

Руслан Алексеевич Галанов
Даниил Вадимович Путинцев
Алексей Владимирович Хахунов

Резонансный датчик сейсмической активности

Работа отмечена Дипломом на Московской областной конференции научно-исследовательской и проектной деятельности школьников "Юный исследователь"

(г. Черноголовка, 2012 г.),

Дипломом на Всероссийском конкурсе научных работ школьников "Юниор" (г. Москва, НИЯУ МИФИ, 2012 г.),

Дипломом на Международной конференции научно-технических работ школьников "Старт в Науку"

(г. Москва, МФТИ, 2012 г.)

Землетрясение - катастрофа, приносящая огромный ущерб. Есть два средства избежать больших потерь от землетрясений: антисейсмическое строительство и заблаговременное оповещение о возможной катастрофе. Второе средство, во всяком случае, может предотвратить огромные людские потери (землетрясение в Ашхабаде 1948 г. унесло по некоторым данным около 50000 жизней).

Для изучения и предупреждения этого явления надо уметь определять силу землетрясения, место его возникновения, частоту возникновения землетрясения в данном месте. Для решения этих задач разрабатываются сейсмодатчики. Первые из них были разработаны ещё в древнем Китае.

Главным элементом любого такого датчика является некоторая подвешенная к основанию прибора масса, которая может совершать колебательное движение при сейсмических толчках.

Различают горизонтальные (поперечные) и вертикальные (продольные) сейсмодатчики. В различных сейсмодатчиках реализованы различные принципы преобразования механических движений в электрические сигналы.

В данной работе предлагается для этих целей метод расстройки резонанса в колебательном контуре при возникновении колебаний.

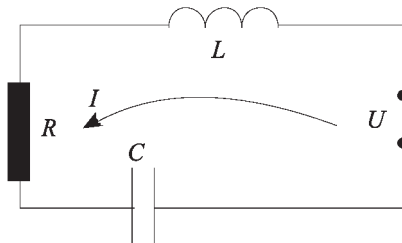
Резонанс, как известно, возникает при вынужденных колебаниях в том случае, когда вынуждающая частота совпадает с частотой собственных колебаний. В этом случае амплитуда колебаний **резко** возрастает.

Если резонанс уже достигнут, незначительное изменение параметров колебательной системы приведет к **резкому** уменьшению амплитуды колебаний.

Это является основным показателем для обнаружения сейсмических толчков. Необходимо изменять параметры колебательной системы, которая испытала сейсмический толчок, так, чтобы рассогласование резонанса устойчиво указывало на мощность сейсмического толчка.

В эксперименте используется явление резонанса напряжений в последовательном колебательном контуре, когда в нём происходят вынужденные колебания под действием постоянного по амплитуде переменного напряжения. Частота напряжения может изменяться с помощью звукового генератора. (Как известно, частота звука, слышимая ухом, находится в интервале от 20 - 20000 Гц. Это очень существенно, поскольку расстройка резонанса может быть первоначально обнаружена с помощью звукового сигнала, а потом можно включить регистраторы, позволяющие получить твёрдые факты наличия движения земной коры).

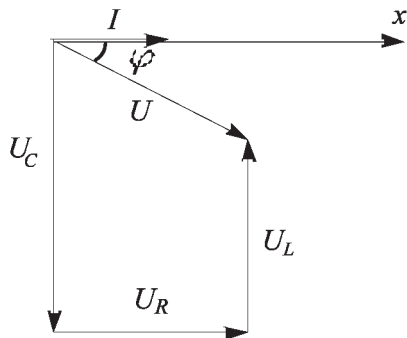
Резонанс напряжений. Последовательный колебательный контур подсоединён к источнику переменного напряжения амплитудой U .



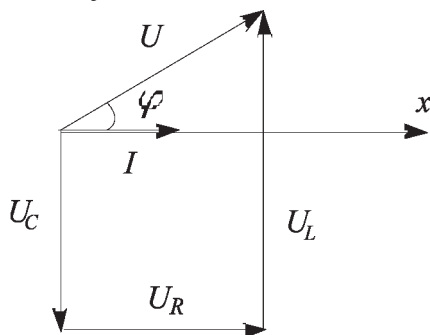
Резонанс напряжений в последовательном колебательном контуре заключается в следующем.

