

1. Сорокин Г. П., Идричан Г. Х. // Там же. 1975. Т. 11. № 2. С. 351—352.
 2. Иоффе А. Ф. // ФТТ. 1959. № 1. С. 60—161.

3. Сорокин Г. А. // Журнал физической химии. 1966. Т. XL. № 4. С. 838—841.

Статья поступила в редакцию 5 мая 2007 г.

Research of thermal characteristics for the copper chalcogenide

G. S. Khagba

Abkhazian State University, Sukhum, Abkhazia

The research of thermal characteristics for the copper selenide ($Cu_{2-x}Se$) was carried out a wide area of temperatures: heat conductivity has been studied by a stationary method, electroconductivity and a factor of thermoelectromotive have been studied by a compensatory method. Separate mechanisms of carry of heat have been investigated.

УДК 534.17: 621.396.59

Резонансная колебательная система за порогом чувствительности средств обнаружения информационных сигналов

С. И. Коршаковский

Московский государственный институт радиотехники, электроники и автоматики
(Технический университет), Россия

Выявлены новые свойства резонансных колебательных систем, позволяющие путем использования в них затухающих переходных процессов и подбора режимов их работы выделить полезный сигнал, который может быть ниже порога чувствительности средства его обнаружения, а также увеличить вдвое его чувствительность. В качестве примеров в работе рассмотрены маятник крутильных колебаний, механический осциллятор и электромагнитный контур радиоприемного устройства. Обсуждаются возможности прикладного использования полученных результатов.

Любой информационный сигнал — механический, электромагнитный или какой-то другой природы — несет в себе определенный запас энергии соответствующего вида. Существующие критерии обнаружения этих сигналов основаны на принципе достаточности этой энергии. Например, в работе [1] при рассмотрении механического осциллятора условием обнаружения механической силы $F(t)$ при устранении нетепловых флуктуаций является следующее неравенство в классическом приближении:

$$F(t)_{\min} \geq \sqrt{4kTH\Delta f},$$

где T — абсолютная температура;

H — коэффициент трения;

Δf — полоса частот.

Это выражение можно считать предельным порогом чувствительности устройства. Энергетический спектр шумовой ЭДС в теории радиосвязи определяется формулой Найквиста, а ее средний квадрат (дисперсия) зависит от энергии kT [2]:

$E_{noise}^2 = 4kTR\Delta f$, где R — сопротивление эквивалентного шумового генератора, например сопротивление излучения. Следует иметь в виду, что всякое внешнее воздействие на систему, погруженную во внешнюю среду, приводит к диссипации энергии. Этот процесс сопровождается флуктуациями физических величин, характеризующих равновесную систему (или ее отдельные части), причем между флуктуациями и диссипативными свойствами системы существует связь, устанавливаемая флуктуационно-диссипационной теоремой (ФДТ) [3].

Одними из важнейших свойств любых измерительных средств, радиоприемных и других устройств, содержащих резонансные колебательные системы, являются порог чувствительности и чувствительность, обусловленные действием на них различных факторов как внутреннего, так и внешнего происхождения (силы трения, флуктуации, шумы и помехи и т. д.). Работа любой колебательной системы (КС) при достаточно высоком

уровне внешнего периодического воздействия на нее связана с принципом накопления энергии за счет так называемой резонансной раскачки (РР) [4]. Недостаток традиционных КС — невозможность в общем случае обнаружения с помощью них сверхмалых физических величин — меньших порога чувствительности соответствующего средства измерения. Исключением из этого могут быть какие-то частные случаи, например использование так называемого метода накопления для приема радиоволн [5]. Однако для получения эффективного результата необходимо наличие априорной информации, в частности, знание фазы полезного сигнала. В то же время интенсивные поиски решений проблемы априорной недостаточности даже на современном технологическом уровне до сих пор не привели к существенным положительным результатам. Проведенные в работе исследования динамических режимов работы колебательных систем в возбужденном состоянии позволяют надеяться, что измерение (обнаружение) информационного сигнала возможно за порогом чувствительности средства его обнаружения.

