

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

им. М.В. ЛОМОНОСОВА

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

Кафедра физики колебаний

Описание задачи спецпрактикума

КВАРЦЕВЫЕ РЕЗОНАТОРЫ

БЕЛОВ А.А., СТЕПАНОВ А.В.

МОСКВА 2012г.

ВВЕДЕНИЕ

В задаче исследуются электрические характеристики кварцевых резонаторов и генератора, стабилизированного кварцевым резонатором.

Электрические резонаторы, основанные на пьезоэлектрическом эффекте, отличаются высокой добротностью и стабильностью их параметров. Поэтому они находят широкое применение в современной электронной технике: используются для генерирования стабильных колебаний в системах связи, измерительной и бытовой аппаратуре, вычислительной технике, применяются для узкополосной фильтрации сигналов, а также являются основой разнообразных высокочувствительных физических датчиков.

ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ И ХАРАКТЕРИСТИКИ КВАРЦЕВОГО РЕЗОНАТОРА

Пьезоэлектрические и, в частности, кварцевые резонаторы являются пассивными электронными двухполюсниками, обладающими ярко выраженными резонансными свойствами. Основной частью пьезорезонатора является пьезоэлемент, - пластина (или тело иной формы) из пьезоэлектрика, на поверхность которой нанесены электроды. В пьезорезонаторах используются два эффекта: пьезоэлектричество и резонансные свойства упругих колебаний в пьезоэлементе.

Пьезоэлектрический эффект

Пьезоэлектрический эффект обнаружили Жак и Пьер Кюри в 1880 г. Внешние механические силы, действуя в определенных направлениях на пьезоэлектрический кристалл, вызывают в нем не только механические напряжения и деформации (как во всяком твердом теле), но и электрическую поляризацию и, следовательно, появление на его поверхностях связанных электрических зарядов разных знаков. При изменении направления механических сил на противоположное соответственно изменяются направление поляризации и знаки зарядов. Это явление называют прямым пьезоэффектом.

Пьезоэффект обратим: под действием электрического поля в образце из пьезоэлектрического материала в общем случае возникают механические напряжения и деформации. При изменении направления электрического поля на противоположное соответственно изменяются на противоположное направления напряжений и деформаций. Это явление получило название обратного пьезоэффекта.

Прямой и обратный пьезоэффект описываются линейными соотношениями. Уравнение прямого пьезоэффекта связывает электрическую поляризацию \mathbf{P} с механическим напряжением $\boldsymbol{\sigma}$:

$$\mathbf{P} = \mathbf{d} \cdot \boldsymbol{\sigma} .$$

Коэффициент пропорциональности \mathbf{d} называется пьезоэлектрическим модулем (пьезомодулем), и служит мерой пьезоэффекта. Обратный пьезоэффект описывается зависимостью:

$$\mathbf{x} = \mathbf{d} \cdot \mathbf{E},$$

где \mathbf{x} - деформация; \mathbf{E} - напряженность электрического поля. Пьезомодуль \mathbf{d} для

прямого и обратного эффектов имеет одно и то же значение.

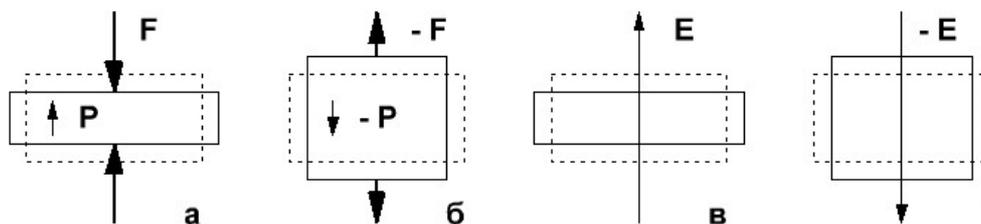


Рис.1. Схематичные изображения прямого (а, б) и обратного (в, г) пьезоэффектов. Стрелками F и E изображены внешние воздействия - механическая сила и напряженность электрического поля. Штриховыми линиями показаны контуры образца из пьезоэлектрика до внешнего воздействия, сплошными линиями - контуры образца при наличии внешнего воздействия. (Для наглядности изменение формы образца во много раз увеличено.); P - вектор поляризации.

Приведенные выражения для пьезоэффекта даны в упрощённой форме. В действительности пьезоэлектрические явления в кристаллах более сложны, что обусловлено анизотропией их упругих и электрических свойств. Пьезоэффект зависит не только от величины механического или электрического воздействия, но и от направления сил относительно кристаллофизических осей кристалла. Пьезоэффект может возникать в результате действия как нормальных, так и касательных напряжений. Существуют направления, для которых пьезоэффект равен нулю. Пьезоэффект описывается несколькими пьезомодулями, число которых зависит от симметрии кристалла. Направления поляризации может совпадать с направлением механического напряжения или составлять с ним некоторый угол. При совпадении направлений поляризации и механического напряжения пьезоэффект называют продольным (рис.2а), а при их взаимно перпендикулярном расположении – поперечным (рис.2б).

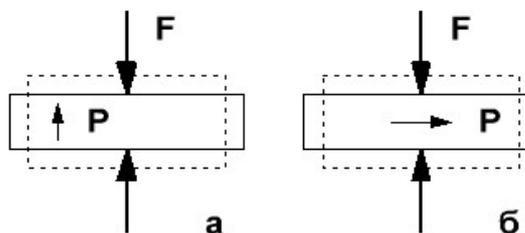


Рис.2. Продольный (а) и поперечный (б) пьезоэффекты.

