

ГЕНЕРАТОРЫ РЕЛАКСАЦИОННЫХ КОЛЕБАНИЙ НА СВЕРХПРОВОДНИКАХ

В.А.Рахубовский

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

Рассмотрены генераторы релаксационных колебаний (ГРК), в которых в качестве активных элементов используются плёночные и проволочные сверхпроводники, туннельные переходы джозефсона, наномостики, ПТ-СКВИДЫ, криотроны. Обобщены результаты исследований и представлены сравнительные характеристики ГРК, построенных из различных сверхпроводящих материалов. Отмечены возможности использования ГРК в качестве измерительных устройств в исследованиях при низких температурах.

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что вольт-амперные характеристики (ВАХ) сверхпроводника при переходе его из сверхпроводящего состояния в резистивное состояние и обратно являются гистерезисными. Используя эту особенность ВАХ сверхпроводника, были созданы генераторы релаксационных колебаний (ГРК) [1-3]. ГРК состоит из активного элемента (АЭ), к которому подключена параллельно или последовательно внешняя RL -цепь. АЭ переключается из сверхпроводящего состояния в резистивное и обратно под действием тока, протекающего через него. В таком ГРК в качестве АЭ используется плёночный или проволочный сверхпроводник, туннельный переход джозефсона (ТПД), наномостик, ПТ-СКВИД. Сверхпроводник может также переключаться из сверхпроводящего состояния в резистивное и обратно под действием суммарного магнитного поля, создаваемого током, протекающим в управляющей цепи сверхпроводника, и током, протекающим непосредственно через этот сверхпроводник. В этом случае в качестве АЭ используется криотрон (плёночный, проволочный) [4-5]. ГРК представляет собой цепочку из последовательно соединённых криотронных каскадов, охваченных обратной связью.

1. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ И СХЕМЫ ГРК

Принцип действия ГРК основывается на релаксационном процессе, имеющем место при переходе сверхпроводника из сверхпроводящего состояния в резистивное и обратно. Известны следующие схемные решения ГРК на сверхпроводниках: параллельная и последовательная схемы, кольцевые схемы на криотронах.

На рис. 1 приведена параллельная схема ГРК, в котором в качестве АЭ используется сверхпроводник I. ГРК запитывается от источника постоянного тока I_n . При подаче I_n на вход схемы ток разветвляется в ветвях I и II обратно пропорционально их индуктивностям. Так как индуктивность ветви I, содержащей сверхпроводник, много меньше индуктивности ветви, содержащей RL -цепь, то I_n практически весь начинает протекать в ветви I.

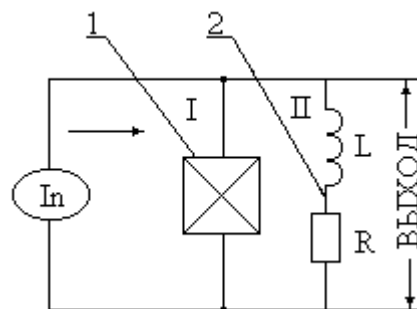


Рис. 1. Принципиальная параллельная схема ГРК: 1 – сверхпроводник; 2 – RL -цепь

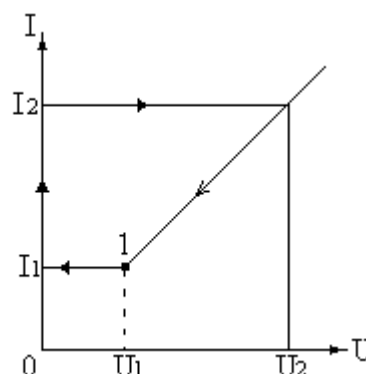


Рис. 2. Гистерезисная ВАХ сверхпроводника

При достижении в ветви I значения I_2 (см. рис. 2) сверхпроводник резко переключается из сверхпроводящего состояния в резистивное, и I_n перебрасывается в RL -цепь. При уменьшении тока в ветви I до значения I_1 сверхпроводник переходит вновь в сверхпроводящее состояние, и ток из ветви II перебрасывается в ветвь I. Далее процесс повторяется. Частота ГРК определяется из уравнения:

$$F = \frac{R}{L} \left[\ln \frac{I_n - I_1}{I_n - I_2} \right]^{-1}, \quad (1)$$

где R, L – соответственно сопротивление и индуктивность RL -цепи; I_1, I_2 – минимальный и максимальный критический ток сверхпроводника.

Анализ показывает, что колебания существуют при изменении I_n в диапазоне:

$$I_2 < I_n < \left(1 + \frac{R_N}{R}\right) \cdot I_1, \quad (2)$$

где R_N - сопротивление сверхпроводника в точке 1 на ВАХ (см. рис. 2).