Идея метода: переходный процесс и режимы резонансного торможения

Пусть резонансная колебательная система, входящая в средство измерений с порогом чувствительности, выраженным физической величиной μ_{const} , приведена в возбужденное состояние путем принудительного внешнего воздействия, по окончании которого в ней начинается затухающий переходный процесс с огибающей $X_A(t) = X_0 \exp(-\delta t)$, где индекс "А" — амплитуда; δ — коэффициент затухания КС. При достаточно высокой добротности системы Q в ней возникают свободные затухающие колебания с периодом T . Будем считать, что в определенный момент времени $t = t_0$, когда рассматриваемая физическая величина в КС $X(t) > 0$ принимает амплитудное значение X_0 , ее фаза равна нулю. Пусть начиная с этого момента времени КС подвержена внешнему периодическому воздействию неизвестной физической величины $x(t)$, представляющей собой информационный сигнал, период которого также равен T , а начальная фаза ϑ . При этом форма огибающей процесса будет существенно зависеть от величины и начальной фазы сигнала $x(t)$. Устанавливая противофазные режимы работы КС ($\Delta\vartheta = \pi$), можно получить максимальное расхождение этих огибающих, выраженное разностью $\Delta X_A(t)$ при $t > t_0$. Вычитанием полученных таким образом сигналов можно исключить из дальнейшего процесса затухающие колебания $X(t)$, увеличить вдвое чувствительность устройства, а по величине этого расхождения, связанного с

характеристиками неизвестного сигнала, при соответствующим образом подобранных фазах $\vartheta_{1,2}$ определить его параметры.

Так как оба режима колебательной системы резонансные, и в обоих случаях при заданном условии $x_A < \mu_{\text{const}}$ колебания затухают, назовем эти режимы "режимами резонансного торможения" (РТ). На рис. 1 показаны ожидаемые огибающие $X_A(t)$ сигналов электромагнитного контура, используемого здесь лишь в качестве примера (шумы и помехи отсутствуют). В рассматриваемых режимах соответствующие кривые 2 и 3 симметричны относительно огибающей свободных затухающих колебаний 1. Огибающая в режиме РР представлена кривой 4. Характерно, что при некотором $t = t^*$ для $\vartheta = \vartheta_1$ (кривая 2) $X_A(t^*) = 0$, и с этого момента времени начинается режим РР. Рассмотрим некоторые частные случаи решения этой задачи с учетом их прикладной направленности.

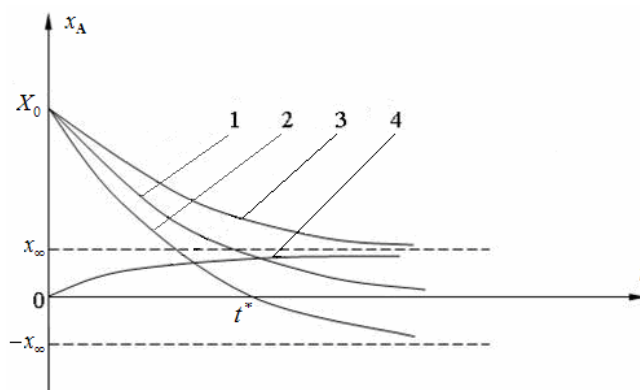


Рис. 1. Резонансные режимы работы колебательной системы:

1 — $x(t) = 0$; 2 — $\vartheta = \vartheta_1$; 3 — $\vartheta = \vartheta_2$;
4 — режим РР; x_∞ — амплитуда при $t \rightarrow \infty$

Маятник крутильных колебаний

Рассмотрим маятник крутильных колебаний с моментом инерции J и круговой частотой собственных колебаний ω_0 , в котором в силу специфики его применения существенны как сухое, так и вязкое трение. Такая колебательная система может быть использована, например, для измерения сверхмалой поперечной составляющей вектора тяги двигателя космического летательного аппарата [6] при решении ряда прикладных задач в плазменной технике [7] и в других областях. Пусть далее на рассматриваемое весовое устройство действует постоянный неизвестный момент внешних сил $x(t) = \mu$, а для учета действия сил сухого трения введем в уравнение колебаний момент этой силы, равный μ_{const} ($\mu_{\text{const}} > \mu$), определяющий порог чувствительности измерительного средства.

При внешнем воздействии на КС согласно ФДТ величина угла поворота маятника φ флуктуирует.

Однако на рассматриваемом этапе решения задачи целесообразно вначале выявить влияние только одного фактора — действия сил сухого трения, а флуктуациями моментов сил трения пренебречь. Такая колебательная система является нелинейной, и уравнение ее колебаний можно записать в виде

$$\ddot{\phi} + 2\delta\dot{\phi} + \mu_{\text{const}}\text{sign}\dot{\phi} + \omega_0^2\phi = \mu/J. \quad (1)$$

Если привести маятник в возбужденное состояние, а затем с помощью специального устройства (ключа) воздействовать на него измеряемым моментом при $\vartheta_{1,2} = \pi$ и 0 в течение каждого полупериода, то получим противофазные режимы РТ этой системы. Считая μ_{const} и μ постоянными в эти интервалы времени, слагаемое $\mu_{\text{const}}\text{sign}\dot{\phi}$ в уравнении (1) можно перенести в правую часть как константу, а само уравнение для рассматриваемых промежутков времени станет линейным и запишется в виде

$$\ddot{\phi} + 2\delta\dot{\phi} + \omega_0^2\phi = \mu(t)/J,$$

где $\mu(t) = -(\mu_{\text{const}} \pm \mu)\text{sign}\dot{\phi}$; знаки \pm соответствуют $\vartheta_{1,2} = \pi$ и 0 .