Обратный пьезоэффект следует отличать от электрострикции - сходного, но другого физического явления, характерного для всех диэлектриков. Электрострикция – деформация образца из диэлектрика под действием электрического поля. Электрострикция - четный эффект. При электрострикции деформация не зависит от направления электрического поля, а ее величина пропорциональна квадрату напряженности электрического поля. Порядок деформаций при электрострикции намного меньше, чем при пьезоэффекте (приблизительно на два порядка). Электрострикция всегда возникает и при

пьезоэффекте, но вследствие малости в расчет не принимается. Деформации пьезоэлектрика, возникающие вследствие пьезоэффекта, также незначительны по абсолютной величине. Например, кварцевая пластина толщиной 1 мм под действием напряжения 100 В изменяет свою толщину всего на $2,3 \times 10^{-7}$ мм. Незначительность величин деформаций пьезоэлектриков объясняется их очень высокой жесткостью.

Пьезоэффект наблюдается в анизотропных диэлектриках, преимущественно в кристаллах некоторых веществ, обладающих определенной, достаточно низкой симметрией. Пьезоэффектом могут обладать кристаллы, не имеющие центра симметрии, а имеющие так называемые полярные направления (оси). Пьезоэффектом могут обладать также некоторые поликристаллические диэлектрики с упорядоченной структурой, например керамические материалы и полимеры. Диэлектрики, обладающие пьезоэффектом, называют пьезоэлектриками. Наиболее употребляемыми материалами в производстве пьезорезонаторов являются кварц (SiO_2 - диоксид кремния) и пьезокерамика.

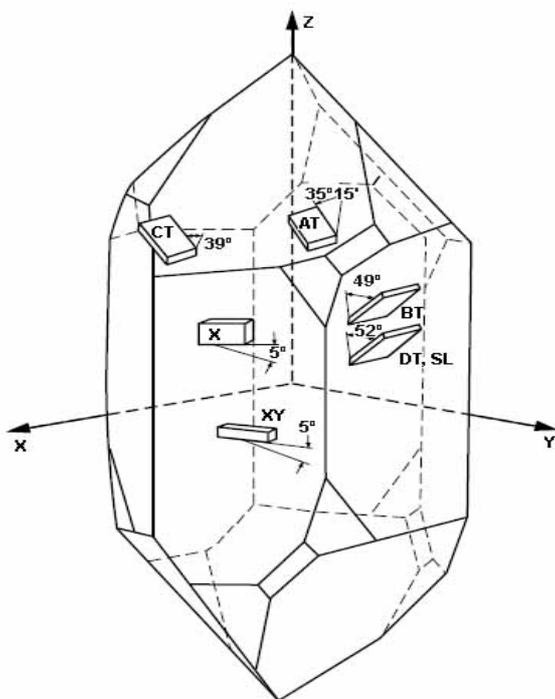


Рис.3. Ориентация кристаллографических осей обработанного кристалла кварца и основные типы срезов пьезоэлементов. Ось X называется электрической, ось Y – механической, а ось Z – оптической.

В кристалле кварца каждый ион кремния, обладающий положительным зарядом $+4e$, тетраэдрически окружен четырьмя ионами кислорода, каждый из которых обладает отрицательными зарядами $-2e$, и каждый ион кислорода связывает два иона кремния. Заряды всех ионов кристаллической ячейки взаимно компенсируются, и в целом она электрически нейтральна. Для простоты можно рассматривать каждую пару ионов кислорода в качестве частицы, имеющей заряд $-4e$, при этом структурная ячейка кристалла имеет вид, изображенный на Рис.4. Предположим, что внешняя сила сжимает эту ячейку в направлении оси X. Тогда ион кремния с номером (1) сдвинется внутрь и расположится между ионами кислорода с номерами (2) и (6), а ион кислорода с номером (4) — между ионами кремния с номерами (3) и (5). Вследствие этого на одной поверхности возникнет положительный заряд, на другой — отрицательный, т. е. будет иметь место прямой пьезоэлектрический эффект. На

этом же рисунке показано, что при растяжении ячейки также возникает заряд, но знак заряда изменяется на противоположный.

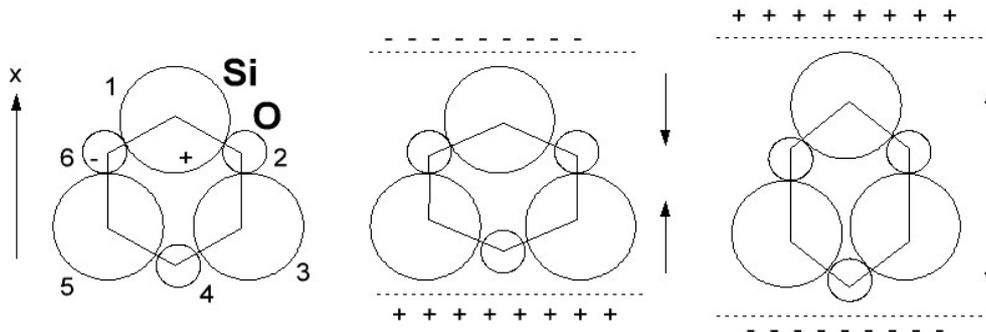


Рис.4. Образование электрических зарядов при деформации кристалла кварца.

