

УДК 519.65:538.945

Математическое моделирование гармоник напряжения для вольтамперных характеристик с резкими особенностями

© Н. Д. Кузьмичев¹, М. А. Васютин², Е. А. Лапшина³, Д. А. Шилкин⁴

Аннотация. В работе выполнено математическое моделирование гармоник напряжения, возникающих в сверхпроводниках, которые находятся в резистивном состоянии при пропускании через них переменного гармонического тока. В резистивном состоянии вольтамперные характеристики сверхпроводника являются нелинейными и часто имеют резкие особенности, вызванные неустойчивостью. В связи с этим вольтамперные характеристики сверхпроводников, полученные на переменном и постоянном токах, сильно отличаются. Получены аналитические выражения амплитуды напряжения первой гармоники для широких пленок сверхпроводников второго рода с резкими особенностями типа скачка и излома в токовой зависимости вольтамперных характеристик. Численно рассчитаны зависимости амплитуд 1, 2, 3 и 5-ой гармоник напряжения от величины постоянного и амплитуды переменного тока. Показано, что положения особенностей на токовых зависимостях амплитуд гармоник напряжения определяют важные характеристики сверхпроводника. Рассмотрена экспериментальная ВАХ первой гармоники монокристалла YBCO. На основании выполненного математического моделирования показано, что при токах выше критического из-за плохого теплообмена происходит перегрев монокристалла. Сопротивление монокристалла зависит от температуры, растет пропорционально току и вольтамперная характеристика имеет параболическую зависимость.

Ключевые слова: вольтамперная характеристика (ВАХ) сверхпроводника, резкие особенности ВАХ, амплитуды напряжения гармоник, ВАХ гармоник напряжения, критический ток.

1. Введение

Хорошо известно, что исследование физических свойств каких-либо материалов при переменном воздействии является эффективнее, чем при статическом воздействии [1 – 5]. Это связано с тем, что переменные сигналы легче усиливать и аппаратура для их измерения является чувствительнее. Кроме того, если зависимость изучаемой характеристики материала имеет такие особенности, как скачок, излом или другие резкие изменения функциональных свойств, то данные, полученные при статическом и переменном воздействии, сильно отличаются. Примерами могут служить вольтамперные характеристики (ВАХ)

¹ **Кузьмичев Николай Дмитриевич**, профессор кафедры конструкторско-технологической информатики, ФГБОУ ВО "МГУ им. Н. П. Огарёва" (430005, Россия, Республика Мордовия, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68), доктор физико-математических наук, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6707-4950>, kuzmichevnd@yandex.ru.

² **Васютин Михаил Александрович**, доцент кафедры конструкторско-технологической информатики, ФГБОУ ВО "МГУ им. Н. П. Огарёва" (430005, Россия, Республика Мордовия, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68), ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4856-7407>, vasyutinm@mail.ru.

³ **Лапшина Елена Анатольевна**, доцент кафедры конструкторско-технологической информатики, ФГБОУ ВО "МГУ им. Н. П. Огарёва" (430005, Россия, Республика Мордовия, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68), ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8828-273X>, e.lapshina2010@yandex.ru.

⁴ **Шилкин Дмитрий Алексеевич**, инженер кафедры конструкторско-технологической информатики, ФГБОУ ВО "МГУ им. Н. П. Огарёва" (430005, Россия, Республика Мордовия, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68), ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9061-3174>, dwi8hi@outlook.com.

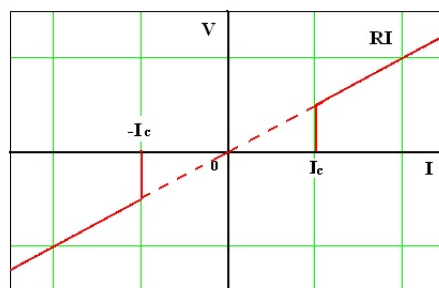
сверхпроводников, полученные на переменном и постоянном токе [6 – 8]. Если через среду, имеющую нелинейную проводимость пропустить гармонический электрический ток, то напряжение, возникающее в среде, будет негармоническим (в его составе будут высшие гармоники). Зависимости напряжений высших гармоник от амплитуды переменного тока (ВАХ гармоник) содержат информацию об особенностях ВАХ на постоянном токе, что позволяет определять важные характеристики материала, такие как критический ток, ток перегрева и т. д. [1 – 8]. Переход сверхпроводника из сверхпроводящего в нормальное состояние является фазовым переходом второго рода и сопровождается скачком в ряде физических характеристик. Например, ВАХ сверхпроводника испытывает скачок при пропускании тока, равного критическому току I_c , и при токах I , выше критического, является линейной в идеальном случае. В действительности же у «подножия» и «вершины» скачка ВАХ имеется нелинейность, обусловленная вихрями Абрикосова, флуктуациями и др. [1, 6, 7, 9, 10]. В эксперименте и практических приложениях используются сверхпроводящие материалы в виде тонких пленок. В пленках переход осуществляется через широкое резистивное состояние и часто является нелинейным и неустойчивым, что приводит к скачкам, изломам и нелинейным зависимостям ВАХ [9, 10]. Ниже рассматриваются два простых случая: 1 – скачкообразная ВАХ и 2 – ВАХ с изломом.

