

УДК 537.312.62

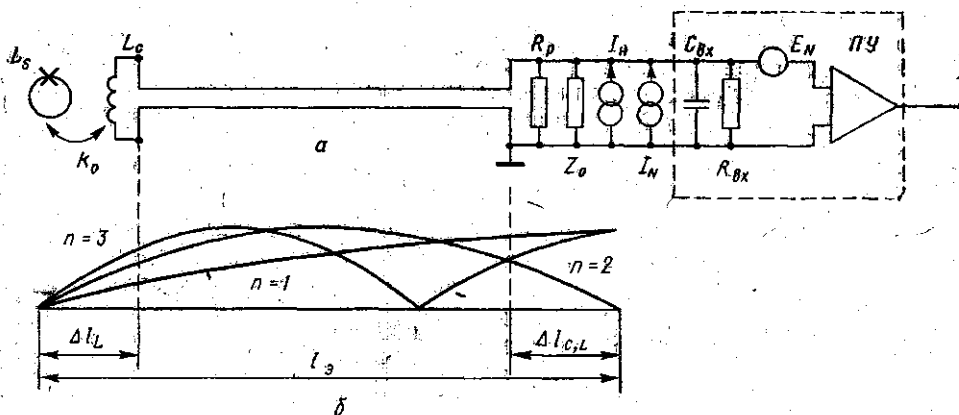
## РЕЗОНАТОР НА ОТРЕЗКЕ ЛИНИИ ПЕРЕДАЧИ В ВЫСОКОЧАСТОТНОМ СКВИДЕ

В. А. Крысанов

(кафедра физики колебаний)

Повышение частоты смещения ведет к возрастанию чувствительности и расширению полезной полосы пропускания флюксметра на одноконтактном гистерезисном сквиде [1—3]. В стандартной технике сквидов промежуточный контур включает в себя емкость отрезка ВЧ-кабеля, подключенного к неохлаждаемому предварительному усилителю (ПУ), что затрудняет использование частот выше 30 МГц. Эффективная шумовая температура  $T_k$  и затухание такого контура возрастают с повышением резонансной частоты [4], ограничивая энергетическое разрешение прибора  $\delta\epsilon$  уровнем  $\sim 10^{-28}$  Дж/Гц, что достаточно, однако, для большинства применений сквидов.

В данной работе предлагается использовать в качестве контура сквида резонатор на отрезке линии передачи с сосредоточенными элементами на концах. Это позволяет существенно повысить рабочую частоту прибора, содержащего упомянутый выше отрезок кабеля. Такое схемное решение и приводимые ниже расчетные соотношения могут быть использованы в случае применения криогенного ПУ на ультравысоких частотах смещения, для которых затруднена реализация сосредоточенных контуров, а также при необходимости тепловой [3] или механической [5] развязки криогенных датчика и ПУ.



Резонатор на линии передачи. *a* — Схема включения;  $L_s$  — индуктивность кольца сквида,  $L_c$  — индуктивность сосредоточенной катушки связи;  $k_0$  — коэффициент связи между  $L_c$  и  $L_s$ ;  $R_p$  — приведенное сопротивление потерь резонатора,  $R_{0x}$  и  $C_{0x}$  — активная и емкостная составляющие входного импеданса предусилителя;  $Z_0$  — реактивный элемент, предназначенный для изменения частоты резонанса;  $E_N$  — эквивалентная шумовая эдс предусилителя;  $I_N$  — суммарный ток, обусловленный тепловым шумом резонатора и токовым шумом предусилителя,  $I_N$  — ток ВЧ-смещения.  
*b* — Эпюры распределений амплитуд напряжения по длине резонатора

Схема составного резонатора представлена на рисунке, *a*. Из теории длинных линий известно, что распределение амплитуд напряжений и токов по длине линии можно получить, заменив реактивные элементы

на концах короткими ( $< \lambda/4$ ) ее отрезками с длинами  $\Delta l_L$ ,  $\Delta l_C$ . По данному распределению определяются соответствующие коэффициенты включения. Номер моды колебаний  $n$  может быть определен как число четвертьволновых ( $\lambda/4$ ) отрезков, укладываемых на электрической длине резонатора  $l_3$ . Нечетные  $n$  реализуются при малой индуктивной или емкостной проводимости  $Z_0$ , четные — при большой проводимости (значительная емкость, малая индуктивность  $L_0$ ). Использование промежуточных значений реактивности  $Z_0$  позволяет осуществлять широкодиапазонную перестройку частоты резонанса. Эпюры распределений напряжений для  $n=1, 2, 3$  приведены на рисунке, б.

На входных зажимах ПУ резонатор представляется эквивалентным контуром  $L_3 C_3$ , для которого справедливо соотношение [6]

$$\rho_3 \equiv (L_3/C_3)^{1/2} = 4\rho_n / (\pi n), \quad (1)$$

где  $\rho_n$  — волновое сопротивление линии.

