ

Л.Б.Розенбаум, Г.С.Гусев, А.Л.Калинин

В работе [1] была опровергнута аномалия температурной зависимости высокочастотного (ВЧ) поглощения (поверхностного сопротивления) в высокотемпературных сверхпроводниках (ВТСП). В указанных материалах нами обнаружена другая аномалия, касающаяся нелинейных эффектов и рассматриваемая в настоящей работе.

В керамических ВТСП материалах наблюдаются нелинейные эффекты, выражающиеся в возрастании активной части поверхностного импеданса [2-6] и его реактивной части [6] при увеличении амплитуды ВЧ сигнала. В [6] было предложено аналитическое выражение, связывающее мгновенные значения тока i и магнитного потока Φ , создаваемого этим током, позволяющее описать увеличение (уменьшение) ВЧ индуктивности L (резонансной частоты f_0) ВТСП колебательной системы при увеличении амплитуды I_m ВЧ тока в ней:

$$\Phi(i) = L_0 [i + \alpha(\text{sign} i)i^2], \quad (1)$$

где L_0 — значение L при $I_m \rightarrow 0$, α — коэффициент нелинейности, $\text{sign} i = 1$ при $i > 0$, $\text{sign} i = -1$ при $i < 0$.^{*} Соотношение (1) приводит к зависимости

$$L(I_m) = L_0 \left(1 + \frac{8\alpha}{3\pi} I_m \right), \quad (2)$$

хорошо описывающей экспериментальные данные (см. рис. 1).

ВТСП колебательная система, на которой выполнялись исследования, представляла собой два радиально-разрезанных (незамкнутых) тороида с наружными диаметрами 30, внутренними 18 и высотами 4 мм, приложенных

^{*} Специальными исследованиями было установлено, что изменение f_0 при увеличении I_m не связано с разогревом системы и имеет, следовательно, электродинамическую природу.

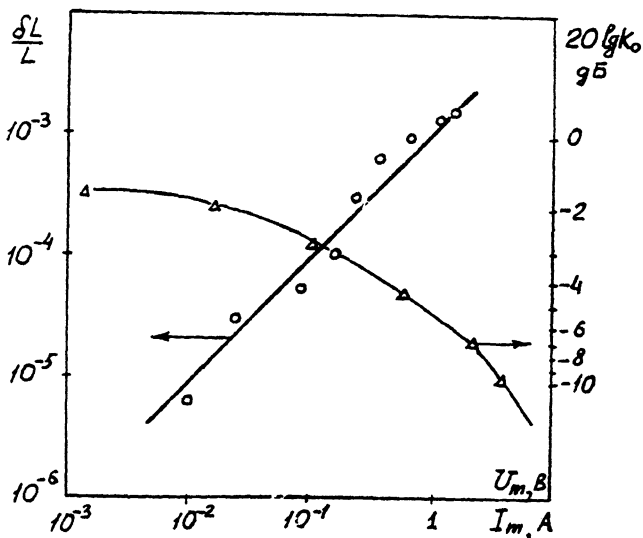


Рис. 1. Зависимости относительного изменения индуктивности $\delta L/L$ (резонансные частоты $2|\delta f_0|/f_0$) от амплитуды ВЧ тока I_m для ВТСП колебательной системы, состоящей из керамических образцов BiSrCaCuO , и коэффициента передачи k_0 от амплитуды входного напряжения U_m для защитного фильтра-ограничителя, выполненного на основе указанной системы. $f_0 \approx 725$ МГц, температура $T \approx 77$ К.

кольцевыми поверхностями друг к другу через прокладку из фторопласта Ф-4 толщиной 1 мм, с диаметрально-противоположным размещением разрезов. Емкостная связь с внешними цепями осуществлялась с помощью специальных медных пластин, расположенных вблизи тороидов и соединенных с жилами подводящих ВЧ кабелей.