Механические колебания

Резонансные явления, наблюдаемы в электрических цепях, содержащих пьезорезонаторы, являются следствием резонансных свойств упругих колебаний, возбуждающихся в пьезоэлементе под действием приложенного к его обкладкам переменного электрического напряжения. Благодаря обратному пьезоэлектрическому эффекту переменное напряжение, приложенное к обкладкам пьезоэлемента, вызывает в нём упругие колебания. Когда частота приложенного напряжения приближается к резонансной частоте упругих колебаний, их амплитуда увеличивается. Это сопровождается соответствующим увеличением упругих деформаций и вследствие прямого пьезоэффекта приводит к увеличению амплитуд колебаний электрических зарядов на обкладках пьезоэлемента и колебаний тока во внешней цепи.

Тонкие пластины или бруски, вырезанные из кристалла кварца, имеют ярко выраженные резонансные свойства. Ключевой характеристикой кварцевого резонатора является ориентация используемой в нём пластины кварца относительно кристаллографических осей (так называемый тип среза пьезоэлемента). Пьезоэлементы, изготовленные из кристаллов кварца, могут иметь форму прямоугольной или квадратной пластин, прямоугольного бруска, круглой плоской или линзообразной пластин. В определенных случаях могут использоваться тела более сложной формы.

Форма пьезоэлемента взаимосвязана с видом используемых механических колебаний. Они также могут носить различный характер: сдвиг по контуру, сдвиг по толщине, косой сдвиг, изгиб, кручение, сжатие-растяжение, объемный сдвиг. Колебания могут происходить как на основной частоте – в этом случае в направлении распространения колебаний укладывается одна полуволна, так и на частоте обертонов (частотах высших нечетных гармоник) – в этом случае в направлении распространения укладывается нечетное число полуволн. Некоторые виды колебаний, используемых в кварцевых резонаторах, показаны на Рис.5.

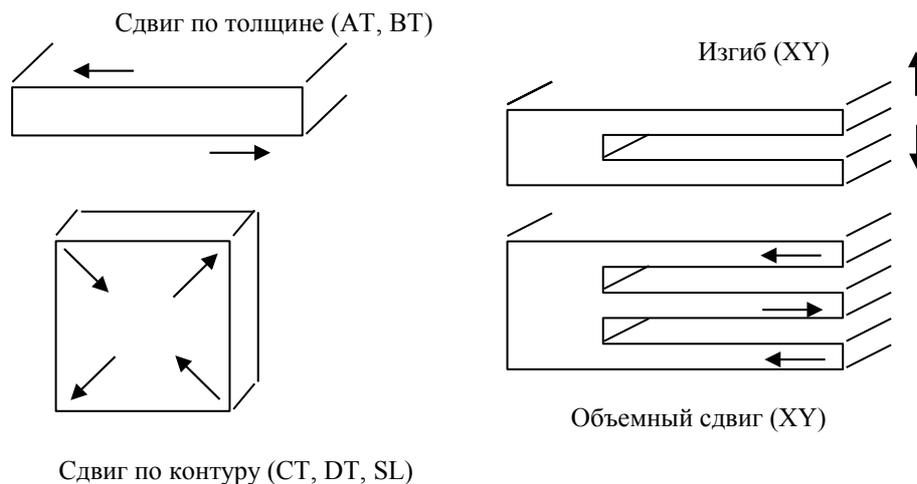


Рис.5. Виды колебаний в кварцевых резонаторах.

Наиболее широко распространенным типом среза является так называемый АТ-срез. Около 90% всех кварцевых элементов, производимых в мире, выполнено из пластин этого типа среза. Вид механических колебаний для этого среза – сдвиг по толщине (Рис. 5), колебания происходят как на основной частоте, так и на нечетных обертонах. В часовых резонаторах, работающих на частоте 32.768 кГц, используются пластины XY-среза. Вид колебаний для этого среза также показан на Рис.5.

Колебания резонаторов сопровождаются разного рода потерями. Эти потери имеют как механическую, так и электрическую природу. Кварц является почти идеальным диэлектриком, поэтому потери диэлектрического происхождения могут не приниматься во внимание. Электрические потери, обусловленные сопротивлением электродов, также обычно невелики и значительно меньше механических. У таких пьезоэлектриков, как пьезокерамика, диэлектрические потери значительны и могут заметно влиять на добротность резонаторов.

Природа механических потерь сложна и разнообразна. Основными видами потерь являются: потери на акустическое излучение, внутреннее и наружное трение, связанные колебания в пьезоэлементе. Акустическая передача (излучение) энергии колебаний происходит как в воздушную среду, окружающую пьезоэлемент, так и в систему крепления пьезоэлемента. Потери на передачу в воздушную среду радикально устраняются в вакуумных резонаторах. В герметичных конструкциях можно уменьшить потери на излучение установкой специальных экранов, расположенных относительно излучающих поверхностей пьезоэлектрического элемента так, чтобы отражать и возвращать обратно излученную энергию. Такой же принцип используется и для уменьшения потерь, обусловленных передачей энергии в систему крепления. Для этого на проволочных держателях пьезоэлемента устанавливают специальные детали, называемые отражателями. Интенсивные механические колебания пьезоэлемента могут вызывать ионизацию окружающего его слоя газа, что также приводит к дополнительным потерям энергии колебаний.

Потери на внутреннее трение происходят как в кристаллическом материале пьезоэлемента, так и в присоединенных к нему элементах -

электродных и контактных покрытиях, проволочных держателях, соединительных материалах (припоях, клеях). Трение в поверхностном слое пьезоэлемента, нарушенном процессами механической обработки, также является источником интенсивных потерь. Потери этого рода значительно больше потерь на внутреннее трение кристалла. Для их уменьшения повышают чистоту обработки поверхности пьезоэлектрического пьезоэлемента, подвергая её тонкой шлифовке, полировке и травлению. Источником потерь в поверхностном слое являются также разного рода загрязнения, например остатки флюса и т. п. Существенным источником потерь являются материалы, посредством которых крепятся проволочные держатели - мягкие припои и клеи. Для уменьшения этих потерь используют минимальные дозы припоя и составы с небольшим внутренним трением.