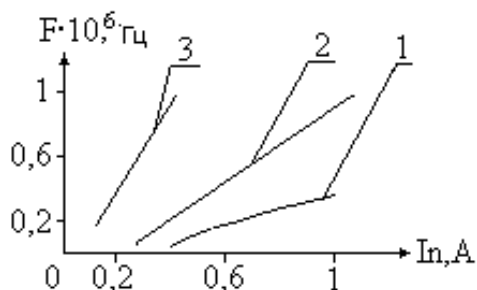


Рис. 3. Частотно-токовые характеристики ГРК: 1 - $T=4,2$ К; 2 - $T=40$ К; 3 - $T=50$ К

На рис. 3 приведена зависимость $F = f(I_n)_T$ для ГРК, в котором в качестве АЭ используется плёнка из сверхпроводника $YBaCuO$ [3].

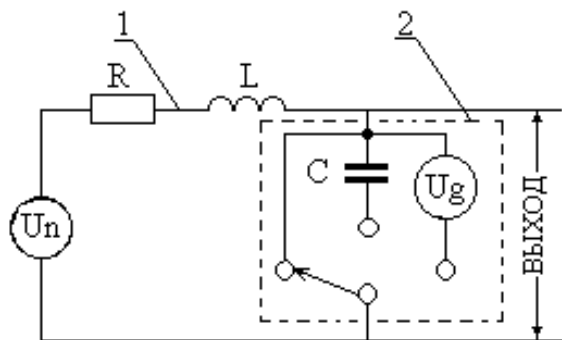


Рис. 4. Принципиальная последовательная схема ГРК: 1 - RL -цепь; 2 - ТПД, представленный эквивалентной схемой

На рис. 4 приведена последовательная схема ГРК, в котором в качестве АЭ используется ТПД. ГРК запитывается от источника постоянного напряжения U_n .

Как видно из рис. 4 и 5, ТПД представляет собой: короткозамкнутую цепь, когда находится в сверхпроводящем состоянии 1 (при этом через ТПД протекает ток квазичастиц, и напряжение на переходе равно нулю); батарею с напряжением U_g , когда находится в состоянии 3 (при этом через ТПД протекает ток нормальных электронов, и напряжение на переходе равно U_g); ёмкость C в фазах переключений 2 и 4. При подаче U_n на вход схемы ток нарастает с постоянной времени $\tau_n = \frac{L}{R}$, и при достижении током значения I_c напряжение на ТПД устанавливается скачком постоянной величины U_g . ТПД переключается из состояния 1 в состояние 3. При

этом ёмкость C заряжается до напряжения U_g . Затем ток через ТПД уменьшается с постоянной времени τ_n , пока не достигнет нулевого значения. ТПД переключается из состояния 3 в состояние 1 за счет разряда ёмкости C через RL -цепь. Далее процесс повторяется. Частота ГРК определяется из уравнения:

$$F = \frac{R}{L} \left[\ln \frac{1 + A/(1-x)}{1 - A/x} \right]^{-1}, \quad (3)$$

где $A = \frac{RI_c}{U_g}$; $x = \frac{U_n}{U_g}$; I_c - критический ток ТПД; U_g - напряжение энергетической щели.

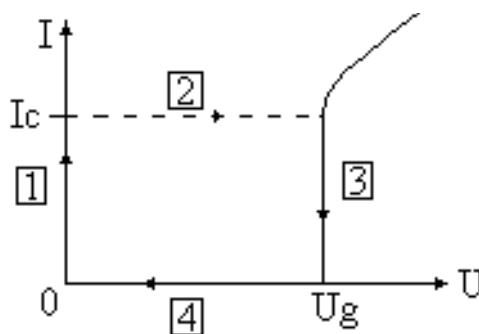


Рис. 5. Гистерезисная ВАХ ТПД

В ряде случаев на гистерезисной ВАХ ТПД возникает область отрицательного дифференциального сопротивления (ОДС) [6,7], приводящая к возможности быстрых переключений системы между двумя квазистационарными состояниями и установлению устойчивых релаксационных колебаний.