Нелинейность, задаваемая соотношением (1), должна приводить к генерации ВТСП колебательной системой гармоник при воздействии на нее ВЧ сигнала повышенной амплитуды. Для выявления указанных гармоник была собрана электрическая схема (рис. 2, а), включающая в себя: 1 — задающий генератор Г4-129, 2 — усилитель Г4-128, 3 — фильтр нижних частот (ФНЧ), 4 — шестидецибельные согласованные аттенюаторы, 5 — режекторный фильтр (РФ), 6 — анализатор спектра С4-27. ВТСП колебательная LC -система с элементами емкостной связи ($2C_1$) размещалась в криостате 7, заполненном жидким азотом. ФНЧ 3 предназначен для подавления гармоник, содержащихся в выходном сигнале усилителя 2, узкополосный РФ 5 — для подавления сигнала основной частоты f_0 (с целью исключения возможности появления гармоник, создаваемых уси-

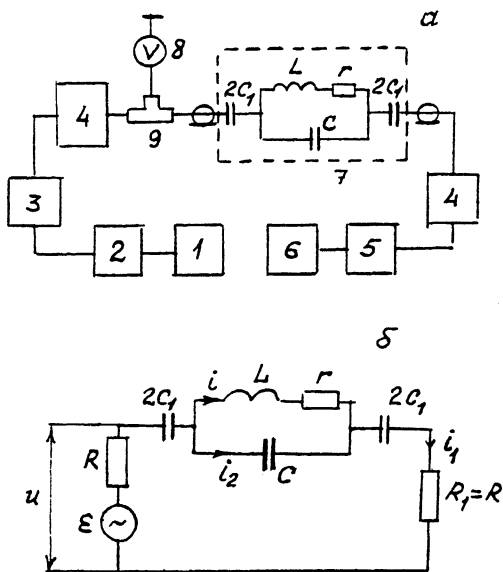


Рис. 2. Схема для исследований ВТСП колебательной системы (а) и ее эквивалентное представление (б).

лителями анализатора спектра б), аттенюаторы 4 — для согласования ВЧ тракта как по основному сигналу, так и по гармоникам, генерируемым ВТСП колебательной системой. Измерение амплитуды напряжения U_m на резонансной частоте f_0 , возбуждающего колебательную систему, осуществлялось с помощью вольтметра 8 ВЗ-43, включенного через тройник 9.

Эквивалентная схема (рис. 2, б) позволяет оценить величину гармоник. В ней ε — напряжение источника ВЧ сигнала, R — его внутреннее сопротивление, $R_1 = R$ — сопротивление нагрузки в ВЧ тракте. Очевидно,

$$i_1 = i + i_2, \quad (3)$$

$$ir + \frac{d\Phi}{dt} - \frac{1}{C} \int i_2 dt = 0, \quad (4)$$

$$\varepsilon = 2Ri_1 + \frac{1}{C_1} \int i_1 dt + \frac{1}{C} \int i_2 dt. \quad (5)$$

Система нелинейных интегро-дифференциальных уравнений

(1), (3), (4), (5) не поддается точному решению, поэтому произведем оценку гармоник тока i_1 (в нагрузке R_1) с помощью двух приближений.

Из (3) и (4) находим

$$i_1 = i + Cr \frac{di}{dt} + C' \frac{d^2\Phi}{dt^2}. \quad (6)$$

В одном приближении будем считать, что $i(t)$ — синусоидальная функция времени, а поток $\Phi(t)$ содержит высшие гармоники. Полагая

$$i = I_m \sin \omega_0 t, \quad \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_0(C + C_1)}}$$

и учитывая (1), найдем из (6) амплитуды первой, третьей, пятой, ... гармоник тока i_1 (четные гармоники отсутствуют):

$$\begin{aligned} I'_{1m,1} &\approx I_m \frac{C_1}{C + C_1}, & I'_{1m,3} &\approx \frac{24}{5\pi} \frac{C}{C + C_1} \alpha I_m^2, \\ I'_{1m,5} &\approx \frac{40}{21\pi} \frac{C}{C + C_1} \alpha I_m^2, \dots \end{aligned} \quad (7)$$

