

УДК 534.231.1

В. И. ПАНОВ, В. Г. ПЕТНИКОВ

## ПОВЫШЕНИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ЕМКОСТНЫХ ДАТЧИКОВ МАЛЫХ СМЕЩЕНИЙ

Рассмотрена возможность создания емкостных датчиков малых механических колебаний на основе сверхпроводящих резонаторов чувствительностью  $\sim 10^{-18}$  см/Гц<sup>1/2</sup>, работающих по способу преобразования частоты вверх. Приведены формулы динамического и силового воздействия такого датчика на механический осциллятор. Показано, что применение сверхпроводящих резонаторов с высокой электрической добротностью позволяет использовать свойства систем с большим временем релаксации в емкостных датчиках.

Увеличение чувствительности в опытах, где обнаружение воздействия сводится к регистрации малых механических колебаний, связано с созданием более чувствительных датчиков смещений. Наибольшей чувствительностью среди радиотехнических устройств, преобразующих механические перемещения в электрические сигналы, обладают так называемые емкостные датчики [1]. Пластины электрического конденсатора, изменение расстояния между которыми желательно измерить, вместе с индуктивностью образуют электрический контур — дискриминатор, в котором возбуждаются колебания с помощью дополнительного автогенератора. Изменение  $d$  приводит к изменению амплитуды или фазы выходного сигнала в зависимости от того, совпадает ли частота автогенератора со склоном амплитудно-частотной или фазово-частотной кривой электрического контура. Это изменение регистрируется несложным радиотехническим устройством.

Существующие радиотехнические датчики позволяют измерять амплитуду периодических колебаний  $\sim 3 \cdot 10^{-14}$  см при времени измерения  $\tau = 1$  с [2].

Чувствительность таких датчиков можно существенно повысить, применяя в качестве дискриминатора сверхпроводящие резонаторы, электрическая добротность  $Q_3$  которых может достигать величины  $\sim 10^{11}$  [3]. Однако при  $Q_3 > \frac{\omega_0}{\Omega_{\text{мех}}}$  ( $\omega_0$  — частота электрического контура,  $\Omega_{\text{мех}}$  — частота механических колебаний) квазистационарный способ преобразования будет непригоден. В этом случае для регистрации малых колебаний можно использовать способ преобразования частоты вверх, при котором частоты резонатора  $\omega_0$ , накачки  $p$  и частота механических колебаний  $\Omega_{\text{мех}}$  связаны соотношением  $p = \omega_0 - \Omega_{\text{мех}}$ . Схе-

ма такого датчика показана на рисунке. Основным элементом схемы является резонатор с  $Q_3 \gg \frac{\omega_0}{\Omega_{\text{мех}}}$ , с эквивалентной индуктивностью  $L_3$  и емкостью  $C_3$ . Резонатор нагружен на емкость плоского конденсатора  $C$  ( $C \geq C_3$ ), одна из пластин которого жестко связана с массой  $m$  механического осциллятора. При отсутствии колебаний механического осциллятора колебания на частоте резонатора будут определяться тепловым шумом последнего и той частью шумов генератора накачки, которая попадает в полосу резонатора. Колебания механического осциллятора под действием силы  $F_0$  на частоте  $\Omega_{\text{мех}}$  приведут к появлению сигнала в контуре на комбинационной частоте  $p + \Omega_{\text{мех}}$ . Несложный расчет показывает, что при этом э. д. с. в контуре изменится на величину

$$\delta U_{\omega_2} = \frac{U_p \omega_0 Q_3}{4 \Omega_{\text{мех}}} \cdot \frac{x(\tau)}{d}, \quad (1)$$

где  $U_p$  — амплитуда накачки. Сравнивая (1) с э. д. с. теплового шума в резонаторе, получим минимальное значение амплитуды смещений, которое можно зарегистрировать без учета обратного влияния датчика на осциллятор за время  $\tau$ :

$$[x(\tau)]_{\text{min}} = \xi \frac{2d}{U_{pk}} \left[ \frac{4kT}{\omega_0 C Q_3 \tau} \right]^{1/2} \quad (2)$$

Здесь  $U_{pk}$  — э. д. с. в контуре на частоте  $p$ ,  $\xi$  — параметр, зависящий от уровня достоверности обнаружения. Подставляя в (2) параметры  $d = 3 \cdot 10^{-4}$  см;  $U_{pk} = 10$  В;  $\omega_0 = 6 \cdot 10^9$  рад/с;  $C = 4$  пф;  $Q_3 = 10^9$ ;  $T = 4^\circ \text{K}$ ;  $\tau = 1$  с, получим  $[x(\tau)]_{\text{min}} = 2 \cdot 10^{-19}$  см.