ГРК на криотронах (рис. 6) представляет собой кольцевую схему, состоящую из трёх идентичных криотронных каскадов (I - III), соединённых таким образом, что выход одного каскада подключается ко входу следующего каскада, а выход последнего каскада подключается ко входу первого со 180° сдвигом по фазе. ГРК запитывается от источника постоянного тока I_n . При подаче на вход схемы I_n по ней пробегает волна переброса токов в ветвях каскадов, в результате чего на выходе ГРК возникают колебания. Частота ГРК определяется из уравнения:

$$F = \frac{R}{4nL} \cdot [\ln B]^{-1}, \quad (4)$$

где $\frac{L}{R}$ - постоянная времени криотрона;

n - число каскадов ГРК; B - величина, определяемая I_n и параметрами криотрона [4,8]. Колебания существуют при изменении I_n в диапазоне: $I_{ky} < I_n < 2,84I_{ky}$, где I_{ky} - критический управляющий ток криотрона.

На рис. 7 приведена зависимость $F = f(T)_{I_n}$ для трехкаскадного ГРК, построенного из проволочных свинцово-оловянных криотронов [5]

Параметры	1	2	3	4
D_q , Гц	$(77...212) \cdot 10^3$	250...740	$(107...810) \cdot 10^3$	$(2...60) \cdot 10^6$
D_I , А	0,92...1,52	1,28...3,25	0,3...0,91	$(1,5...10) \cdot 10^{-3}$
S_I , Гц/А	$2,4 \cdot 10^5$	$5,33 \cdot 10^2$	$1,03 \cdot 10^6$	$1,07 \cdot 10^{10}$
S_T , Гц/К	-	-	$3,7 \cdot 10^4$	$2 \cdot 10^7$
T_p , К	4,2	4,2	40	9,5
Источник	[1]	*	[3]	[9]

Параметры	5	6	7
D_q , Гц	$(0,05...1) \cdot 10^3$	$(10...130) \cdot 10^3$	$(0,05...4) \cdot 10^3$
D_I , А	$(12...56) \cdot 10^{-6}$	0,8...1,23	0,14...0,27
S_I , Гц/А	$5,43 \cdot 10^7$	$4,2 \cdot 10^5$	$2,7 \cdot 10^4$
S_T , Гц/К	-	$9,3 \cdot 10^5$	$8 \cdot 10^4$
T_p , К	4,2	3,65	3,62
Источник	[7]	[4]	[10]

1-5 ГРК, построенные по параллельной схеме; 6-7 ГРК, построенные на базе криотронов; D_q - диапазон частот; D_I - диапазон изменения тока питания; $S_I = (\partial F / \partial I_n)_T$ - чувствительность к току питания; $S_T = (\partial F / \partial T)_I$ - чувствительность к температуре; T_p - рабочая температура. Величины S_I , S_T получены при T_p и для середины частотного диапазона ГРК.

* Нами исследован в данной работе ГРК, построенный по параллельной схеме. В качестве АЭ использована проволока диаметром $2 \cdot 10^{-5}$ м из сверхпроводящего сплава НТ-50. $R_N = 200$ Ом. RL -цепь выполнена из медной проволоки диаметром $3,6 \cdot 10^{-4}$ м. $R = 4 \cdot 10^{-4}$ Ом; $L = 3,6 \cdot 10^{-7}$ г.

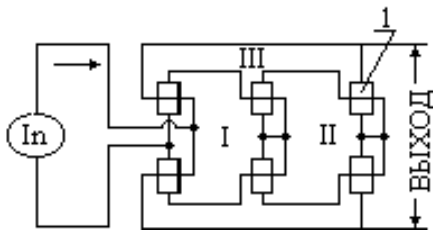


Рис. 6. Принципиальная схема трехкаскадного ГРК на криотронах: 1 – криотрон

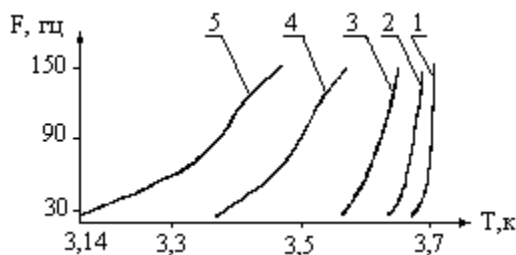


Рис. 7. Частотно-температурные характеристики ГРК: 1 - $I_n = 0,12$ А; 2 - $I_n = 0,19$ А; 3 - $I_n = 0,33$ А; 4 - $I_n = 0,65$ А; 5 - $I_n = 0,99$ А

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В таблице представлены основные характеристики экспериментально исследованных ГРК, АЭ которых построены из различных сверхпроводящих материалов. В качестве АЭ были использованы: плёнки из Pb , $YBaCuO$, проволока из сплава НТ-50, наномостик постоянной толщины из NbN , торцевой ТПД $Nb-Si-Nb$, плёночные и проволочные $Sn-Pb$ -криотроны. Частота ГРК задавалась величиной постоянного тока питания.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

ГРК на сверхпроводниках являются преобразователями постоянного тока питания в переменный. Частота ГРК, при заданных параметрах схемы, зависит от величины тока питания, температуры активного элемента и внешнего магнитного поля. Это даёт возможность использовать ГРК в качестве амперметра (в том числе, в качестве сверхпроводящего амперметра), термометра, оптического датчика, магнитометра, индикатора установления рабочей температуры и уровня хладагента в криостате [3,11-13]. Таким образом, ГРК является многофункциональным прибором, пригодным для использования в исследованиях, проводимых при низких температурах.