Крутизна преобразования  $\Gamma_\Phi$  вариации магнитного потока в колеце в приращение амплитуды напряжения на входе ПУ может быть рассчитана двумя методами. Прямой метод состоит в вычислении ВЧ-напряжения на  $L_c$  и пересчете его трансформации на входе ПУ через коэффициенты включения. Этот метод позволяет перейти к стандартной форме выражения для  $\Gamma_\Phi$ :

$$\Gamma_\Phi = (1-\alpha) (\rho_3 \omega / L_c)^{1/2} / k_s, \quad (2)$$

где  $\alpha$  — наклон плато [4],  $k_s$  — эквивалентный коэффициент связи  $L_3$  с  $L_c$ , определяемый соотношением

$$k_s^2 = k_0^2 [4 / (\pi n)] L_c \omega / \rho_n. \quad (3)$$

Данный метод неудобен для практических расчетов, так как, в частности, условие применимости соотношений (1), (3),  $\Delta l_C, \Delta l_L \ll \lambda/4$ , как правило, не выполняется. Второй, формализованный метод прогнозирования  $\Gamma_\Phi$  состоит в использовании значений параметров в (2), измеренных по соответствующим методикам.

Выражение для  $\delta\varepsilon$ , оптимизированное по  $k_s$ , имеет вид

$$\delta\varepsilon = \alpha j_c (S_E S_I)^{1/2} / [4(1-\alpha)^2 f]. \quad (4)$$

Здесь  $f = \omega / (2\pi)$ ;  $S_E(f)$ ,  $S_I(f)$  — спектральные плотности источников  $E_N$  и  $I_N$  в предположении их некоррелированности;  $j_c$  — параметр [4], характеризующий диссипацию энергии в криогенном датчике. Выражение (4) совпадает с аналогичным в работе [4] при введении температуры  $T_K$ :

$$T_K = S_I \rho_3 Q / (4\kappa), \quad (5)$$

где  $Q$  — добротность контура,  $\kappa$  — постоянная Больцмана.

Для оптимального коэффициента связи  $k_{opt}$  и эффективной добротности контура  $Q_{eff}$  использовались соотношения

$$k_{opt}^2 = (\pi/4) \alpha j_c \rho_3 (S_I S_E)^{1/2}, \quad Q_{eff} = \alpha j_c / (4k_s^2), \quad (6)$$

отличающиеся от аналогичных в [4] на коэффициент 2, появившийся в результате уточнения формулы для длины плато  $l_{step}$ . Выражение для  $Q_{eff}$  в работе [1] совпадает с (6) в частном случае  $j_c = 2$ , справедливом при  $L_s I_0 = \Phi_0$  ( $I_0$  — критический ток контакта,  $\Phi_0$  — квант магнитного потока).

Основу флюксметра составил криогенный датчик циммермановского типа с  $L_s = 0,4$  нГ,  $I_0 = 6$  мкА при 7 К и сопротивлением контакта 0,7 Ом, изготовленный Б. В. Васильевым. В резонаторе использовался отрезок кабеля РК-75-1-22 длиной 0,9 м. Входной каскад ПУ имел коэф-

Фигурный коэффициент усиления по напряжению  $K_1=3$ . В нем использовались транзистор КТ312 и сменные контуры в нагрузке. Пропускная емкость транзистора обусловила зависимость добротности резонатора от расстройки нагрузочного контура. Указанное свойство схемы определило выбор тока  $I_N$  для характеристики шума контура, оно учитывалось при измерении  $S_f$  и настройке прибора. Основное высокочастотное усиление в схеме обеспечивалось специально изготовленным широкополосным усилителем или селективным микровольтметром ВН15231 в режиме преобразования частоты.

| $n$ | $f$ , МГц | $\rho_3$ , Ом | $Q_0$ | $R_{вх}$ , кОм | $S_E \cdot 10^{16}$ , В <sup>2</sup> /Гц | $S_f \cdot 10^{24}$ , А <sup>2</sup> /Гц | $\alpha$ | $j_c$ | $k_{opt}$ | $k_3$ | $\Delta U$ , мкВ | $\delta_{\Sigma} \cdot 10^{20}$ , Дж/Гц | $\delta_{\Sigma} \cdot 10^{20}$ , Дж/Гц | $\delta_{\Sigma \text{эксп}} \cdot 10^{20}$ , Дж/Гц |
|-----|-----------|---------------|-------|----------------|--|--|----------|-------|-----------|-------|------------------|---|---|---|
| 1   | 39        | 99            | 49    | 35             | 4,8                                      | 2,7                                      | 0,38     | 1,1   | 0,15      | 0,20  | 21               | 2,3                                     | 2,6                                     | 1,1   |
| 2   | 76        | 12            | 68    | 10             | 4,0                                      | 21                                       | 0,37     | 1,3   | 0,10      | 0,17  | 12               | 3,9                                     | 5,4                                     | 1,7   |
| 3   | 103       | 32            | 45    | 6              | 4,0                                      | 12                                       | 0,41     | 1,2   | 0,15      | 0,22  | 11               | 2,3                                     | 3,4                                     | 1,6   |