2. Скачкообразная ВАХ

Переход сверхпроводника в нормальное состояние, как было указано во введении, сопровождается скачком в ВАХ. В этом простом случае ВАХ имеет следующий вид (2.1):

$$V(I) = \begin{cases} 0, & |I| \leq I_c; \\ R \cdot I, & |I| > I_c. \end{cases} \quad (2.1)$$

Здесь R сопротивление нормального состояния, I_c – критический ток.



Р и с у н о к 2.1

Скачкообразная ВАХ сверхпроводника

При пропускании через образец сверхпроводника переменного гармонического тока амплитудой i , превышающей величину I_c (т. е. $i \cdot \cos(t)$, здесь $t = \omega \tau$, ω – частота и τ – время), напряжение, возникающее на образце, становится негармоническим и в своем составе будет иметь первую и высшие гармоники. Напряжения гармоник зависят от амплитуды тока i нелинейно. На рисунках (2.2) и (2.3) приведены ВАХ первой V_1 , третьей V_3 и пятой V_5 гармоник. Зависимости V_1 , V_3 и V_5 определялись численно с помощью программного комплекса Mathcad по формуле

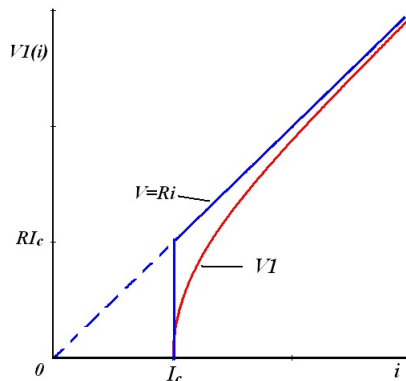
$$V_n(i) = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} V(i, t) \cos(nt) dt. \quad (2.2)$$

Здесь $n = 1, 2, 3, \dots$.

Напряжения четных гармоник в силу нечетной симметрии ВАХ отсутствовали. Аналитически найденная первая гармоника напряжения для ВАХ (2.1) имеет вид

$$V1(i) = \begin{cases} 0, & i \leq I_c; \\ \frac{R \cdot i}{\pi} [(\pi + t_1 - t_2) + \cos(t_1 + t_2) \cdot \sin(t_1 - t_2)], & i > I_c. \end{cases} \quad (2.3)$$

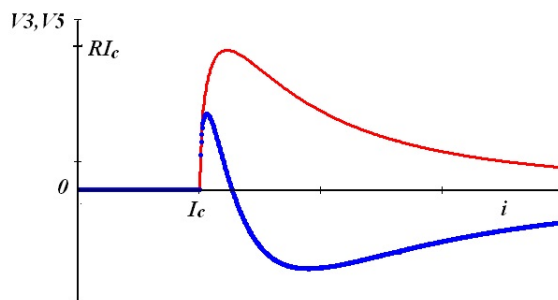
Здесь $t_1 = \arccos\left(\frac{I_c}{i}\right)$, $t_2 = \arccos\left(-\frac{I_c}{i}\right)$.