ЛИТЕРАТУРА

1. G.B.Rosenberger. A cryogenic oscillator // *IBM Journa.* 1959, p. 189-190.

2. F.L.Vernon, R.J.Pedersen. Relaxation oscillators in Josephson junctions // *J.Appl. Phys.* 1968, v. 39, N 6, p. 2661-2664.
3. K.Enpuku, T.Kisu, K.Yoshida. Relaxation oscillator using hysteretic current-voltage characteristics of YBaCuO thin strips // *IEEE Transactions on Magnetics.* 1991, v. 27, N 2, part 4, p. 3058-3061.
4. C.R.Smallman, A.E.Slade, M.L.Cohen. Thin film cryotrons // *Proc. IRE.* 1960, v. 48, N 9, p. 1562-1582.
5. Я.С.Кан, В.А.Рахубовский. *Использование проволочных криотронов в вычислительных и измерительных устройствах*: Препринт ХФТИ 74-29. Харьков, 1974, 22 с.
6. Y.Taur, P.L.Richards. Relaxation oscillator point contact Josephson junctions // *J. Appl. Phys.* 1975, v. 46, N 4, p. 1793-1797.
7. В.А.Ильин, Н.М.Масленников, И.А.Семи́н. Низкочастотные релаксационные колебания в системах, содержащих цепочки торцевых джозефсоновских переходов // *Радиотехника и электроника.* 1989, т. 34, № 6, с. 1282-1289.
8. С.Н.Рычков. Устойчивость автоколебаний в кольцевом криотронном автогенераторе с произвольным числом каскадов $n=3,4$ // *Известия вузов. Радиофизика.* 1975, т. 18, № 5, с. 775-777.
9. M.Mück, H.Rogalla, C.Heiden. Relaxation oscillator made of bridge-type josephson contacts // *Appl. Phys. A.* 1988, v. 46, N 2, p. 97-101.
10. В.А.Рахубовский. О некоторых характеристиках криотронного генератора релаксационных колебаний с управляемой частотой // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Вакуум, чистые материалы, сверхпроводники» (13).* 2003, № 5, с. 90-91.
11. Я.С.Кан, В.А.Рахубовский. Некоторые применения криотронных генераторов релаксационных колебаний для исследований при низких температурах // *Электронная техника. Серия 15 «Криогенная электроника».* 1971, в. 1(3), с. 72-78.
12. D.W.Gerdt, M.V.Moody, J.X.Paterson. A tunnel-junction relaxation oscillator: Application to thermometry // *J. Appl. Phys.* 1979, v. 50, N 5, p. 3542-3546.
13. Mück, C.Heiden. Simple DC-SQUID system based on a frequency modulated relaxation oscillator // *IEEE Transactions on Magnetics.* 1989, v. 25, N 2, p. 1151-1153.

ГЕНЕРАТОРИ РЕЛАКСАЦІЙНИХ КОЛИВАНЬ НА НАДПРОВІДНИКАХ

В.А. Рахубовський

Розглянуті генератори релаксаційних коливань (ГРК), в яких в якості активних елементів використовуються плівкові та проволочні надпровідники, тунельні переходи джозефсона, наномостки, ПТ-СКВІДИ, криотрони. Узагальнені результати досліджень та представлені порівнювальні характеристики ГРК, побудованих з різних надпровідних матеріалів. Відмічені можливості використання ГРК в якості вимірювальних приладів в дослідженнях при низьких температурах.

SUPERCONDUCTOR-BASED RELAXATION OSCILLATIONS GENERATORS

V.A. Rakhubovskiy

Relaxation oscillations generators (ROG) that use the film – type and wire – type superconductors, Josephson tunneling junctions, nanobridges, DS – SQUIDs, cryotrons as active elements have been considered. The results of research have been summarized and comparison characteristics of ROGs manufactured from different superconducting materials have been given. The opportunities for using ROGs as measuring devices for low temperature investigations have been pointed out.