В таблице сведены результаты испытаний флюксметра в трех режимах ( $L_0=90$  нГ для  $n=2$ ) и результаты предварительных расчетов. Оценки  $R_{вх}$  соответствуют величинам добротности резонатора  $Q_0$ , измеренным при  $K_1 \approx 0,1$  в отсутствие криогенного датчика. Для определения  $\rho_3$  к контуру подключался калиброванный конденсатор. Расчетные значения  $\delta_{\Sigma}$  соответствуют использованным значениям  $k_3$ , выбранным из условия  $k_3^2 Q_0 \approx 2$ . Заметное различие между  $k_{opt}$  и  $k_3$  связано с заниженными экспериментальными значениями  $j_c$  — параметра, вносящего основную погрешность в прогноз чувствительности. В таблице  $\Delta U$  — реализованный размах сигнальной характеристики сквида (амплитудное значение на входе ПУ). Из измерений напряжений сигнала и спектральной плотности шума на частоте 1 кГц определялось значение порогового магнитного потока  $\Delta \Phi$  в единичной полосе частот. Измерения проводились на выходе линейного детектора в рабочей точке, соответствующей середине линейного участка треугольной сигнальной характеристики сквида. Величина  $\delta_{\Sigma \text{эксп}}$  определялась по формуле  $\delta_{\Sigma \text{эксп}} = (\delta \Phi)^2 / (2L_s)$  с точностью  $\sim 25\%$ . Отличие  $\delta_{\Sigma \text{эксп}}$  от  $\delta_{\Sigma}$  может быть объяснено также помехами электромагнитного и вибрационного происхождения.

Таким образом, в соответствии с соотношениями (1), (4), (5), повышению чувствительности флюксметра препятствует уменьшение сопротивления  $\rho_3$  с увеличением частоты накачки ( $T_K \approx 300$  К для  $n=1 \div 3$ ). Прогнозируемые значения  $\delta_{\Sigma}$  для стандартной схемы использования отрезка кабеля с параметрами  $f=20$  МГц,  $\rho_3=60$  Ом,  $Q_0=150$  и, например, для режима  $n=1$  отличаются незначительно. Это обусловлено главным образом относительно малой добротностью составного резонатора. С другой стороны, снижение этой добротности приводит к дополнительному расширению полосы рабочих частот прибора [2].

Автор выражает признательность Б. В. Васильеву, О. В. Снигиреву, В. Н. Руденко за ценные консультации и внимание к работе.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Кларк Дж. В кн.: Слабая сверхпроводимость. Пер. с англ. под ред. В. В. Шмидта. М.: Мир, 1980, с. 7. [2] Данилов В. В., Лихарев К. К. Радиотехн. и электроника, 1980, 25, с. 1725. [3] Long A. P., Clark T. D., France R. J.,

УДК 537.525.1

### ФАКТОР ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРОНА В РАЗРЯДЕ НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ В ПАРАХ ЩЕЛОЧНЫХ МЕТАЛЛОВ

А. М. Девятов, Т. Н. Соловьев

(кафедра электроники)

Неослабный интерес к изучению плазмы щелочных металлов связан с ее применением в устройствах прямого преобразования тепловой энергии в электрическую (МГД-генераторы, термоэмиссионные преобразователи и др.). Одной из важных характеристик плазмы является фактор энергетических потерь электрона, определяющий такие основные параметры плазмы, как электронная температура и удельная электропроводность. Ранее фактор энергетических потерь электрона в парах щелочных металлов измерен Сугаварой и Ченом [1], которые исследовали положительный столб низковольтного дугового разряда в парах цезия при давлениях 0,006—0,08 Тор. Для определения экспериментального фактора энергетических потерь электрона они использовали известную формулу, связывающую электронную температуру с напряженностью продольного электрического поля [2]:

$$V_e = 0,63 \frac{\lambda_e E}{\sqrt{\kappa_e}}, \quad (1)$$

где  $\lambda_e$  — средняя длина свободного пробега электрона,  $\kappa_e$  — фактор энергетических потерь электрона, равный средней доле энергии, теряемой электроном при одном соударении. Нами использовано это же соотношение в разряде в парах натрия, калия, рубидия и цезия в условиях предыдущего эксперимента [3] (таблица).

| Элемент           | $p \cdot 10^3$ , Тор | $V_e$ , эВ | $E$ , В/см |
|-------------------|----------------------|------------|------------|
| Натрий . . . . .  | 2—22                 | 0,6—1,5    | 0,3—1,4    |
| Калий . . . . .   | 0,6—7,6              | 0,5—1,8    | 0,2—0,7    |
| Рубидий . . . . . | 0,7—4,7              | 0,5—1,3    | 0,2—0,6    |
| Цезий . . . . .   | 0,4—1,1              | 0,6—1,3    | 0,2—0,3    |

Для нахождения средней длины свободного пробега электрона мы пользовались экспериментальными величинами полного сечения рассеяния электронов на атомах калия, рубидия, цезия [4] и натрия [5]. Найденные по формуле (1) величины фактора энергетических потерь представлены на рисунке темными точками.

С другой стороны, как это сделано в [1], принимая во внимание упругие и неупругие удары первого и второго родов электронов с атомами и ионами, фактор энергетических потерь можно рассчитать. Подробный анализ баланса энергии электронов, проведенный одним из нас