Такую колебательную систему для каждого полупериода следует определить как квазилинейную. Решение этого уравнения для огибающей процесса φ_n можно найти, решая последовательность задач Коши для каждого полупериода при $t = nT/2$, где $n = 1, 2, \dots$ — номер шага (полупериода), с начальными условиями для $n = 1$ — $\varphi(0) = \varphi_0$ и $\dot{\varphi}(0) = 0$:

$$\varphi_n^\pm = (-1)^{n-1} \frac{\mu_{\text{const}} \pm \mu}{k} (1 + e^{-\delta T/2}) \times \sum_{m=0}^{n-1} e^{-m\delta T/2} + (-1)^{n-1} \varphi_0 e^{-n\delta T/2}, \quad (2)$$

где $k = J\omega_0^2$ — коэффициент жесткости нити подвеса при кручении.

Определив разность $\Delta\varphi_n = \varphi_n^- - \varphi_n^+$, можно получить выражение для нахождения искомого момента

$$\mu = k\Delta\varphi_n [2(1 + e^{-\delta T/2}) \sum_{m=0}^{n-1} e^{-m\delta T/2}]^{-1}, \quad (3)$$

из которого видно, что его величина не зависит от принятого порога чувствительности.

Из формулы (3) легко получить выражение для оценки чувствительности измерительного средства: $S_b = \Delta\varphi_n / \Delta\mu$. Полагая, что измеряемый момент $\mu = M \gg \mu_{\text{const}}$ (третьим слагаемым в уравнении (1) можно пренебречь) и используя те же приемы, решение для огибающей в режиме РР при $M = \text{const}$ можно получить в виде

$$\varphi_n^* = (-1)^{n-1} \frac{M}{k} (1 + e^{-\delta T/2}) \sum_{m=0}^{n-1} e^{-m\delta T/2}.$$

Оценка чувствительности в этом режиме дает результат: $S_{rs} = \Delta\varphi_n^* / \Delta M$, откуда видно, что при РТ она вдвое выше, чем при РР.

Используя выражение (2), устанавливаем предельное число интервалов торможения n_0 , когда $\varphi_n \rightarrow 0$, определяющее границы применимости метода ($\delta T \ll 1, n \gg 1$):

$$n_0^\pm = -2 \ln [2(\mu_{\text{const}} \pm \mu)(1 + e^{-\delta T/2}) / (k\varphi_0\delta T)] / (\delta T).$$

Таким образом, использование переходного процесса для определения неизвестной величины μ возможно лишь при выполнении условия $n < n_0^\pm$, при нарушении которого величина $\Delta\varphi_n$ становится неопределенной ($\varphi_n^\pm \rightarrow 0$), и пренебречь влиянием флуктуационных помех уже нельзя.

На рис. 2—4 и в таблице представлены некоторые результаты проведенных исследований. Параметры системы: $J = 0,1 \text{ кгм}^2$; $k = 0,062 \text{ Нм}$; $\delta = 0,04 \text{ 1/с}$; $T = 8 \text{ с}$; $\mu_{\text{const}} = 16,5 \cdot 10^{-6} \text{ Нм}$; $S = 0,71 \text{ рад/Нм}$.

Начальные условия: $\varphi_0 = 0,1745 \text{ рад}$ (10°) и $\dot{\varphi}(0) = 0$.

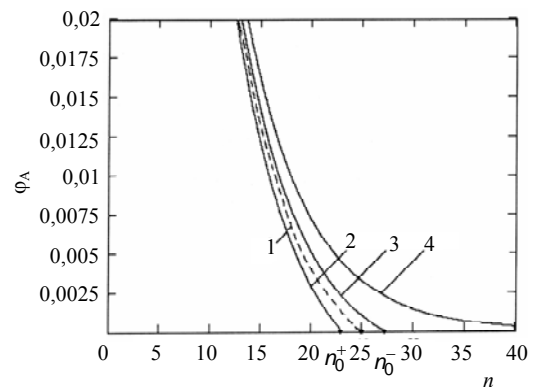


Рис. 2. Изменение амплитуды угла поворота маятника φ_A от числа интервалов торможения n при различных режимах:

1 — $\mu = 0$; 2 — $|\mu(t)| = \mu_{\text{const}} + \mu$; 3 — $|\mu(t)| = \mu_{\text{const}} - \mu$; 4 — $\mu(t) = 0$