Р и с у н о к 2.2

ВАХ первой гармоники $V1(i)$, вычисленная по формулам (2.2) и (2.3). На графике, кроме зависимости $V1(i)$, приведена ВАХ на постоянном токе $V(i) = Ri$

Из рисунка (2.2) видно, что $V1(i)$ начинается с нуля при $i = I_c$ и асимптотически стремится к $V(i)$. Как видно из формулы (2.3) зависимость $V1(i)$ является суммой линейного и нелинейного членов. Нелинейный член при $i \rightarrow \infty$ стремится к нулю, т. е. $V1(i) \rightarrow Ri$. Зависимости $V3(i)$ и $V5(i)$ (2.3) являются сильно нелинейными и отличны от нуля при $i > I_c$, вблизи I_c имеют максимум и стремятся к нулю при возрастании i . Кроме того, при $i \approx 0.27 I_c$ фаза $V5(i)$ скачкообразно изменяется на величину π , $V5(i)$ становится отрицательной и проходит через минимум. Более высокие гармоники около I_c имеют узкие максимумы, поэтому положение максимумов высших гармоник может служить критерием определения значения I_c .

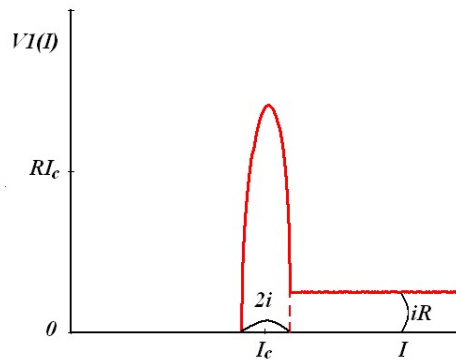


Р и с у н о к 2.3

ВАХ 3-ей и 5-ой гармоник

Если через образец сверхпроводника пропустить одновременно постоянный ток I и переменный ток амплитудой i (т. е. $J = I + i \cdot \cos(t)$), то амплитуды гармоник будут функциями двух переменных I и i т. е. $Vn = Vn(I, i)$. Для практики большое значение имеют функции $Vn(I, i = \text{const})$ при малых значениях i , так как $Vn(I)$ качественно

подобны производным вольтамперных характеристик $d^n V(I)/dI^n$. Рассмотрим зависимость $V_1(I)$ при амплитуде модуляции $i = 0.125I_c$ (2.4).



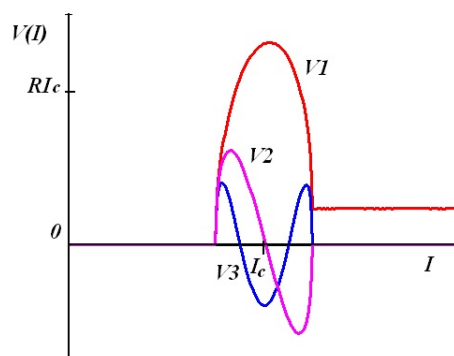
Р и с у н о к 2.4

Зависимость амплитуды 1-ой гармоники $V_1(I)$ от величины постоянного тока при амплитуде модуляции тока $i = (1/8)I_c$

Зависимость $V_1(I)$ получена численно. Видно, что $V_1(I)$ вблизи I_c имеет колоколообразный вид с шириной у основания, равной $2i$. Положение максимума совпадает со значением I_c и будет определять критерий его нахождения. При стремлении i к нулю ширина максимума стремится к нулю, а высота к бесконечности. Таким образом, функция $V_1(I)$ при $i \rightarrow 0$ стремится к дельта-функции $\delta(I)$, т. е. к обобщенной производной ступенчатой функции (2.4).

На рисунке (2.5) приведены численно определенные зависимости трех гармоник напряжения от постоянного тока I : 1, 2 и 3-ей. Первая гармоника приведена для сравнения. Четные гармоники, в частности 2-ая, появляются при $I \neq 0$ вследствие нарушения нечетной симметрии ВАХ при ее смещении заданным током I . Из рисунка видно, что зависимость $V_2(I)$ похожа на вторую производную $d^2V(I)/dI^2$, а $V_3(I)$ качественно совпадает с третьей производной $d^3V(I)/dI^3$. При уменьшении амплитуды модуляции функции $V_n(I)$ стремятся к $d^nV(I)/dI^n$ [4,5,11 – 13].

Таким образом, экспериментальное изучение зависимостей высших гармоник от величин постоянного и переменного токов позволяет качественно определять и рассчитывать ВАХ и находить значение I_c .