Современные технологии позволяют существенно уменьшить разного рода механические потери и гарантировать средний уровень добротности резонаторов не менее $10^4 \dots 10^5$ для большинства типов. Очень высокие значения добротности (выше 10^5) в большинстве случаев не требуются. Большая добротность необходима только для резонаторов, используемых в высокостабильных кварцевых генераторах и узкополосных стабильных фильтрах. У прецизионных кварцевых резонаторов некоторых типов удаётся повысить добротность до предельно высоких значений, ограничиваемых практически только внутренним трением в кварце. В зависимости от частоты, типа колебаний и некоторых других факторов значения добротности могут достигать нескольких миллионов или даже десятков миллионов.

Диапазон частот пьезорезонаторов весьма широк. Он простирается от нескольких сотен герц до СВЧ-диапазона и достиг уже частот порядка 1000 МГц. Столь большое перекрытие достигнуто благодаря использованию всего разнообразия видов механических колебаний, различия в скоростях акустических волн разных типов и изменению размеров резонаторов в широких пределах. Скорости продольных и поперечных упругих волн в кварце равны приблизительно 5500 и 3500 м/с соответственно, а размеры реальных резонаторов находятся в пределах от 50 мм до 50 мкм. Расширение диапазона частот в область низких частот достигается в результате использования изгибных колебаний, скорость которых существенно ниже скорости продольных и сдвиговых волн и зависит от частоты. Расширение диапазона частот в область высоких частот достигается возбуждением в тонких пластинах гармонических обертонов толщинных колебаний. Технологические достижения последних лет позволяют изготавливать очень тонкие кристаллические пластины, так называемые мембранные элементы, толщиной несколько микрометров, допускающие возбуждение колебания с частотой до 1000 МГц.

Эквивалентная электрическая схема пьезорезонатора

Когда частота приложенного к пьезорезонатору переменного напряжения изменяется вблизи резонансной частоты упругих колебаний, наблюдается значительное резонансное изменение их амплитуды и, как следствие, такое же резонансное изменение амплитуды тока во внешней цепи. На резонансной частоте амплитуда тока во внешней цепи становится максимальной. Поэтому пьезоэлектрический резонатор, включенный в электрическую цепь, эквивалентен последовательному колебательному контуру с такой же высокой добротностью, которая характеризует резонансные свойства упругих колебаний.

Эквивалентная электрическая схема пьезорезонатора показана на Рис.6. Конденсатор C_0 на этом рисунке отображает наличие не связанной с пьезоэффектом ёмкости, которой обладают электроды, нанесённые на пьезоэлемент, проводники, соединяющие электроды с внешней цепью и кристаллодержатель. Ёмкость C_0 , называется параллельной или шунтирующей ёмкостью и имеет типичную величину порядка единиц пФ. Ёмкость C , индуктивность L и резистор R на Рис.6 являются параметрами колебательного контура, эквивалентного пьезоэлектрическому резонатору. Эти три величины называют динамическими параметрами пьезорезонатора.

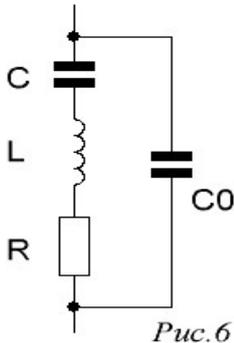


Рис.6

Механическим колебаниям пьезорезонатора можно сопоставить колебания осциллятора, имеющего массу m , жесткость k и коэффициент трения h . Смещение x осциллятора описывается уравнением:

$$m \frac{d^2x}{dt^2} + h \frac{dx}{dt} + kx = F.$$

Сила F , действующая на осциллятор, вызвана обратным пьезоэффектом и пропорциональна напряженности поля в пьезоэлектрике и, следовательно, пропорциональна напряжению, приложенному к резонатору: $F = aU$, a – некоторый коэффициент. С другой стороны, из-за прямого пьезоэффекта смещение приводит к появлению заряда: $q = bx$, b – некоторый коэффициент. Поэтому из предыдущего уравнения следует уравнение для последовательного электрического LCR-контура:

$$L \frac{d^2q}{dt^2} + R \frac{dq}{dt} + \frac{1}{C} q = U,$$

где $L = m/ab$, $R = h/ab$, $C = k/ab$ – динамические параметры пьезорезонатора. Добротность Q этого эквивалентного электрического контура равна добротности механического осциллятора:

$$Q = (L/C)^{1/2} / R = (km)^{1/2} / h.$$

Как указывалось выше, пьезорезонаторы имеют очень большие значения добротности, недостижимые для колебательных контуров, изготовленных с использованием конденсаторов и катушек индуктивности.

Динамическое сопротивление R кварцевых резонаторов изменяется в интервале от нескольких Ом до сотен кОм в зависимости от частоты резонанса, номера гармоники и ряда конструктивных факторов. Динамическая индуктивность L изменяется в интервале от тысяч Гн для резонаторов низких частот до нескольких мГн для высокочастотных резонаторов.