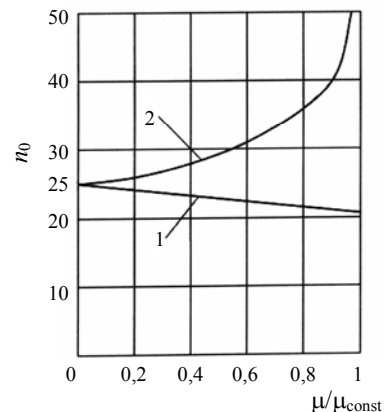


Рис. 3. Зависимость n_0 от μ/μ_{const} :

1 — $|\mu(t)| = \mu_{\text{const}} + \mu$; 2 — $|\mu(t)| = \mu_{\text{const}} - \mu$

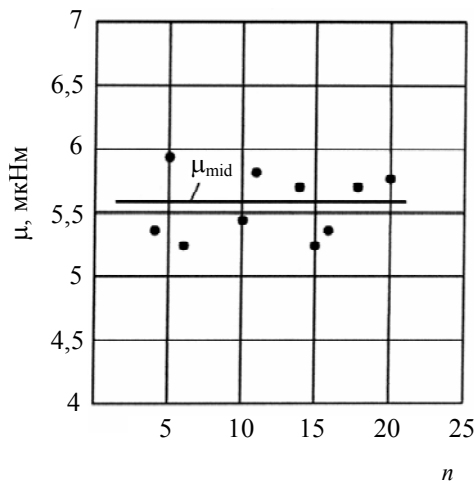


Рис. 4. Сравнение экспериментальных данных и результатов расчета μ при различных n

Экспериментальные данные и результаты расчета

n	$\varphi_n^-, \text{рад}$	$\varphi_n^+, \text{рад}$	$\Delta\varphi_n, \text{рад} \cdot 10^{-3}$	$\mu, \text{Нм} \cdot 10^{-6}$
<i>Эксперимент</i>				
1	—	—	—	—
5	-0,07723	-0,07590	-1,330	5,94
10	0,03344	0,03166	1,781	5,49
15	-0,01375	-0,01181	-1,948	5,27
20	0,005024	0,002770	2,254	5,78
$M_{\text{mid}} = \frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} M_i = 5,62 \text{ мкН} \cdot \text{м}$				
<i>Теория</i>				
1	-0,1483724	-0,1480343	-0,3381	$\mu = \mu_{\text{mid}}$
5	-0,0771911	-0,0759320	-1,2592	
10	0,0334675	0,0316426	1,8249	
15	-0,0138212	-0,0117420	-2,0792	
20	0,0049935	0,0028001	2,1934	

На рис. 2 даны характерные изменения амплитуды угла поворота $\varphi_A = |\varphi_n|$ от количества интервалов действия тормозящей силы n . Величина μ при расчете была принята равной $5,5 \cdot 10^{-6}$ Нм, что втрое меньше значения порога чувствительности. Зависимость n от относительного момента μ/μ_{const} показана на рис. 3. При сравнительно невысокой добротности системы ($Q = 9,8$) флуктуации углов φ были незначительными, что позволило провести необходимые измерения при относительной точности 10 %. Из рис. 4 и таблицы видно достаточно хорошее совпадение теории и эксперимента, а также независимость результата определения момента μ от числа интервалов торможения n и добротности системы Q .

Результаты проведенных исследований показали возможность измерений за порогом чувствительности устройства. Использование нового метода позволит увеличить вдвое его чувствительность, уменьшить продолжительность измерения (до одного—двух периодов колебаний), проводить измерения при неуспокоенной системе.

Электромагнитный контур радиоприемного устройства

Возможность обнаружения сверхслабых радиосигналов при высоком уровне шумов и помех — одна из важнейших задач современной радиотехники [2, 5]. Чтобы сформировать полезный гармонический сигнал, необходимо знать его круговую частоту ω , начальную фазу ϑ и амплитуду u_m . Решение этой задачи вновь будем искать через создание затухающих переходных процессов и противофазных режимов работы колебательной системы во входной цепи радиоприемного устройства (РПУ) — электромагнитного колебательного контура.

Для реализации режимов РТ введем во входную цепь РПУ точно такой же второй резонансный контур, а в каждый из получившихся каналов введем устройство для изменения фазы сигнала (фазовращатель). Приведем контуры в возбужденное состояние, например, путем подачи на них достаточно высокого напряжения U_0 , большего, чем среднеквадратичное напряжение шумов и помех $\bar{\xi}$. При этом в них возбуждаются свободные затухающие колебания $X(t) = U(t)$, ам-

плитуда которых U_A уменьшается по экспоненциальному закону $U_0 \exp(-\delta t)$. При подаче радиосигнала $x(t) + \xi(t)$ на их выходах появляются суммарные сигналы $S_{1,2}(t) = U(t) + x_{1,2}(t) + \xi_{1,2}(t)$.