Р и с у н о к 2.5

Зависимости амплитуд 1-ой, 2-ой и 3-ей гармоник $V_1(I)$ от величины постоянного тока при амплитуде модуляции тока $i = (1/8)I_c$

3. ВАХ с изломом

Как было отмечено во введении, важное практическое значение имеют сверхпроводящие пленки. Переход в нормальное состояние в пленках происходит через широкое так называемое резистивное состояние. Сопротивление пленки в резистивном состоянии отлично от нуля, но меньше сопротивления нормального состояния. При достижении током критического значения I_c у краев сверхпроводящей пленки зарождаются цепочки вихрей Абрикосова противоположной полярности, которые двигаются поперек пленке навстречу друг другу и взаимно уничтожаются посреди пленки. Движение вихрей является вязким и приводит к падению напряжения V на пленке, которое в общем случае нелинейно зависит от тока. Линейная плотность тока $j = I/b$ описывается в этом случае обобщенным нелинейным интегро-дифференциальным уравнением Лондонов [9]:

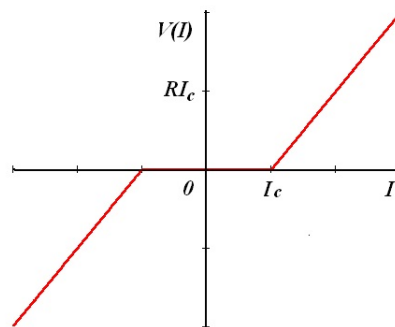
$$8\pi \frac{\lambda_{eff}}{b} \frac{dj}{dx} + 2 \int_{-1}^{+1} \frac{j(x') dx'}{x' - x} = \left(\frac{\eta E}{j\phi_0} \right) \text{sign}(x). \quad (3.1)$$

Здесь b – ширина пленки, λ_{eff} – эффективная глубина проникновения магнитного поля, x – координата, отсчитываемая от середины пленки в единицах b , η – коэффициент вязкого движения вихрей, ϕ_0 – квант магнитного потока и E ($V \sim E$) – напряженность электрического поля.

Когда $I - I_c \ll I_c$, то с учетом малости градиентного члена в уравнении (3.1) и упрощения уравнения при $x = \pm 1$ путем замены $1 - x^2 \sim \lambda_{eff}/b$ получим линейную ВАХ с изломом вида $E \sim I - I_c$. Для дальнейшего использования в расчетах гармоник напряжения нечетно симметричную ВАХ для данного случая выразим формулой [9,10]:

$$V(I) = \begin{cases} 0, & |I| \leq I_c; \\ R \cdot [I - I_c \cdot \text{sign}(I)], & |I| > I_c. \end{cases} \quad (3.2)$$

Здесь R является сопротивлением вязкого течения вихрей. График ВАХ для этого случая изображен на рисунке (3.1). Видно, что ВАХ при $I = I_c$ имеет излом.



Р и с у н о к 3.1

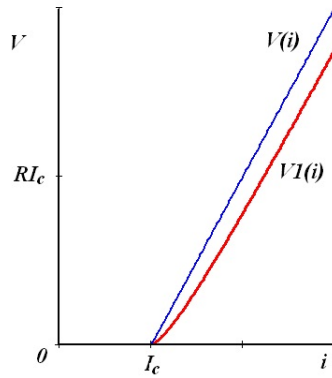
ВАХ для случая вязкого движения вихрей Абрикосова, порожденных транспортным током, протекающим вдоль пленки (3.2)

Напряжение первой гармоники, полученное аналитически из формулы (2.2), имеет вид

$$V_1(i) = \begin{cases} 0, & i \leq I_c; \\ \frac{Ri}{\pi} \left[(\pi + t_1 - t_2) + \frac{1}{2} (\sin(2t_1) - \sin(2t_2)) \right] - \frac{2RI_c}{\pi} [\sin(2t_1) + \sin(2t_2)], & i > I_c. \end{cases} \quad (3.3)$$

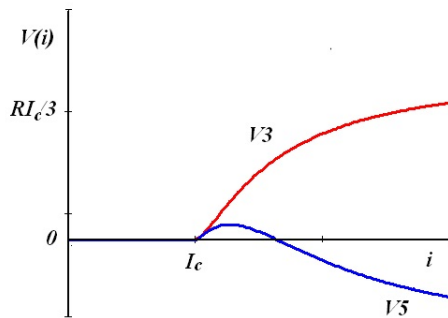
На рисунке (3.2) приведен график зависимости $V1(i)$, найденный численно (2.2) и аналитически (3.3). Кроме того, для сравнения на данном рисунке приведена ВАХ пленки на постоянном токе (3.2). Из рисунка видно, что зависимость $V1(i)$ около I_c является нелинейной и асимптотически не стремится к $V(I)$, становясь линейной.