Импеданс эквивалентной электрической схемы пьезонатора на Рис.6 выражается следующим образом:

$$Z_1 = X_0 (R+X) / (R+X+X_0),$$

где $X = j\omega L + 1/j\omega C$ – реактивное сопротивление, эквивалентного колебательного контура, $X_0 = 1/j\omega C_0$ – реактивное сопротивление параллельной емкости. В этой цепи при малых потерях R возможны два резонанса: первый имеет место, когда импеданс Z_1 принимает минимальное значение. В этом случае реактивное сопротивление X равно нулю. Это так называемый последовательный резонанс. Второй резонанс наблюдается, когда импеданс Z_1 принимает максимальное значение. Тогда реактивное сопротивление $X+X_0$ равно нулю. Этот резонанс называется параллельным.

Последовательный резонанс происходит на частоте ω_0 , на которой реактивные сопротивления эквивалентного колебательного контура компенсируют друг друга. Тогда

$$X(\omega_0) = 0, \quad \omega_0^2 = 1/LC.$$

Импеданс эквивалентного контура в малой окрестности резонансной частоты ω_0 можно представить в виде:

$$Z = R + X \approx R + j2\rho\xi = R (1 + j2Q\xi),$$

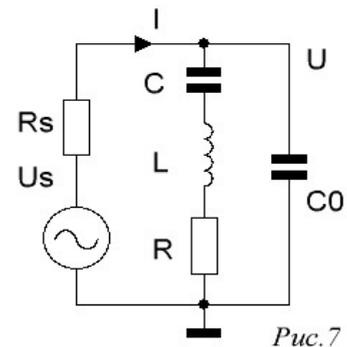
где $\rho = (L/C)^{1/2} = \omega_0 L = 1/\omega_0 C$ - характеристическое сопротивление контура, $Q = \rho/R \gg 1$ - добротность, $\xi = \omega/\omega_0 - 1 \ll 1$ - относительное отклонение частоты от резонансного значения. На резонансной частоте импеданс контура принимает минимальное, чисто активное значение R ($\text{Im}Z=0$). На частотах ниже резонансной импеданс контура имеет емкостный характер ($\text{Im}Z<0$), на частотах выше резонансной — индуктивный ($\text{Im}Z>0$). Ширину резонансной области ($\Delta\omega = \omega_{01} - \omega_{02}$) определяют частоты ω_{01} , ω_{02} , на которых модуль импеданса увеличивается в $\sqrt{2}$ раз по сравнению с резонансным значением:

$$\Delta\omega = \omega_0/Q.$$

Фазовый сдвиг φ между током и напряжением вблизи резонансной частоты линейно зависит от частоты:

$$\varphi \approx \text{tg } \varphi = \text{Im}Z/\text{Re}Z = 2Q (\omega/\omega_0 - 1).$$

Экспериментальное исследование последовательного резонанса можно выполнить с помощью установки, схема которой показана на рис.7. Помимо кварцевого резонатора установка содержит генератор гармонических колебаний с ЭДС, равной U_s и внутренним сопротивлением R_s . Последовательный резонанс проявляется как резкое увеличение тока I , текущего от генератора в пьезорезонатор. Необходимо иметь в виду, что измеряемое в таком эксперименте значение добротности резонатора будет занижено из-за того, что колебательная энергия в рассматриваемом случае теряется не только в динамическом сопротивлении R , но и во внутреннем сопротивлении R_s . Для уменьшения связанной с этим погрешности необходимо, чтобы внутреннее сопротивление генератора удовлетворяло условию: $R_s \ll R$.



В пьезорезонаторе последовательный LCR-контур шунтирован параллельной емкостью (паразитная емкость монтажа и емкость цепи, к которой подключен резонатор, также вносят вклад в C_0). Из-за большой добротности LCR-ветви емкость C_0 слабо влияет на частоту и добротность последовательного резонанса, однако сужает пределы изменения импеданса резонатора при существенном отклонении частоты от резонансной области, так как вне области резонанса сопротивление пьезорезонатора не может превышать сопротивление параллельной емкости. Поэтому желательно, чтобы емкость C_0 была возможно малой.

Параллельный резонанс имеет место на частоте ω_1 , на которой реактивные проводимости LCR-ветви и параллельной емкости компенсируют друг друга:

$$[X + X_0](\omega_1) = 0, \quad \omega_1^2 = 1/LC_1 = \omega_0^2 (1 + C/C_0),$$

где $C_1 = CC_0/(C+C_0)$. Частота параллельного резонанса лежит выше частоты последовательного - в той области, где импеданс LCR-ветви имеет индуктивный характер.

Величина C/C_0 называется емкостным отношением m ($m=C/C_0$) и определяет ширину резонансного промежутка - разности частот параллельного и последовательного резонансов. Резонансный промежуток является важной характеристикой пьезорезонатора. Например, он определяет возможную полосу пропускания полосового фильтра, который может быть построен на основе пьезорезонатора, или диапазон перестройки частоты управляемого пьезоэлектрического генератора. Значения m для кварцевых резонаторов находятся в пределах $5 \cdot 10^{-5} \dots 10^{-2}$, а для резонаторов из сильных пьезоэлектриков его значение больше 10^{-2} и достигает единиц. Для малых m частоты ω_0 и ω_1 близки друг к другу, и ширина резонансного промежутка определяется соотношением:

$$(\omega_1 - \omega_0)/\omega_0 \approx m/2.$$

При высокой добротности ($Qm \gg 1$) импеданс параллельного контура Z_1 в малой окрестности резонансной частоты ω_1 можно представить в виде:

$$Z_1 \approx R(Qm)^2 / (1 + j2Q_1\zeta),$$

где $\rho_1 = (L/C_1)^{1/2}$ - характеристическое сопротивление, $Q_1 = \rho_1/R \gg 1$ - добротность, $\zeta = \omega/\omega_1 - 1 \ll 1$ - относительное отклонение частоты от резонансного значения. Для кварцевых резонаторов емкостное отношение мало, и поэтому значения ρ_1 и Q_1 очень близки к значениям ρ и Q . На резонансной частоте импеданс контура принимает максимальное, чисто активное значение $R(Qm)^2$ ($\text{Im}Z_1 = 0$). На частотах выше резонансной импеданс контура имеет емкостный характер ($\text{Im}Z_1 < 0$), на частотах ниже резонансной - индуктивный ($\text{Im}Z_1 > 0$). Ширину резонансной области ($\Delta\omega = \omega_{11} - \omega_{12}$) определяют частоты ω_{11} , ω_{12} , на которых модуль импеданса уменьшается в $\sqrt{2}$ раз по сравнению с резонансным значением:

$$\Delta\omega = \omega_1/Q_1.$$

Фазовый сдвиг φ между током и напряжением вблизи резонансной частоты линейно зависит от частоты:

$$\varphi \approx \text{tg } \varphi = \text{Im}Z_1 / \text{Re} Z_1 = -2Q_1(\omega/\omega_1 - 1).$$

В измерительной цепи, показанной на Рис.7, параллельный резонанс проявляется как резкое увеличение напряжения на резонаторе U . Для того, чтобы сопротивление источника напряжения R_s не сильно ухудшало добротность резонатора, его величина при исследовании параллельного резонанса должна быть намного больше резонансного сопротивления резонатора $R(Qm)^2$, то есть источник сигнала должен работать в режиме генератора тока. Входное сопротивление измерителя напряжения на пьезорезонаторе также должно соответствовать этому условию.

Общее выражение для импеданса резонатора существенно упрощается в предположении, что емкостное отношение мало ($m \ll 1$), а добротность велика ($Qm \gg 1$). Для малой области частот вблизи резонансов пьезорезонатора оно имеет следующий вид:

$$Z_1 \approx RmQ^2 (m - jQ\eta(\eta+m)) / (1 + (Q\eta)^2),$$

где $\eta = (\omega/\omega_1) - (\omega_1/\omega) \approx 2(\omega - \omega_1)/\omega_1$, $|\eta| \ll 1$ — относительное отклонение частоты от резонансного значения ω_1 . Последовательному и параллельному резонансам соответствуют значения $\eta = -m$ и $\eta = 0$. Вне области резонансов импеданс

определяется параллельной емкостью: $Z_1 \approx 1/j\omega_0 C_0$. Эту зависимость импеданса от частоты иллюстрируют графики на Рис.8.

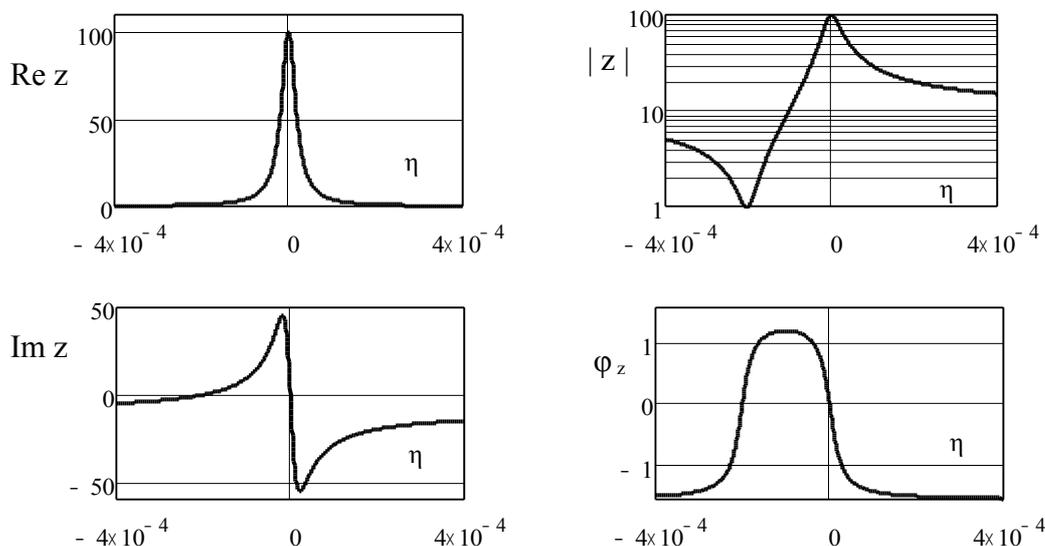


Рис.8. Частотная зависимость нормированного импеданса пьезорезонатора $z = Z_1/R$. $Q = 5 \cdot 10^4$, $m = 2 \cdot 10^{-4}$. Обратите внимание на роль параллельной емкости и емкостного отношения: при столь высокой добротности величина импеданса в резонансной области изменяется лишь от 1 до 100.

СТАБИЛИЗАЦИЯ ЧАСТОТЫ ГЕНЕРАТОРОВ С ПОМОЩЬЮ ПЬЕЗОРЕЗОНАТОРА

Стабильность частоты генерируемых колебаний является одним из основных требований, предъявляемых к генераторам. Вследствие изменения температуры и напряжения источника питания, механических вибраций и деформации деталей, дрейфа параметров активных и пассивных элементов и других причин частота генерируемых колебаний флуктуирует, то есть неконтролируемым образом отклоняется от номинального значения f_0 на некоторую величину Δf . Стабильность частоты генерируемых колебаний характеризуется относительной величиной флуктуаций $\Delta f/f$.