В работах [4, 5] было показано, что емкостной датчик оказывает обратное динамическое влияние на механическую систему, которое проявляется в появлении дополнительного затухания или регенерации механического осциллятора. Аналогичный анализ показывает, что для рассмотренного способа преобразования величина дополнительного трения, вносимого датчиком в механическую систему, будет равна

$$H_3 = - \frac{C U_{pk}^2 Q_3}{4 d^2 \Omega_{\text{мех}}}, \quad (3)$$

что в  $Q_3 \frac{2 \Omega_{\text{мех}}}{\omega_0}$  раз меньше по сравнению с квазистатическим способом преобразования. Сравнивая (3) с величиной  $H_{\text{мех}}$ , можно вычислить минимальную э. д. с.  $U_{pk}$  в контуре, при котором в осцилляторе возникнет колебательная неустойчивость

$$U_{pk} = \sqrt{\frac{4 m d^3 \Omega_{\text{мех}}^2}{Q_{\text{мех}} Q_3 C}}, \quad (4)$$

где  $Q_{\text{мех}}$  — добротность осциллятора при  $U_k \rightarrow 0$ . Из (4) следует, что чем больше  $Q_3$ , тем при меньших  $U_{pk}$  возникнет колебательная неустойчивость.

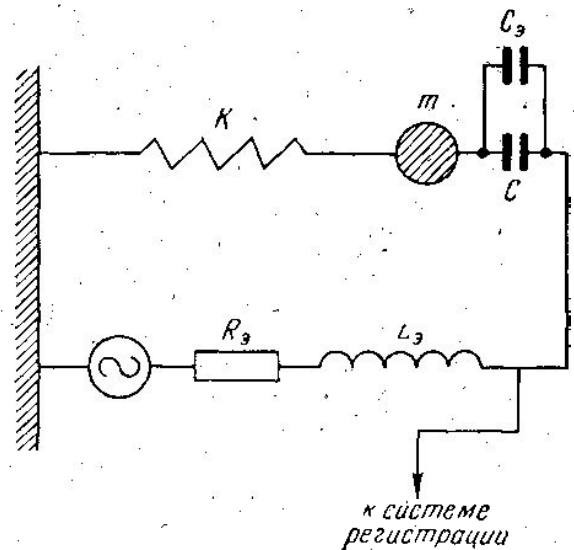


Схема емкостного датчика

Емкостные датчики оказывают обратное флуктуационное воздействие на механический осциллятор (1). Это воздействие обусловлено флуктуациями кулоновской силы притяжения между пластинами рабочей емкости, которые вызваны тепловым шумом резонатора. На частоте  $\Omega_{\text{мех}}$  спектральная составляющая флуктуационной силы возникает как комбинационная составляющая напряжения накачки  $U_p$  и шумовой э. д. с.  $U_{\omega_0 \text{ фл}}$ , накачанной в контур на частоте  $\omega_0$ .

$$F_{\Omega \text{ фл}} = \frac{\omega_0 C}{4\Omega_{\text{мех}} d} U_p U_{\omega_0 \text{ фл}} \quad (5)$$

Ее вариация зависит от соотношения между временем измерения  $\tau$  и временем электрической релаксации  $\tau_s^*$  резонатора.

$$\delta F_{\Omega \text{ фл}} = \frac{\omega_0 C}{4\Omega_{\text{мех}} d} U_p \delta U_{\omega_0 \text{ фл}}, \quad (6)$$

где

$$\delta U_{\omega_0 \text{ фл}} = \begin{cases} Q_s \frac{\tau}{\tau_s^*} \sqrt{\frac{2\kappa TR}{\tau}} & \text{при } \tau \ll \tau_s^*, \\ Q_s \sqrt{\frac{4\kappa TR}{\tau}} & \text{при } \tau \gg \tau_s^*. \end{cases}$$

Таким образом, одно из условий обнаружения силы  $F_0$ , действующей на механический осциллятор, можно записать в виде

$$F_0 > \delta F_{\Omega \text{ фл}}. \quad (7)$$

Кроме того, вариация э. д. с.  $\delta U_{\omega_0}$  (1), возникающая в контуре при изменении амплитуды механических колебаний на величину  $\Delta x(\tau) = \frac{F_0 \tau}{2\sqrt{2} m \Omega_{\text{мех}}}$ , должна превышать вариацию э. д. с. теплового шума в резонаторе.