В другом приближении будем считать, что $\Phi(t)$ — синусоидальная функция времени, а $i(t)$ содержит высшие гармоники. Для этой цели нелинейную зависимость (1), с учетом малости второго слагаемого, удобнее представить в эквивалентном виде

$$i \approx \frac{1}{L_0} \left[\Phi - \frac{\alpha}{L_0} (\text{sign} \Phi) \Phi^2 \right]. \quad (8)$$

Полагая теперь $\Phi = \Phi_m \sin \omega_0 t$ и учитывая (8), найдем из (6)

$$\begin{aligned} I''_{1m,1} &\approx \frac{\Phi_m}{L_0} \frac{C_1}{C + C_1}, & I''_{1m,3} &\approx \frac{8}{15\pi} \frac{\alpha}{L_0^2} \Phi_m^2, \\ I''_{1m,5} &\approx \frac{8}{105\pi} \frac{\alpha}{L_0^2} \Phi_m^2, \dots \end{aligned} \quad (9)$$

Из (7) и (9) найдем относительный уровень третьей, пятой, ... гармоник тока i_1 для двух рассматриваемых (крайних) приближений

$$\xi_3 = \frac{I_{1m,3}}{I_{1m,1}} \approx \left(\frac{1}{3} - 3 \right) \frac{8}{5\pi} \alpha \frac{C}{C_1} I_m,$$

$$\xi_5 = \frac{I_{1m,5}}{I_{1m,1}} \approx \left(\frac{1}{5} \div 5 \right) \frac{8}{21\pi} \alpha \frac{C}{C_1} I_m. \quad (10)$$

Фактически и ток i , и поток Φ содержат высшие гармоники, и истинные значения ξ_3, ξ_5, \dots находятся между найденными крайними значениями или являются их суммами.

Можно показать, что для схемы на рис. 2, б на резонансной частоте имеют место соотношения

$$I_m \approx \frac{U_m}{R} \frac{k_0}{2 - k_0} \frac{C}{C_1}, \quad (11)$$

$$\frac{C}{C_1} = \sqrt{\frac{2(1 - k_0)RQ}{k_0\omega_0 L_0}}, \quad (12)$$

где k_0 — коэффициент передачи системы, U_m — амплитуда напряжения u , $Q = \omega_0 L/r$ — добротность системы. В указанной схеме $R = 50$ Ом, на частоте $f_0 \approx 725$ МГц $\omega_0 L \approx 100$ Ом, при $U_m \rightarrow 0$ $k_0 \rightarrow 0.84$, $Q \rightarrow 5 \cdot 10^3$. Согласно (12) это дает $C/C_1 \approx 30$.

При $U_m = 2.8$ В получилось $k_0 = 0.31$ (вследствие уменьшения Q), и согласно (11), $I_m \approx 0.3$ А.

Из рис. 1 вытекает, что в исследуемой ВТСП колебательной системе $\alpha \approx 1.2 \cdot 10^{-3} \text{ А}^{-1}$. Соответственно из (10) находим $\xi_3 \approx (0.3 - 3) 5.5 \cdot 10^{-3}$, $\xi_5 \approx (0.2 - 5) 1.3 \cdot 10^{-3}$. Измерения же показали, что в пределах чувствительности аппаратуры ($3 \cdot 10^{-6}$) гармоник тока i_1 не обнаруживается, т.е. фактически $\xi_3, \xi_5 < 3 \cdot 10^{-6}$. Расхождение на три или более порядков (!) ожидаемого и фактического уровней гармоник означает, что соотношение (1) (или (8)), связывающее мгновенные значения тока и создаваемого им потока, не имеет места.

Несоответствие между амплитудной зависимостью индуктивности ВТСП колебательной системы и уровнем генерируемых ею гармоник является аномалией. Ниже приводится попытка качественного ее истолкования.

Можно предположить, что при нарастании короткого импульса тока i длительностью θ происходит соответствующее увеличение объема V_N "нормальной" фазы в ВТСП материале (см. рис. 3),* однако далее, вследствие "захвата" этой фазы, ее объем V_N не уменьшается сразу же вслед за уменьшением мгновенного значения тока i , а относительно

* Под "нормальной" фазой здесь мы понимаем области, в которых отсутствует эффект Мейсснера.