Применение стабильных электронных компонентов с низкой чувствительностью параметров к изменению температуры, использование схем температурной компенсации и стабилизации температуры, стабилизация источников питания и т.п. позволяет получить относительную нестабильность частоты RC- и LC-генераторов в пределах $10^{-4} - 10^{-5}$. Однако, совокупное применение указанных методов связано с большими затратами. Использование пьезонаторов позволяет существенно повысить стабильность частоты даже в простых схемах генераторов, а при применении дополнительных мер по стабилизации режима работы генератора снизить относительную величину флуктуаций частоты до уровня $\Delta f/f = 10^{-10}$.

Блок-схема генератора показана на Рис. 9. Генератор содержит усилитель и цепь положительной обратной связи с комплексными

коэффициентами передачи K и B соответственно. Коэффициент усиления сигнала при прохождении кольца (или петли) обратной связи называется петлевым усилением $G = KB$.

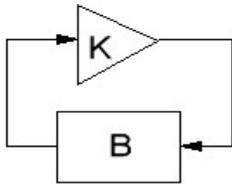


Рис. 9

Для того, чтобы генератор мог работать должны быть выполнены условия баланса фаз и баланса амплитуд. Условие баланса фаз требует, чтобы изменение фазы сигнала при прохождении по всему кольцу обратной связи было кратно 2π :

$$\varphi_K + \varphi_B = 2\pi n.$$

Здесь φ_K – сдвиг фазы в усилителе, φ_B – сдвиг фазы в цепи обратной связи, n – целое число. Это условие определяет частоту колебаний f_0 . На частоте f_0 петлевое усиление является действительной величиной:

$$G(f_0) = |G(f_0)| = |K(f_0) \cdot B(f_0)| = |K(f_0)| \cdot |B(f_0)|.$$

При прохождении сигналом кольца обратной связи его амплитуда не должна уменьшаться. Отсюда следует, что должно быть выполнено соотношение:

$$G(f_0) \geq 1.$$

Если генератор работает в режиме самовозбуждения, то в первый момент после включения генератора имеет место неравенство:

$$G(f_0) > 1. \quad (1)$$

Поэтому амплитуда колебаний начинает расти. Рост амплитуды продолжается до тех пор, пока в петле обратной связи усиление сигнала не сравняется с его ослаблением, то есть до момента, когда будет достигнуто равенство

$$G(f_0) = 1. \quad (2)$$

Начиная с этого момента амплитуда колебаний генератора принимает стационарное значение. Равенство (2) называется условием баланса амплитуд.

Как видно из соотношений (1) и (2) переход генератора от режима нарастания колебаний к стационарному режиму возможен благодаря уменьшению петлевого усиления с ростом амплитуды колебаний, что обеспечивается или за счет нелинейной амплитудной характеристики петли обратной связи или с помощью следящей системы, которая регулирует петлевое усиление. В последнем случае петля обратной связи всегда работает в линейном режиме, и генерируются гармонические колебания на частоте самовозбуждения.

В простых генераторах и в случаях, когда форма колебаний не критична, используется нелинейность амплитудной характеристики петли обратной связи. Обычно это естественная нелинейность усилителя: при достаточно большой амплитуде входного сигнала дальнейшее увеличение его амплитуды сопровождается сначала ослаблением а затем и прекращением увеличения сигнала на выходе усилителя.

Нелинейность приводит к искажению формы сигнала и изменению его частоты. Последнее обусловлено тем, что когда усилитель работает с нелинейными искажениями скорость его реакции на изменение входного сигнала замедляется. Кроме того, при большой амплитуде сигнала может сказываться ограничение на скорость нарастания выходного сигнала усилителя. Все это приводит к тому, что сдвиг фазы в усилителе изменяется, и баланс фаз выполняется на частоте, отличной от частоты самовозбуждения.

Для уменьшения нелинейных эффектов следует уменьшать петлевое усиление. С другой стороны, большое значение усиления гарантирует

самовозбуждение генератора и уменьшает вариации амплитуды колебаний из-за технологического разброса параметров и их температурного дрейфа, увеличивает скорость установления стационарной амплитуды. Поэтому на практике величину $G(f_0)$ выбирают из компромиссных соображений. Для тактовых генераторов с кварцевой стабилизацией типичное значение величины $G(f_0)$ равно 3...5.

Использование пьезорезонатора для стабилизации частоты генератора упрощенно иллюстрирует Рис.10. Неинвертирующий усилитель (сдвиг фазы, вносимый усилителем, равен 0) охвачен обратной связью через пьезорезонатор. На частоте последовательного резонанса f_0 сопротивление резонатора чисто активное, и сдвиг фазы в резонаторе также равен 0. Поэтому условие баланса фаз выполнено, и генератор самовозбуждается на частоте f_0 . Это идеальный случай.

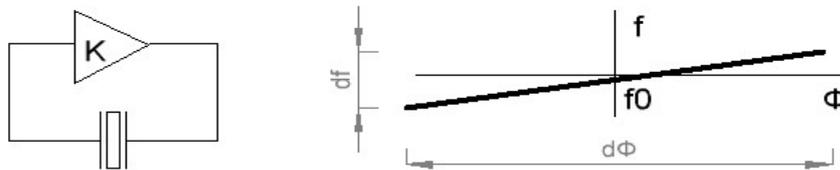


Рис.10. Генератор, стабилизированный пьезорезонатором.