Понятно, что в силу резонансных свойств контура радиосигнал $x(t) + \xi(t)$ усиливается, а внешнее воздействие на него сопровождается флуктуациями сигнала (ФДТ), но для простоты изложения здесь сохранены те же обозначения. При этом $x_A < \bar{\xi} \ll U_A$. Исследование режимов РТ проведем вначале в рамках идеальной модели — при отсутствии шумов и помех.

В работе [7] получено решение уравнения колебаний напряжения на конденсаторе контура $\ddot{u} + 2\delta\dot{u} + \omega_0^2 u = \omega_0^2 u_m \cos(\omega t + \vartheta)$ для начальных условий $u(0) = U_0$ и $\dot{u}(0) = 0$ при $\delta \ll \omega_0$:

$$u = (U_0 - U_m \sin \vartheta) e^{-\delta t} \cos(\omega' t + \varepsilon) / \cos \varepsilon + U_m \sin(\omega t + \vartheta), \quad (4)$$

где $\varepsilon = \text{arctg}(U_m \omega \cos \vartheta + U_m \delta \sin \vartheta - U_0 \delta) / [\omega'(U_0 - U_m \sin \vartheta)]$;

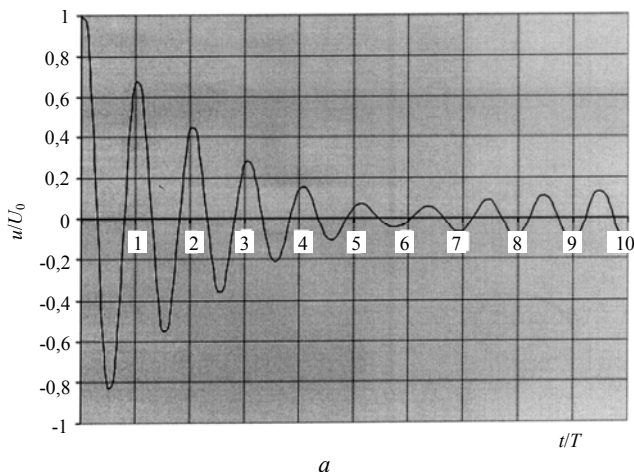
$$\omega' = (\omega_0^2 - \delta^2)^{1/2};$$

$$U_m = \omega_0^2 u_m / [(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\delta^2 \omega^2]^{1/2}.$$

В большинстве случаев величиной угла ε можно пренебречь. Например, при $Q = 100$ и $\vartheta_{1,2} = \pm\pi/2$ $\varepsilon \approx -0,005$ рад.

Заметим, что используемые начальные условия соответствуют классической задаче о переходном процессе, а полученное решение (4) — есть сумма свободной и принужденной составляющих процесса, которая при $\varepsilon = 0$, $\omega' = \omega$, $t = nT$, где $n = 0, 1, 2, \dots$, может быть представлена в комплексной форме

$$\hat{U} = \hat{U}_{fr} + \hat{U}_{com} = j(U_0 - U_m \sin \vartheta) e^{-\delta nT} + U_m e^{j\vartheta}. \quad (5)$$



Записав с помощью решения (4) при этих условиях разность радиосигналов $\Delta u = u_2 - u_1$ для двух режимов РТ с фазами ϑ_1 и ϑ_2 , соответственно, и исследовав полученную таким образом функцию на экстремум, найдем эти фазы, соответствующие максимальному расхождению верхних огибающих сигналов $S_{A1}(t)$ и $S_{A2}(t)$: $\vartheta_1 = -\pi/2$ и $\vartheta_2 = \pi/2$ (т. е. как и для рассмотренного выше маятника, $\Delta\vartheta = \pi$). Некоторые результаты расчета для $f = 465$ кГц; $Q = 10$; $u_m = 1$ мкВ; $\bar{\xi} = 2,5U_m$; $U_0 = 2\bar{\xi}$, где исходные данные взяты здесь лишь для представления наглядности, показаны на рис. 5.