ВАХ 3-ей и 5-ой гармоник приведены на рисунке (3.3). Видно, что $V3(i)$ и $V5(i)$ отличны от нуля при $i > I_c$ и являются нелинейными. При $i \rightarrow \infty$ величины $V3$ и $V5$ стремятся к постоянным значениям, отличным от нуля.



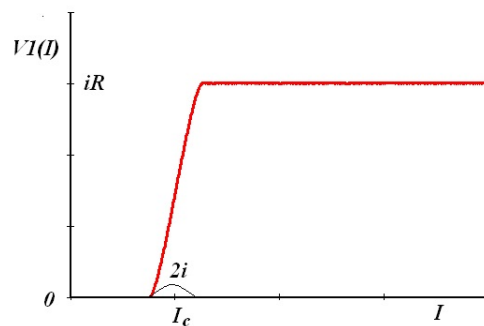
Р и с у н о к 3.2

ВАХ первой гармоники $V1(i)$. Для сравнения на рисунке приведена ВАХ на постоянном токе.



Р и с у н о к 3.3

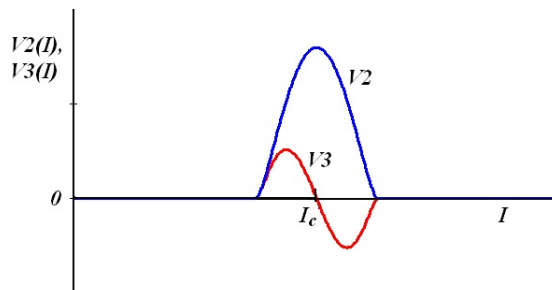
ВАХ 3-ей и 5-ой гармоник для случая вязкого движения вихрей



Р и с у н о к 3.4

Зависимость $V1(I)$ для ВАХ (3.1) при фиксированной амплитуде модуляции i

На рисунках (3.4) и (3.5) приведены зависимости амплитуд напряжений 1, 2 и 3-ей гармоник от постоянного тока I , определенные численно для вольтамперной характеристики (3.2) при фиксированной амплитуде модуляции. Видно, что, как и в случае ВАХ (2.1), при $i \rightarrow 0$ гармоники напряжения определяют соответствующие им производные ВАХ (3.2) на постоянном токе.

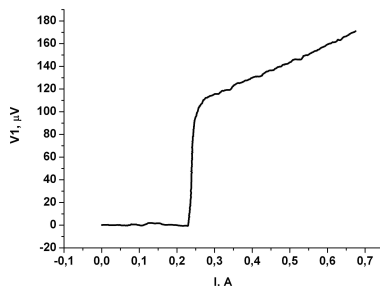


Р и с у н о к 3.5

Зависимости $V2(I)$ и $V3(I)$ для ВАХ (3.1) при $i = const$

4. Экспериментальная ВАХ

Рассмотрим экспериментальную ВАХ первой гармоники монокристалла $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.9}$ (YBCO) в магнитном поле приведенную на рисунке (4.1). Из рисунка видно, что данная зависимость качественно совпадает с $V1(I)$ приведенной на рисунке (3.4), за исключением области, расположенной справа от скачка, обусловленного превышением суммарного тока (величины постоянного и амплитуды переменного тока) значения $I_c = 0.24\text{A}$ и переходом в нормальное состояние. В этой области ВАХ первой гармоники изменяется от I практически линейно. Это означает, что ВАХ на постоянном токе $V(I)$ имеет квадратичную зависимость т. е. $V \sim I^2$.



Р и с у н о к 4.1

Экспериментальная ВАХ первой гармоники монокристалла $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.9}$ в магнитном поле напряженностью 323 Ое при температуре 84 К. Амплитуда модуляции тока составляла $i = 18.3\text{mA}$, частота – 1Hz

Зависимости подобного рода наблюдаются в случае перегрева образца. Т. е. в образце выделяется джоулево тепло, приводящее к нагреву образца. Сопротивление образца зависит от температуры и растет пропорционально току. В итоге ВАХ будет иметь параболическую зависимость.