Сравнивая эти два условия, легко показать, что существует оптимальная величина э. д. с. генератора накачки

$$[U]_{\text{опт}}^2 = \begin{cases} \frac{128 d^2 m \Omega_{\text{мех}}^3}{\omega_0^3 C \tau^2}, & \tau \ll \tau_s^*, \\ \frac{64 d^2 m \Omega_{\text{мех}}^3}{\omega_0^3 C \tau^2}, & \frac{\tau}{\tau_s^*}, \tau \gg \tau_s^* \end{cases} \quad (8)$$

и соответствующая этой э. д. с. минимальная обнаружимая амплитуда силы, действующая на осциллятор:

$$F_{0 \text{ min}} = \begin{cases} \frac{1}{\tau} \sqrt{\frac{8\sqrt{2} \kappa T m \Omega_{\text{мех}}}{\omega_0}} \sqrt{\frac{\tau}{\tau_s^*}}; & \tau \ll \tau_s^*, \\ \frac{1}{\tau} \sqrt{\frac{16\sqrt{2} \kappa T m \Omega_{\text{мех}}}{\omega_0}}; & \tau \gg \tau_s^*. \end{cases} \quad (9)$$

Формулы (8) и (9) показывают, что применение сверхпроводящих резонаторов с большой  $Q_s$  в рассмотренном способе преобразования позволяет использовать свойства колебательных систем с большим  $\tau_s^*$  [1] в емкостных датчиках малых колебаний и, следовательно, сни-

мают принципиальные ограничения, накладываемые на минимально обнаружимую силу  $F_0$ , действующую на механический осциллятор.

Кроме того, в соответствии с (3) величина вносимого в механическую систему трения  $H_0$  оказывается в  $Q_0 \frac{2\Omega_{\text{мех}}}{\omega_0}$  раз меньше, чем при квазистатическом способе преобразования. В ряде случаев это дает возможность осуществить измерение без компенсации этого трения, что значительно упрощает экспериментальную схему.

Следует также отметить, что в рассматриваемых емкостных датчиках, где используется способ преобразования частоты вверх, существенно снижаются требования, предъявляемые к генератору накачки, так как основной вклад шумов в сигнал определяется той частью пьедестала спектральной линии генератора, которая попадает в полосу дискриминатора.

В качестве иллюстрации приведем ряд числовых оценок. Предположим, что обсуждаемые датчики используются в детекторе гравитационных волн типа Веберовского ( $m=10^4$  г  $\Omega_{\text{мех}}=10^4$  рад/с) и имеют параметры:  $C=4$  пф;  $\omega_0=10^{10}$  рад/с,  $d=10^{-3}$  см;  $T=4^\circ\text{K}$ ;  $\tau=1$  с. Тогда при  $Q_0=10^8$   $F_{\text{0min}}=11,5 \cdot 10^{-9}$  дин;  $U_{\text{опт}}=1,4 \cdot 10^{-7}$  В, а при  $Q_0=10^{11}$   $F_{\text{0min}}=1,8 \cdot 10^{-9}$  дин;  $U_{\text{опт}}=9 \cdot 10^{-7}$  В. Последние цифры соответствуют потоку гравитационного излучения  $t=5,2 \cdot 10^{-4}$  эрг/с·см<sup>2</sup>.

В заключение авторы выражают признательность В. Б. Брагинскому за плодотворное обсуждение работы.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Брагинский В. Б. Физические эксперименты с пробными телами. М., 1970.
2. Брагинский В. Б., Митрофанов В. П., Руденко В. Н., Хорев А. А. «Приборы и техника эксперимента», № 4, 141, 1971.
3. Tugueaue J. P., Nguen Tuog Viet. Appl. Phys. Lett., 16, 333, 1970.
4. Брагинский В. Б., Минакова И. И. «Вестн. Моск. ун-та», физ., астрон., № 1, 69, 1964.
5. Шапиро В. Е. ЖЭТФ, 55, 577, 1968.

Поступила в редакцию  
21.6 1973 г.

Кафедра  
физики колебаний