Построим векторные диаграммы для различных значений частоты. Если частота колебаний низкая, емкостное

сопротивление $X_C = 1/\omega C$ оказывается больше индуктивного $X_L = \omega L$, а значит амплитуда напряжения на конденсаторе больше амплитуды напряжения на катушке индуктивности. ($U_C > U_L$). Напряжение на источнике отстает по фазе φ на от тока в контуре, и сопротивление контура (импеданс) оказывается преимущественно емкостным.

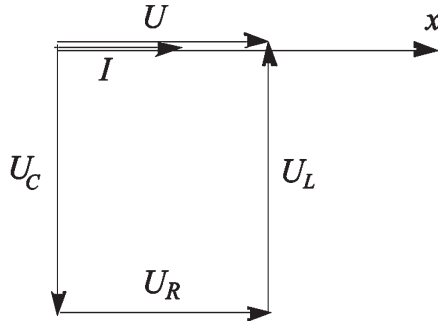


Если частота достаточно велика, емкостное сопротивление $X_C = 1/\omega C$ оказывается меньше индуктивного $X_L = \omega L$, а значит амплитуда напряжения на конденсаторе меньше амплитуды напряжения на катушке индуктивности. ($U_C < U_L$). Напряжение на источнике опережает по фазе на φ ток в контуре, и сопротивление контура (импеданс) оказывается преимущественно индуктивным.



Если емкостное сопротивление $X_C = 1/\omega C$ равно индуктивному $X_L = \omega L$, амплитуда напряжения на конденсаторе равна амплитуде напряжения на катушке индуктивности ($U_C = U_L$).

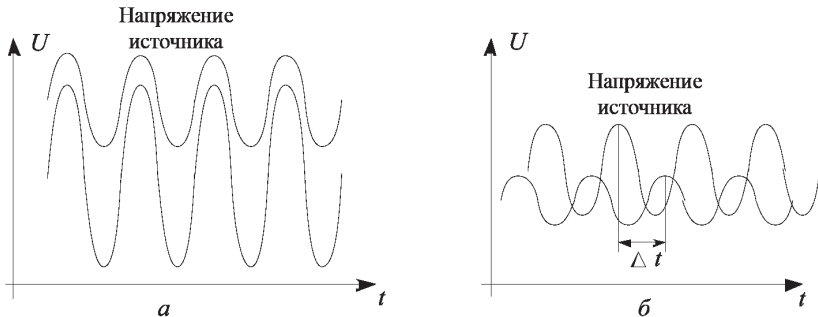
Напряжение на источнике находится в фазе с током в контуре, и сопротивление контура (импеданс) чисто активное. Очевидно, это происходит при резонансной частоте колебаний $\omega_p = 1 / \sqrt{LC}$.



В этом случае $I = \frac{U}{R}$. Это резкий максимум тока.

Удобнее всего наблюдать резонанс на двухлучевом осциллографе. Одновременно отображаются изменения напряжений на источнике переменного напряжения и на резисторе контура. Второе напряжение, очевидно, пропорционально току в контуре.

При резонансной частоте колебания этих напряжений происходят в одной фазе. Наблюдается резкое увеличение напряжения на резисторе, а значит и тока в контуре (рис. а).

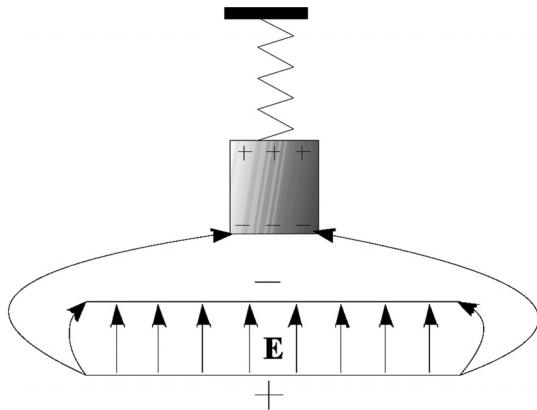


При малейшей расстройке параметров контура ток резко уменьшается, появляется временной сдвиг Δt (а значит и сдвиг по фазе $\Delta \varphi$) между колебаниями напряжения и тока (рис. б).

Сейсмические толчки чаще всего бывают продольные (вдоль вертикали) и поперечные (перпендикулярно вертикали). Поэтому параметр контура - ёмкость - должна меняться с учётом этих обстоятельств.