Определим параметры полезного сигнала $x(t)$ в рамках рассматриваемой модели. Его начальную фазу ϑ можно найти по вносимым в каналы фазовращателями фазовым сдвигам α_1 и α_2 , решая систему уравнений $\vartheta_1 = \vartheta + \alpha_1$ и $\vartheta_2 = \vartheta + \alpha_2$ при $\vartheta_{1,2} = \pm\pi/2$

$$\vartheta = -(\alpha_1 + \alpha_2)/2. \quad (6)$$

Заметим, что при $\Delta\vartheta = \pi$ разность $\Delta\alpha = \alpha_2 - \alpha_1$ также равна π . Из этого следует, что для обеспечения оптимизации алгоритма определения фазы ϑ необходимо, чтобы вносимые фазовращателями фазовые сдвиги имели противоположные знаки. Обозначив в выражении (4) дробь $\cos(\omega' t + \varepsilon) / \cos \varepsilon$ через η , определим разность огибающих в этих режимах: $\Delta S_A = 2U_m(1 - \eta e^{-n\delta T})$. Тогда амплитуда полезного сигнала будет равна

$$u_m = \Delta S_A / [2Q(1 - \eta e^{-n\delta T})]. \quad (7)$$

Используя полученные выражения (6) и (7), сформируем полезный сигнал.

Пусть теперь в резонансных контурах РПУ $\xi(t)$ — флуктуационная помеха, являющаяся стационарным случайным процессом, мгновенная величина которого подчиняется нормальному закону

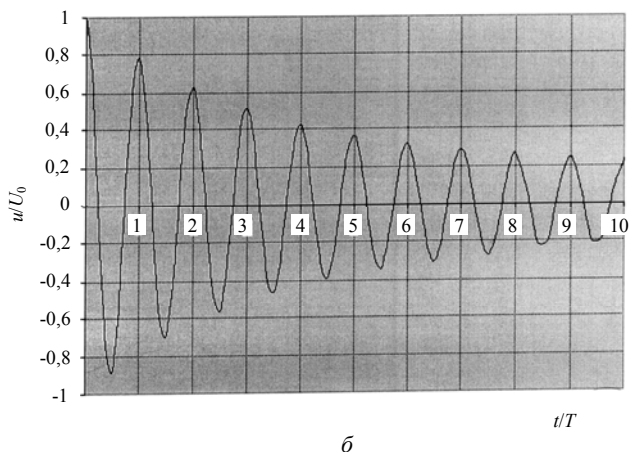


Рис. 5. Осциллограммы радиосигналов в резонансных контурах: а — $\vartheta_1 = -\pi/2$ (первый канал); б — $\vartheta_2 = \pi/2$ (второй канал)

распределения с нулевым средним значением, а фаза имеет равномерное распределение. В реальных условиях огибающие радиосигналов $S_{A1}(t)$ и $S_{A2}(t)$ представляют собой средние линии в полосе флуктуационных помех, которые можно определить в реальном времени или при использовании предварительной записи радиосигналов. Для определения ΔS_A необходимо при достижении амплитуды $U_A(t)$, когда $t = nT$ ($n \geq 1, 2, \dots$) использовать достаточно большое количество отсчетов (выборок) N в окрестности этой точки — в некоторой области ΔT , где U не сильно отличается от амплитуды U_A . Поясним этот процесс с помощью векторных диаграмм на комплексной плоскости (рис. 6), построенных с учетом выражения (5). Радиусы окружностей на рис. 6 равны среднеквадратичным значениям флуктуационной помехи $\bar{\xi}$, i — номер выборки. При $\vartheta_{1,2} = \mp \pi/2$ $|\hat{U}| = U_0 e^{-\delta nT} \mp U_m (1 - e^{-\delta nT}) = U_{1,2}$, причем $U_2 > U_1$, а разность между этими величинами равна искомой разности огибающих ΔS_A , которая не равна $\Delta \bar{S}_A$ в этот момент времени $t = nT$. Область определения выборок и форма сигнала показаны на рис. 7, где $\Delta \tau = \Delta T / (N - 1)$, $\tau_f = (10^{-11} - 10^{-12})$ с [2].