5. Заключение

Таким образом, математическое моделирование амплитуд напряжений первой и высших гармоник для вольтамперных характеристик сверхпроводников со скачком и изломом показало, что положения особенностей на зависимостях амплитуд гармоник напряжения определяют важные характеристики сверхпроводника. Кроме того, по виду зависимостей гармоник напряжения можно определять ВАХ сверхпроводника.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Л. Солимар, *"Туннельный эффект в сверхпроводниках и его применение"*, М.: Изд-во Мир, 1974.
2. Н. Д. Кузьмичев, "Поведение намагниченности поликристаллических образцов $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ в слабых магнитных полях", *Письма в ЖТФ*, **17** (1991), 56.
3. Н. Д. Кузьмичев, "Гистерезисная намагниченность и генерация гармоник магнитными материалами: анализ спектра гармоник намагниченности на примере высокотемпературных сверхпроводников", *ЖТФ*, **64** (1994), 63.
4. Н. Д. Кузьмичев, "Модуляционная методика восстановления исходных зависимостей и их производных в случае произвольных амплитуд модуляции", *Письма в ЖТФ*, **20** (1994), 39.
5. Н. Д. Кузьмичев, "Применение рядов Тейлора-Фурье для численного и экспериментального определения производных изучаемой зависимости", *Журнал СВМО*, **13** (2011), 70.
6. М. А. Васютин, А. И. Головашкин, Н. Д. Кузьмичев, "Нелинейность вольтамперных характеристик монокристаллов $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ и переход Березинского-Костерлица-Таулеса", *ФТТ*, **48** (2006), 2128.
7. N. D. Kuzmichev, M. A. Vasyutin, A. I. Golovashkin, "YBCO single crystals I-V characteristics nonlinearity and Nelson-Kosterlitz jump", *Physica C*, **849** (2007), 460-462.
8. М. А. Васютин, Н. Д. Кузьмичев, "Нелинейность ВАХ ВТСП $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$, определенная с помощью модуляционной методики", *Письма в ЖТФ*, **18** (1992), 5.
9. Л. Г. Асламазов, С. В. Лемпицкий, "Влияние магнитного поля на резистивное состояние широкой сверхпроводящей пленки", *ЖЭТФ*, **84** (1983), 2216.
10. Б. Ю. Блок, С. В. Лемпицкий, *ФТТ*, **26** (1984), 457.
11. Н. Д. Кузьмичев, М. А. Васютин, Е. А. Лапшина, Д. А. Шилкин, "Математическое моделирование температурной зависимости второго критического поля тонких плёнок нитрида ниобия", *Журнал СВМО*, **18** (2016), 134.
12. Н. Д. Кузьмичев, М. А. Васютин, Д. А. Шилкин, "Верхнее критическое поле тонких пленок нитрида ниобия", *ФТТ*, **58** (2016), 231.

13. Н. Д. Кузьмичев, М. А. Васютин, Д. А. Шилкин, “Экспериментальное определение производной вольт-амперной характеристики нелинейной полупроводниковой структуры с помощью модуляционного Фурье-анализа”, *ФТП*, **50** (2016), 830.

Поступила 19.10.2017

MSC2010 82D55

Mathematical modeling of voltage harmonics for current-voltage characteristics with singularities

© N. D. Kuzmichev⁵, M. A. Vasyutin⁶, E. A. Lapshina⁷, D. A. Shilkin⁸

Abstract. In the paper mathematical modeling of the voltage harmonics occurring in superconductor is performed. It is assumed that the superconductor is in the resistive state when an alternating harmonic current passes through them. In such the I-V characteristics of a superconductor are nonlinear and often have singularities caused by instability. For this reason, the I-V characteristics of superconductors obtained for alternating and direct currents are very different. Analytical expressions for the voltage amplitude of the first harmonic for wide films of type-II superconductors with singularities of jump-type and break-type in the current dependence of the I-V characteristics are obtained. The dependences of the amplitudes of the 1st, 2nd, 3rd and the 5th voltage harmonics on the value of the constant current and on the amplitude of the alternating current are calculated numerically. It is shown that the positions of the current dependencies' singularities determine important characteristics of the superconductor. The experimental I-V characteristic of the first harmonic of YBCO single crystal is considered. Basing on the mathematical modeling performed, it is shown that at currents above the critical one, the single crystal overheats because of poor heat transfer. The resistance of a single crystal depends on the temperature and increases in proportion to the current; the I-V characteristic has a parabolic relationship.