Расстройка резонанса при поперечных колебаниях, возникающая из-за явления электростатической индукции. Колебательная система состоит из вертикального пружинного маятника, находящегося вблизи конденсатора контура. Контур находится в режиме резонанса.

Конденсатор, включенный в цепь колебательного контура, имеет конечные размеры. Расстояние между пластинами достаточно большое. Никаких специальных мер по замыканию поля внутри конденсатора не предпринималось. Поэтому на поверхности колеблющегося металлического тела, ближайшей к краям пластин выступают свободные заряды, на которых замыкаются краевые силовые линии конденсатора. В итоге изменяется количество силовых линий между пластинами конденсатора, а значит, в конечном итоге изменяется его ёмкость.



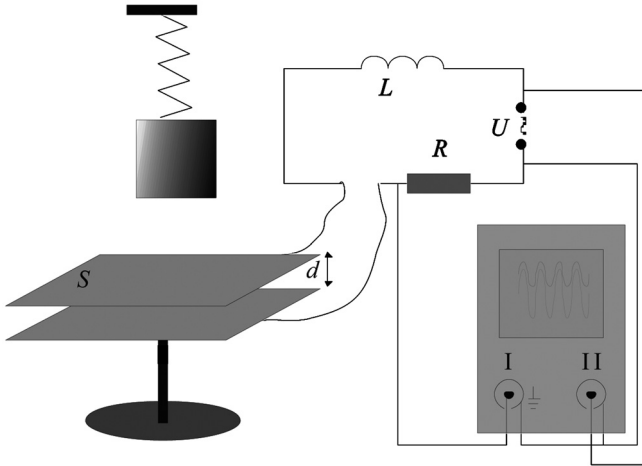
Поскольку конденсатор является основным (паразитные ёмкости малы) в нашем колебательном контуре, и контур до колебаний находится в режиме резонанса, при колебаниях, возникающих в результате толчка, резонанс расстраивается. Это очень хорошо видно на экране осциллографа.

Амплитуда тока в контуре меняется с частотой колебаний маятника. Она пропорциональна амплитуде колебаний. Поэтому по изменению амплитуды тока в контуре мож-

но судить об энергии сейсмического толчка. Приведенная таблица показывает связь между амплитудами колебаний маятника и тока в колебательном контуре.

№	X_m , мм	I_m , мкА
1	5	20,6
2	8	34
3	10	40

Естественно, при расстройке резонанса изменяется также и разность фаз между напряжением и током в контуре.

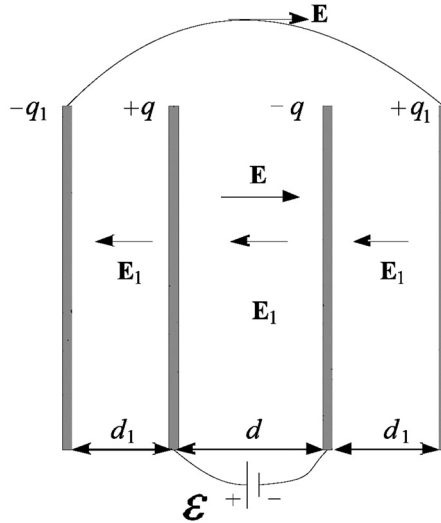


Расстройка резонанса, возникающая из-за меняющейся экранировки конденсатора при колебаниях. Решим классическую задачу о нахождении ёмкости конденсатора, помещённого в экранирующий кожух.

На пластинах конденсатора равные положительный и отрицательный заряды q . Конденсатор окружают незаряженные соединенные друг с другом пластины такой же площади. Это своего рода кожух, экранирующий конденсатор от внешних статических полей. Расстояния между пластинами указаны на рисунке.

Образование зарядов q_1 на первоначально незаряженных пластинах происходит из-за неоднородности электрического поля на краях пластин конденсатора. На рисунке видно, что электрическое поле E передвигает электроны на левую

пластину, образуя отрицательный заряд $-q_1$ на ней. Такой же положительный заряд образуется на правой пластине.