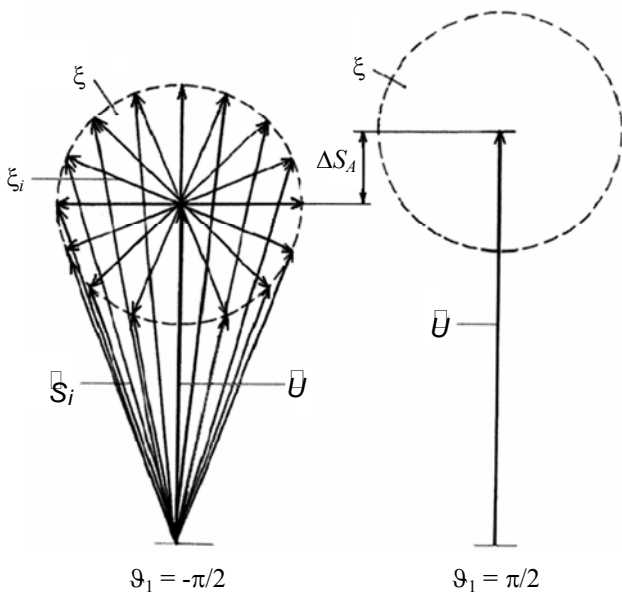


Рис. 6. Векторная диаграмма сигналов на первом и втором каналах при $t = nT$

Очевидно, что при определении $\Delta \bar{S}_A$ должны выполняться условия: $\tau_f \ll \Delta \tau \ll \Delta T \ll T$. При $N \gg 1$ и принятого характера распределения амплитуды и фазе $\xi(t)$ среднюю фазу помехи за время ΔT можно считать равной нулю, а усреднения выборок с разумной точностью дают значения средних амплитуд сигналов $\Delta \bar{S}_{A1, A2}$ в этот момент времени (при этом остается справедливым условие

$U_A \gg \bar{\xi}$). Определив таким образом $\Delta \bar{S}_A$, α_1 и α_2 , найдем параметры неизвестного радиосигнала, используя выражения (6) и (7). Как показали расчеты, погрешность определения этих параметров при $U_0 / \bar{\xi} > 8$ составляет менее 1 %.

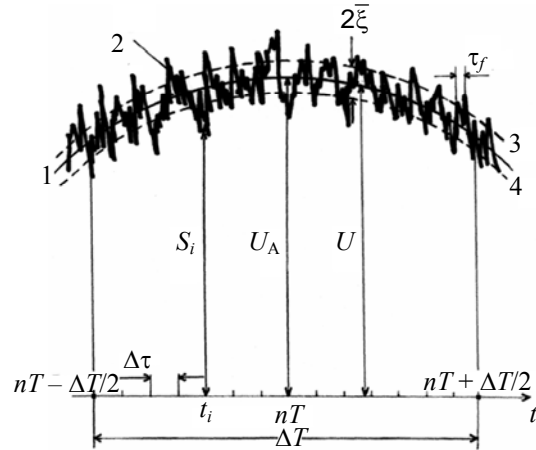


Рис. 7. Форма сигнала в окрестности точки $t = nT$: 1 — суммарный сигнал $u(t) + U(t)$; 2 — суммарный сигнал $S(t)$ с учетом шумовой составляющей; 3, 4 — границы флуктуационных помех

Описание структурной схемы входного устройства РПУ для обнаружения радиоволн за порогом его чувствительности приведено в работе [8], где также показано, что чувствительность устройства (ω_0/δ) вдвое превышает его чувствительность при РР. Результаты проведенных исследований могут быть использованы для создания средств неразрушающего контроля и систем аварийной защиты энергоемких объектов авиационной и космической техники [9], а также в других областях.

Проблема "неидеального" механического осциллятора

Вернемся к механическому осциллятору для измерения малых сил, описанному в работе [1], где предполагается, что с помощью технических средств все возможные шумы и помехи скомпенсированы, кроме тепловых шумов (см. упомянутый выше критерий $F(t)_{\min}$).

Для системы с малой силой трения покоя порог чувствительности определяется в основном тепловыми флуктуациями, спектральная плотность которых постоянна на всех частотах и равна $4kTH$ (теорема Найквиста). Если это так, то измерение силы за порогом чувствительности такого "почти" идеального осциллятора возможно с применением изложенных выше технологических приемов. Здесь, однако, следует отметить два частных случая.

Первый случай. Измеряемая сила $f = \text{const}$. Методика ее определения изложена при рассмотрении маятника крутильных колебаний. Напомним, что измерения возможны при неуспокоенной системе, а флуктуации могут превышать полезный сигнал.

Второй случай. Измеряемая сила изменяется по гармоническому закону, причем ее начальная фаза известна. Решение линейного дифференциального уравнения колебаний с нулевыми начальными условиями было получено Л. Д. Ландау в работе [10] (режим РР). Получить решение для режимов торможения с начальными условиями $f(0) = F_0$ и $\dot{f}(0) = 0$ не представляет особых трудностей. Далее следует применить ту же методику.

При действии сил сухого трения решение для гармонического сигнала $f = f_m \cos(\omega t + \vartheta)$ можно получить, используя свойство сил сухого трения: $f_{\text{const}}(t) = -f_{\text{const}} \text{sign} \dot{f}$, если это слагаемое в правой части уравнения колебаний. При этом колебательная система становится квазилинейной для каждого полупериода действия силы. В этом случае можно, например, вновь рассмотреть последовательность задач Коши и получить соответствующее решение.

