

О ЧАСТОТЕ РЕЛАКСАЦИОННЫХ КОЛЕБАНИЙ ГЕНЕРАТОРА НА СВЕРХПРОВОДНИКЕ

В.А. Рахубовский

*Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»,
Харьков, Украина*

Получено уравнение частоты релаксационных колебаний генератора на сверхпроводнике в зависимости от параметров схемы и величины тока питания. Проведено сравнение расчетных значений частоты с экспериментальными.

В работе [1] приведен генератор релаксационных колебаний (ГРК) на одиночном сверхпроводнике, имеющем гистерезисную вольт-амперную характеристику (ВАХ). Показаны основные характеристики ГРК. Однако отсутствие в работе анализа частоты автоколебаний в генераторе, с одной стороны, и уникальность ГРК как измерительного прибора, пригодного для использования при низких температурах, с другой, - явились причинами, побудившими автора продолжить исследование генератора.

ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ГРК

Принцип действия ГРК основывается на релаксационном процессе, наблюдающемся при переходе сверхпроводника из сверхпроводящего состояния в резистивное и обратно. Зависимость $U = f(i)$ между силой тока i , протекающего по сверхпроводнику, и возникающим на нем напряжением U показана на рис. 1. Нижняя ветвь da соответствует сверхпроводящему состоянию сверхпроводника, верхняя bc - резистивному. Переход с нижней ветви на верхнюю происходит при возрастании тока, протекающего через сверхпроводник до значения i_c в точке a . Обратный переход с верхней ветви bc на нижнюю ветвь da совершается при убывании тока и достижении им значения i_0 в точке c .

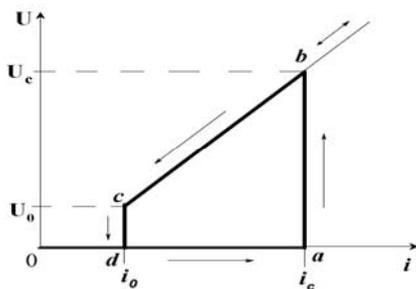


Рис. 1. Гистерезисная ВАХ сверхпроводника

На рис.2 приведена схема ГРК на одиночном сверхпроводнике, запитываемого от источника постоянного тока i_{Π} . При подаче i_{Π} на вход схемы ток разветвляется в ветвях I и II обратно пропорционально их индуктивностям $-L_1, L_2$. При достижении током i_1 в ветви I значения i_c сверхпроводник резко переключается из сверхпроводящего в резистивное состояние, и начинает спадать ток i_1 в ветви

I и нарастать ток i_2 в ветви II ГРК. При уменьшении тока i_1 до значения i_0 сверхпроводник переходит вновь в сверхпроводящее состояние, и ток i_2 из ветви II, содержащей сопротивление R_2 , перебрасывается в ветвь I. Далее процесс повторяется.

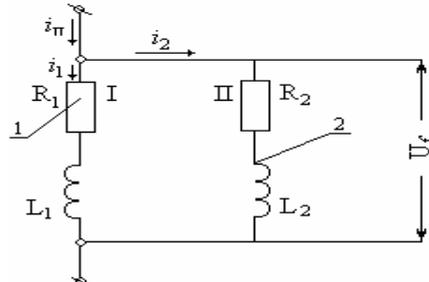


Рис. 2. Принципиальная схема ГРК:
1 - сверхпроводник; 2 - RL-цепь

Таким образом, в схеме (см. рис. 2) происходят релаксационные колебания, при которых сверхпроводник находится то с сверхпроводящем, то в резистивном состоянии. Фазовая точка [2, 3] при этом описывает замкнутый контур $abcd$ (см. рис. 1). При пробегании фазовой точки контура $abcd$ сопротивление сверхпроводника R , токи i_1, i_2 в ветвях и напряжение U_f на выходе ГРК изменяются согласно графикам, приведенным на рис.3.

РАСЧЕТ ЧАСТОТЫ ГРК И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Как видно из рис. 3 период релаксационных колебаний равен: $T = t_i + t_c$, где t_i - время нарастания тока i_1 от значения i_0 до i_c , в течение которого сверхпроводник находится в сверхпроводящем состоянии; t_c - время спада тока i_1 от значения i_c до i_0 , в течение которого сверхпроводник находится в резистивном состоянии. Найдем отрезки времени t_i и t_c . Уравнение, описывающее рассматриваемую схему ГРК (см. рис. 2), имеет вид:

$$(L_1 + L_2) \frac{di_1}{dt} + i_1 R_2 = R_2 i_{\Pi}. \quad (1)$$

При начальных условиях $i_1 = i_0$ при $t = 0$ получаем решение [4]:

$$i_1 = i_{\Pi} - (i_{\Pi} - i_0) e^{-\frac{R_2}{L_1 + L_2} t} \quad (2)$$

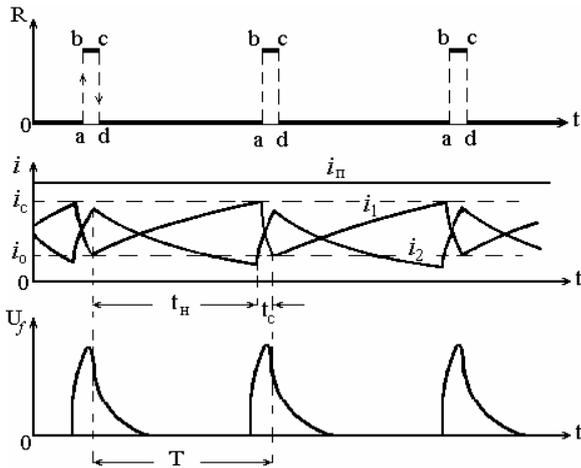


Рис. 3. Временные диаграммы работы ГРК

Подставляя в уравнение (2) $t = t_n$ и решая его в отношении t_n , получим:

$$t_n = \frac{L_1 + L_2}{R_2} \ln \frac{i_{\pi} - i_0}{i_{\pi} - i_c}. \quad (3)$$

В момент времени t_n ток i_1 достигает значения i_c , сверхпроводник переходит в резистивное состояние и ток i_1 начинает уменьшаться. В этом случае уравнение, описывающее схему ГРК, имеет вид:

$$(L_1 + L_2) \frac{di_1}{dt} + i_1(R_1 + R_2) = R_2 i_{\pi}, \quad (4)$$

где R_1 - сопротивление сверхпроводника в резистивном состоянии в точке "b" (см. рис.1). При начальных условиях $i_1 = i_c$ при $t = 0$ получаем решение

$$i_1 = i_c \cdot e^{-\frac{R_1 + R_2}{L_1 + L_2} t}. \quad (5)$$

В момент времени t_c ток i_1 достигает значения i_0 и сверхпроводник вновь переходит в сверхпроводящее состояние. Решая уравнение (5) в отношении t_c , получим:

$$t_c = \frac{L_1 + L_2}{R_1 + R_2} \ln \frac{i_c}{i_0}. \quad (6)$$

Располагая значениями t_n и t_c , определяем частоту релаксационных колебаний:

$$f = \frac{1}{t_n + t_c} = \frac{1}{L_1 + L_2} \left[\frac{1}{R_2} \cdot \ln \frac{i_{\pi} - i_0}{i_{\pi} - i_c} + \frac{1}{R_1 + R_2} \cdot \ln \frac{i_c}{i_0} \right]^{-1}. \quad (7)$$

В таблице приведены экспериментальные f_y и расчетные f_{δ} значения частоты ГРК на сверхпроводнике. Параметры ГРК и f_y взяты из работы [5]: $T = 40,2 \text{ K}$; $i_c = 0,183 \text{ a}$; $i_0 = 0,083 \text{ a}$; $R_f = 0,53 \text{ Ом}$; $R_2 = 0,032 \text{ Ом}$; $L_1 + L_2 = 2,28 \cdot 10^{-7} \text{ Гн}$; f_p вычислены по формуле (7). Из таблицы видно, что результаты удовлетворительно согласуются с экспериментом.

i_f	a	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
f_y	кГц	160	290	380	530	630	720	800
f_{δ}	кГц	212	358	459	540	636	720	798

ВЫВОДЫ

Полученное выражение позволяет сделать выводы в отношении частоты релаксационных колебаний:

- частота тем больше, чем меньше постоянные времени $\frac{L_1 + L_2}{R_1 + R_2}$ и $\frac{L_1 + L_2}{R_2}$;
- частота тем больше, чем выше ток питания i_{π} ;
- частота тем больше, чем меньше разность между токами i_c и i_0 .

ЛИТЕРАТУРА

1. В.А. Рахубовский. Генераторы релаксационных колебаний на сверхпроводниках // ВАНТ. Серия

«Вакуум, чистые материалы, сверхпроводники», 2007, № 4, с. 75-78.

2. Ю.И. Неймарк. Метод точечных отображений в теории нелинейных колебаний. М.: «Наука», 1972, с 53-56.

3. А.А. Андронов, А.А. Витт, С.Э. Хайкин. Теория колебаний. М.: «Наука», 1981, с. 268-277.

4. С.Г. Гинзбург. Методы решения задач по переходным процессам в электрических цепях. М.: «Высшая школа», 1967, с. 129-199.

5. K. Enpuku, T. Kisu, K. Yoshida. Relaxation oscillator using hysteretic current-voltage characteristics of YBaCuO thin strips // IEEE Transactions on Magnetics. 1991, v. 27, № 2, part 4, p. 3058-3061.

Статья поступила в редакцию 20.12.2008 г.

ПРО ЧАСТОТУ КОЛІВАНЬ РЕЛАКСАЦІЙ ГЕНЕРАТОРА НА НАДПРОВІДНИКУ

В.А. Рахубовський

Отримано рівняння частоти релаксационних коливань генератора на надпровіднику залежно від параметрів схеми та величини струму живлення. Проведено порівняння розрахункових значень частоти з експериментальними.

FREQUENCY OF RELAXATION OSCILLATIONS OF GENERATOR WITH THE SUPERCONDUCTOR

V.A. Rukhubovsky

An equation for the frequency of the relaxation oscillations at the superconductor-based generator has been derived depending on the circuit parameters and supply current value. The calculated and experimentally obtained frequency values have been compared.