Вычислим для этой идеальной системы ёмкость. Очевидно, $\mathcal{E} = (E - E_1)d$. Разность потенциалов между внешними пластинами равна нулю, значит $0 = E_1(d + 2d_1) - Ed$. Поэтому

$$E_1 = \frac{Ed}{(d + 2d_1)}.$$

$$\text{Отсюда } \mathcal{E} = Ed \left(1 - \frac{d}{d + 2d_1} \right) = E \frac{2dd_1}{d + 2d_1} = \frac{q2dd_1}{S\epsilon_0(d + 2d_1)}.$$

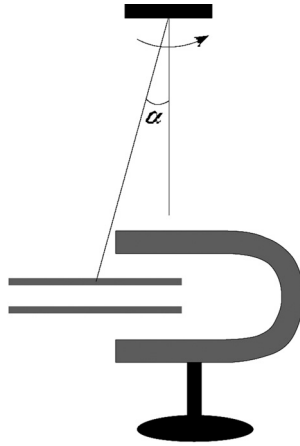
$$C = \frac{S\epsilon_0 d(d + 2d_1)}{2d_1}.$$

Ёмкость такого конденсатора

Если площадь экранирования меняется, изменяется и ёмкость.

Конденсатор колебательного контура, совершая колебания в режиме математического маятника, меняет площадь захода в экранирующий кожух. Ёмкость контура, очевидно, при этом меняется. Резонанс в контуре расстраивается, и по уменьшению амплитуды колебаний в контуре можно определить энергию колебаний маятника, произошедшего от сейсмического толчка.

Схема колебательной системы установки изображена на рисунке.

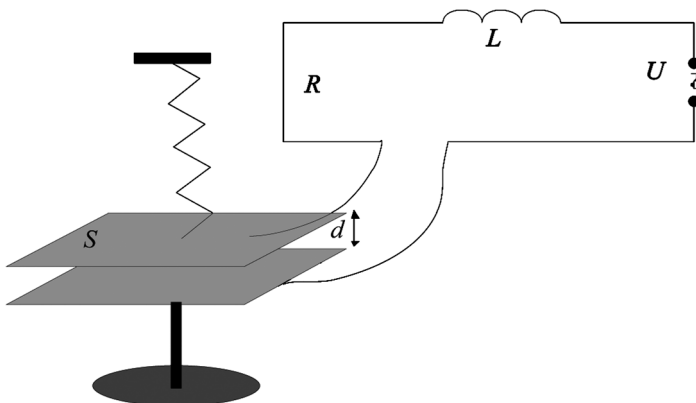


Можно предложить и другие схемы, приводящие к расстройке резонанса при колебаниях.

Расстройка резонанса при продольных колебаниях.

Ёмкостью контура является конденсатор с достаточно большими медными пластинами. Нижняя пластина закреплена, верхняя пластина массой ≈ 50 г может совершать вертикальные колебания на пружине жёсткостью 5 Н/м.

В положении равновесия конденсатор должен иметь ёмкость порядка 1 пФ. В процессе колебаний ёмкость значительно меняется из-за изменения d . Для того чтобы пластины при колебании не соприкасались, на нижней пластине находится диэлектрический упор, который ограничивает амплитуду колебаний.

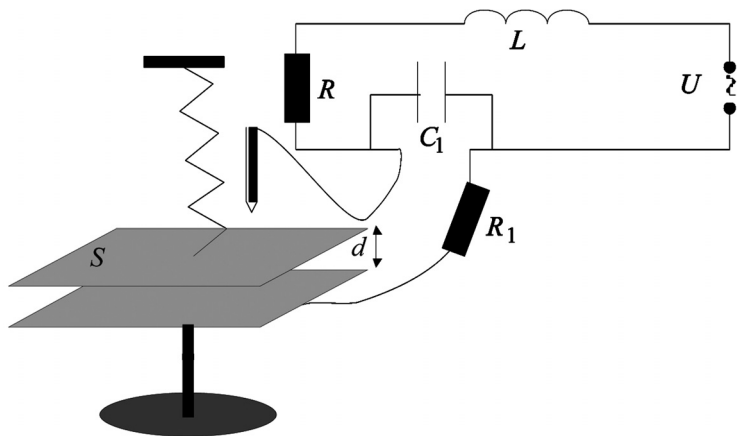


Контур находится в режиме резонанса. Изменение ёмкости приводит к расстройке резонанса и резкому уменьшению тока в контуре. На двухлучевом осциллографе это хорошо видно.

По сдвигу фаз между напряжением и током в контуре можно оценить частоту колебаний верхней пластины конденсатора.