Огибающие сигналов в рассмотренных случаях аналогичны представленным на рис. 1 и 2.

В условиях больших шумов и помех и при неизвестной начальной фазе сигнала ϑ его огибающая является средней линией в полосе шумов и помех. Так как фаза флуктуаций случайна, соответствующие кривые могут быть построены путем усреднения измеренных отсчетов N за время ΔT при различных $n(t = nT)$, а кривые 1, 2 и 3 на рис. 1 и 2 для рассматриваемых режимов должны пересекаться в одной точке с координатами (t_0, F_0) , что является критерием достоверности результатов измерений. Соответствующая методика, изложенная ранее при рассмотрении электромагнитного контура, может быть применена здесь для формирования неизвестного сигнала.

Использование рассмотренных технологических приемов для решения аналогичной задачи с квантово-механическим осциллятором потребует проведения исследований совершенно на другом уровне. Например, в двухатомной молекуле возмущение, наложенное на такую колебательную систему, можно учесть с помощью дополнительных слагаемых, входящих в уравнение потенциальной энергии осциллятора [11]. В принципе хотя бы приближенно можно получить решение волнового уравнения для малых колебаний, используя матричные методы, однако решение подобных задач выходит за рамки рассматриваемых в данной статье вопросов.

Заключение

Установленная взаимосвязь между максимальным расхождением огибающих затухающих переходных процессов и параметрами неизвестного сигнала при воздействии его на КС в противофазных режимах позволяет обнаружить сверхмалые информационные сигналы за порогом чувствительности средства для его обнаружения, когда традиционные способы их выделения неэффективны или неприемлемы из-за высоких уровней флуктуационных помех. При неизвестной начальной фазе сигнала это достигается путем последовательных изменений фаз с противоположными знаками. Использование процесса вычитания сигналов позволяет вдвое увеличить чувствительность устройства по сравнению с обычным режимом работы. Для реализации метода достаточно лишь традиционных технических средств без существенного изменения системы в целом.

Продолжительность формирования информационного сигнала зависит от быстродействия вычислительных средств и может составить от единиц до десятка периодов колебаний сигнала в зависимости от требуемой точности и надежности его воспроизведения.

Результаты исследований могут быть использованы для решения прикладных задач в науке и технике: при создании высокотехнологичных измерительных средств и систем, разработке датчиков различного назначения, для обеспечения надежности радиосвязи в экстремальных условиях на Земле, в ближнем и дальнем космосе и т. д.

Литература

1. Брагинский В. Б., Митрофанов В. П., Панов В. И. Системы с малой диссипацией. — М.: Наука, 1981.
2. Радиоприемные устройства/Под ред. Н. Н. Фомина. — М.: Радио и связь, 2003.
3. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теоретическая физика. Т. V. Статистическая физика. — М.: Физматгиз, 2002. С. 437—443.
4. Горелик Г. С. Колебания и волны. — М.: Физматгиз, 1959. С. 56—63.
5. Буга Н. Н., Фалько А. И., Чистяков Н. И. Радиоприемные устройства. — М.: Радио и связь, 1986. С. 239.
6. Кубарев Ю. В. Полеты на Марс, электрореактивные двигатели настоящего и будущего // Наука и технологии в промышленности. 2006. № 2. С. 19—35.
7. Culter W. // Ионные и плазменные установки. — М.: Атомиздат, 1970. Вып. 33. С. 45—55.
8. Коршаковский С. И. Прием радиоволн за порогом чувствительности радиоприемного устройства // Электромагнитные волны и электронные системы. 2006. № 10. С. 59—64.
9. Korshakovsky S. I., Krasnenkov M. A. Test Technology of Moving Electric Conductive Component Defects // 10th International Trade Fair and Conference, May 8—10, 2001, Exhibition Centre Nuremberg, Germany // MAT-2001 Proceedings. P. 359—362.

10. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Механика. — М.: Наука, 1965. С. 97—103.

11. Шифф. Л. Квантовая механика. — М.: Изд-во иностр. лит-ры, 1959. С. 348—350.

Статья поступила в редакцию 25 мая 2007 г.

Oscillatory resonant system to detect information signals as far as the sensitivity threshold

S. I. Korshakovskiy

Moscow State Institute of Radio Engineering, Electronics and Automation, Russia

The theoretical and experimental research carried out by author made it possible to uncover new properties of dynamic oscillatory systems that allow, by using of unsteady-state processes and selecting resonant modes of their operation to obtain an oscillatory system till sensitivity threshold, as well as to increase its sensitivity twofold. As examples the paper consider a torsion pendulum and a radio receiver's electromagnetic circuit. The possibilities for the applied use of the results obtained are discussed.

* * *