Key Words: current-voltage characteristic of superconductors, singularities of the current-voltage characteristic, amplitude voltage of harmonic, current-voltage characteristic of the voltage harmonics, critical current.

REFERENCES

1. L. Solimar, *Superconducting Tunneling and Application*, Izd. Mir., Moscow, 1974 (In Russ.).
2. N. D. Kuzmichev, "The behavior of the magnetization of polycrystalline $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ samples in weak magnetic fields", *Technical Physics Letters*, **17** (1991), 56 (In Russ.).
3. N. D. Kuzmichev, "Hysteresis magnetization and harmonic generation by magnetic materials: analysis of the magnetization harmonic spectrum by the example of high-temperature superconductors", *Technical Physics. The Russian Journal of Applied Physics*, **64** (1994), 63 (In Russ.).

⁵ **Nikolay D. Kuzmichev**, Professor of Department of Computer Science and CAD-technology Ruzaevsky engineering Institute (branch) National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya Str., Saransk 430005, Republic of Mordovia, Russia), Dr. Sci. (Physics and Mathematics), ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6707-4950>, kuzmichevnd@yandex.ru.

⁶ **Mikhael A. Vasyutin**, Docent of Department of Computer Science and CAD-technology Ruzaevsky engineering Institute (branch) National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya Str., Saransk 430005, Republic of Mordovia, Russia), ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4856-7407>, vasyutinm@mail.ru.

⁷ **Elena A. Lapshina**, Docent of Department of Computer Science and CAD-technology Ruzaevsky engineering Institute (branch) National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya Str., Saransk 430005, Republic of Mordovia, Russia), ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8828-273X>, e.lapshina2010@yandex.ru.

⁸ **Dmitri A. Shilkin**, Engineer of Department of Computer Science and CAD-technology Ruzaevsky engineering Institute (branch) National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya Str., Saransk 430005, Republic of Mordovia, Russia), ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9061-3174>, dwi8hi@outlook.com.

4. N. D. Kuzmichev, “The modulation technique for reconstructing the original dependencies and their derivatives in the case of arbitrary modulation amplitudes”, *Technical Physics Letters*, **20** (1994), 39 (In Russ.).
5. N. D. Kuzmichev, “Application of the Taylor-Fourier series for numerical and experimental calculation of investigation dependance derivatives”, *SVMO*, **13** (2011), 70 (In Russ.).
6. M. A. Vasyutin, A. I. Golovashkin, N. D. Kuzmichev, “Nonlinearity of the current-voltage characteristics for $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ single crystals and the Berezinskii-Kosterlitz-Thouless transition”, *Physics of the Solid State*, **48** (2006), 2128 (In Russ.).
7. N. D. Kuzmichev, M. A. Vasyutin, A. I. Golovashkin, “YBCO single crystals I-V characteristics nonlinearity and Nelson-Kosterlitz jump”, *Physica C*, **849** (2007), 460-462 (In Russ.).
8. M. A. Vasyutin, N. D. Kuzmichev, “Nonlinearity of the current-voltage characteristics of high-temperature superconductivity $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$, determined by the modulation technique”, *Technical Physics Letters*, **18** (1992), 5 (In Russ.).
9. L. G. Aslamazov, S. V. Lempickiy, “Resistive state in broad superconducting films”, *JETP*, **84** (1983), 2216.
10. B. Yu. Blok, S. V. Lempickiy, *Physics of the Solid State*, **26** (1984), 457 (In Russ.).
11. N. D. Kuzmichev, M. A. Vasyutin, E. A. Lapshina, D. A. Shilkin, “Mathematical modeling of temperature dependence of the second critical field of thin films of niobium nitride”, *SVMO*, **18** (2016), 134 (In Russ.).
12. N. D. Kuzmichev, M. A. Vasyutin, D. A. Shilkin, “Upper critical field of niobium nitride thin films”, *Physics of the Solid State*, **58** (2016), 231 (In Russ.).
13. N. D. Kuzmichev, M. A. Vasyutin, D. A. Shilkin, “Experimental determination of the derivative of the current-voltage characteristic of a nonlinear semiconductor structure using modulation Fourier analysis”, *Semiconductors*, **50** (2016), 830 (In Russ.).

Submitted 19.10.2017