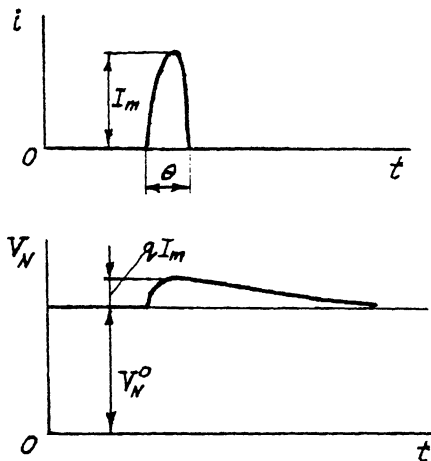


Рис. 3. Изменение объема “нормальной” фазы в ВТСП материале при воздействии импульса тока повышенной амплитуды.

медленно, с постоянной времени $\tau \gg \theta$, релаксирует до первоначального значения V_N^0 . Тогда при воздействии синусоидального сигнала с периодом колебаний $T \ll \tau$ объем V_N и площадь S_N поперечного сечения указанной фазы могут быть представлены в виде

$$V_N \approx V_N^0 + qI_m, \quad S_N \approx S_N^0 + \nu I_m, \quad (13)$$

где q и ν — соответствующие коэффициенты.

ВЧ ток i создает в “нормальных” областях ВТСП материала и вне его магнитную индукцию

$$B(x, y) = K(x, y)i, \quad (14)$$

где $K(x, y)$ — коэффициент, определяющийся координатами x, y рассматриваемых точек материала и пространства вокруг него. Магнитный поток

$$\Phi = \int_{S+S_N} \mathbf{B} d\mathbf{S} = i \int_{S+S_N} K(x, y) dx dy = i \bar{K} (S + S_N), \quad (15)$$

где \bar{K} — среднее значение коэффициента K , S — площадь поперечного сечения, занятого потоком вне ВТСП материала. Для $i = I_m \sin \omega t$ находим из (13) и (15)

$$\Phi = \bar{K} (S + S_N^0 + \nu I_m) I_m \sin \omega t, \quad (16)$$

откуда следует и наблюдаемая зависимость (2) (рис. 1). Однако при этом, как видно из (16), высших гармоник магнитного потока нет*.

Приведенная модель весьма упрощенная. Она не детализирует механизмов "захвата" "нормальной" фазы и ее релаксации при выключении тока, однако она может послужить отправным пунктом для понимания истинных и аномальных нелинейностей в керамических ВТСП материалах. В какой-то степени это может быть сходно с захватом магнитного потока и его влиянием на поверхностное сопротивление керамических [2,3] и пленочных [7] ВТСП материалов.

Заметим также, что практическое отсутствие генерации гармоник (а следовательно, и интермодуляций) в ВТСП колебательной системе является технически полезным эффектом, так как ВЧ керамические ВТСП фильтры (в том числе защитные фильтры-ограничители, см. рис. 1) при повышенных амплитудах сигналов не будут создавать помех радиоприему.

Список литературы

- [1] Розенбаум Л.Б. // Письма в ЖТФ. 1992. Т. 18. Вып. 18. С. 25.
- [2] Вендик О.Г. и др. // Письма в ЖТФ. 1988. Т. 14. Вып. 21. С. 2001.
- [3] Акимова А.И. и др. // Письма в ЖТФ. 1989. Т. 15. Вып. 5. С. 30.
- [4] Bohn C.L. et al. // IEEE Trans. on Magn. 1989. V. 25. N 2. P. 2406.
- [5] Delayen J.R. et al. // J. Superconduct. 1990. V. 3. N 3. P. 251.
- [6] Гусев Г.С. и др. // СФХТ. 1992. Т. 5. № 3. С. 545.
- [7] Гайдуков М.М. и др. // Письма в ЖТФ. 1992. Т. 18. Вып. 21. С. 76.

Российский институт
мощного радиостроения,
Санкт-Петербург

Поступило в Редакцию
28 июня 1993 г.

* Строго говоря, $K(x, y)$, а следовательно, и \bar{K} также зависят от I_m , но для качественного рассмотрения это не существенно.