Разность фаз, очевидно, равна $\Delta\varphi = \omega_{\text{генератора}} \Delta t$. Естественно считать, что $\Delta t = \frac{T}{4} = \frac{\pi}{2\omega_{\text{колебаний}}}$, где T - период колебаний пружинного маятника. Значит $\Delta\varphi = \frac{\pi\omega_{\text{ген}}}{2\omega_{\text{колебаний}}}$. Разность фаз становится значительной при рассогласовании частот колебаний генератора и колебательной системы.

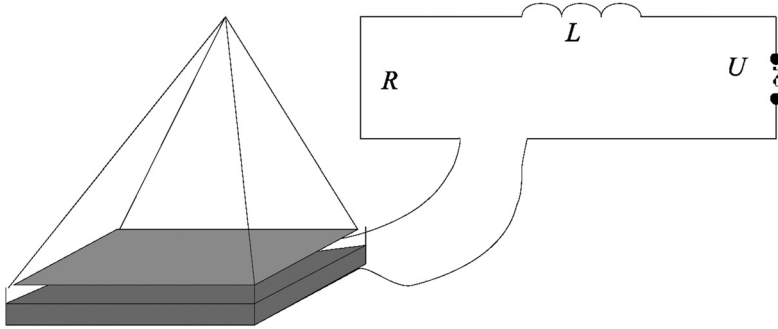
Другой способ расстройки резонанса состоит в том, что при определённой амплитуде вертикальных колебаний колеблющаяся пластина конденсатора периодически подключается к сопротивлению R_1 . До подключения контур настроен в резонанс. Основным при этом является конденсатор C_1 . При подключении ёмкость контура значительно меняется. Амплитуда тока при этом сильно уменьшается.



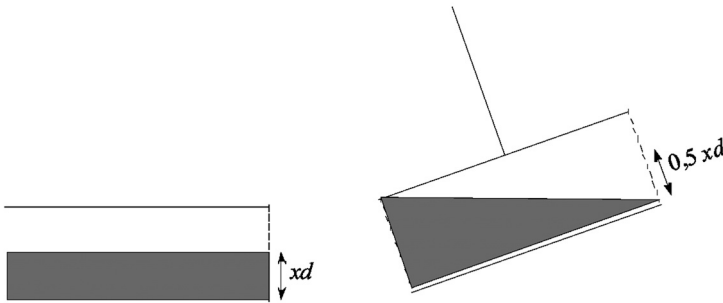
Расстройка резонанса при поперечных колебаниях.

На поперечные (сдвиговые) сейсмические толчки реагирует колебательная система, состоящая из конденсатора, подве-

шенного на четырех тонких нитях. Внутри конденсатора находится жидкий диэлектрик (спирт). Спирт обладает небольшой вязкостью, а значит хорошей текучестью.



Количество диэлектрика выбирается таким, что заполняет конденсатор на величину xd . При небольших амплитудах колебаний положение плоскости диэлектрика может быть таким как на рисунке. В состоянии равновесия контур настроен в резонанс.



Тогда в положении равновесия ёмкость может быть вычислена как эквивалентная для двух соединённых параллельно конденсаторов.

$$C_0 = \frac{\varepsilon_0 x S}{d} (\varepsilon + 1).$$

При амплитудном отклонении в случае линейного возрастания толщины диэлектрика вдоль плоскости его пластины, ёмкость может быть приближенно вычислена по формуле

$$C'_0 = \frac{\varepsilon_0 x S}{d} (\varepsilon + 0,5).$$

Очевидно, при колебаниях такого конденсатора ёмкость изменяется, что приводит к расстройке резонанса и уменьшению тока в колебательном контуре.

В данной схеме при колебаниях ёмкость меняется не так значительно, как в описанных выше, поэтому чувствительность регистратора уменьшения тока при расстройке резонанса должна быть выше.

В дальнейшей работе над этой темой основными задачами, очевидно, являются создание схемы получения твердой копии экспериментальных результатов, миниатюризация устройства, исследование возможностей применения в других областях науки и техники.

Печатается по материалам Всероссийского конкурса научных работ школьников "Юниор" (г. Москва, НИЯУ МИФИ, 2012 г.) и Международной конференции научно-технических работ школьников "Старт в Науку" (г. Москва, МФТИ, 2012 г.)