В реальности активные и пассивные компоненты усилителя вносят некоторый ненулевой сдвиг фазы $d\Phi$, и этот сдвиг флукуирует, так как зависит от напряжения питания, температуры, испытывает временной дрейф. Этот неконтролируемый, флукуационный сдвиг фаз нарушает условие баланса фаз. Поэтому работа генератора на прежней частоте становится невозможной и частота генератора принимает новое значение, такое, при которой снова будет выполняться условие баланса фаз. Новое значение частоты генератора отличается от прежнего значения f_0 на некоторую величину df , такую, при которой сдвиг фаз, вносимый резонатором и равный нулю на частоте f_0 , примет значение равное по величине и противоположное по знаку неконтролируемому сдвигу фаз $d\Phi$ и таким образом скомпенсирует его и восстановит баланс фаз. Величина сдвига определяется из рассмотренной выше фазо-частотной характеристики резонатора:

$$df / f_0 = d\Phi / 2Q .$$

Отсюда видно, что чем выше добротность резонатора, тем меньшее изменение частоты df требуется для компенсации отклонения фазы на величину $d\Phi$. Поэтому чем выше добротность резонатора, тем меньше будут флукуации частоты и выше её стабильность. Добротность резонатора, включенного в электронную схему, из-за потерь во внешних по отношению к резонатору элементах схемы меньше, чем добротность изолированного резонатора. Для получения максимальной стабильности частоты это влияние стараются сделать минимальным.

Благодаря высокой добротности пьезорезонатора можно уменьшить влияние нестабильности элементов генератора настолько, что изменение частоты будет определяться стабильностью параметров самого резонатора. Основными факторами, влияющими на стабильность резонансной частоты

резонатора, являются температурная зависимость и долговременная нестабильность резонансной частоты.

Температурная зависимость частоты кварцевого резонатора зависит от типа среза кристалла. Для пластин среза АТ относительное отклонение частоты f при температуре T определяется выражением:

$$\Delta f / f_0 = \alpha \Delta T + \beta \Delta T^2 + \gamma \Delta T^3,$$

где $\Delta T = T - T_0$, $\Delta f = f - f_0$, f_0 - номинальное (базовое) значение частоты при температуре T_0 (25°C). В диапазоне температур -40...+85°C типичное отклонение частоты резонатора составляет порядка 100ppm ($10^{-6} = 1\text{ppm}$, part per million). Для остальных срезов температурное отклонение частоты имеет вид:

$$\Delta f / f_0 = \beta \Delta T^2.$$

Для часовых резонаторов, работающих на частоте 32.768 кГц, типичное значение коэффициента β составляет 0.04 ppm/(°C)².

Долговременная нестабильность частоты (старение) - это систематическое изменение базовой частоты с течением времени из-за внутренних изменений в кварцевом резонаторе. Параметр старения задается как относительное изменение базовой частоты за заданный промежуток времени. Уход частоты под влиянием старения в максимальной степени сказывается в течение первых 30 – 60 дней эксплуатации, после чего влияние этого фактора уменьшается. Кварц является очень стабильным материалом, и типичное значение старения обычных кварцевых резонаторов составляет 3...5 ppm/год в течение первого года работы.

В настоящее время промышленно выпускаются микросхемы кварцевых генераторов, которые в одном корпусе (примерные размеры корпуса для поверхностного монтажа: 5x3.5x1.5 мм) содержат резонатор, другие элементы генератора, а также могут содержать схему компенсации температурной зависимости частоты резонатора и схему электронного управления частотой. Для термокомпенсированных генераторов нестабильность частоты составляет 2...5 ppm в интервале температур -40...+85°C, долговременное изменение частоты за первый год - порядка 1 ppm.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Лабораторный стенд состоит из двух частей: схемы для изучения характеристик кварцевого резонатора, и генератора с кварцевым резонатором в цепи обратной связи. В обеих схемах установлены одинаковые кварцевые резонаторы с номинальным значением частоты 5.000 МГц.

Схема для измерения характеристик пьезорезонатора показана на Рис.12. Напряжение внешнего генератора подается на гнездо «Вход». С помощью двоянного переключателя П1 это напряжение может поступать на резонатор через резисторы 1 МОм, 10 кОм или с выхода делителя напряжения 68 Ом, 10 Ом. Тем самым изменяется импеданс источника напряжения подключенного к резонатору. Напряжение на резонаторе измеряется на гнезде «Выход U». Последовательно с резонатором включено небольшое сопротивление 10 Ом, служащее для измерения тока резонатора. Напряжение на этом сопротивлении измеряется на гнезде «Выход I». С помощью переключателя П2 параллельно пьезорезонатору могут подключаться конденсаторы 100 пФ и 51 пФ, предназначенные для изменения резонансной частоты.

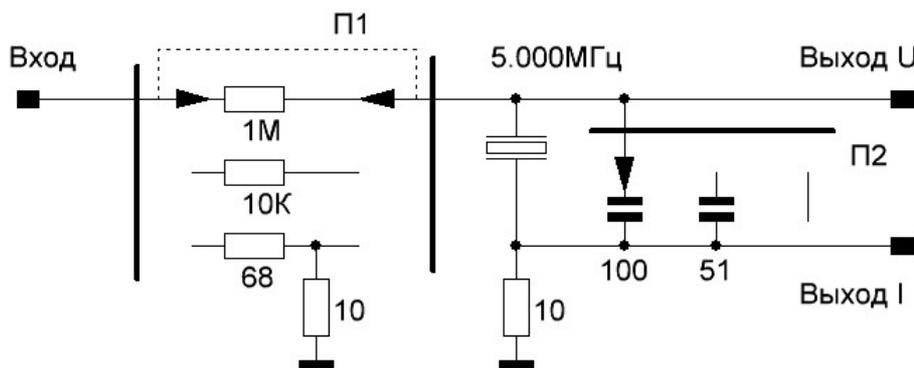


Рис.11. Схема измерения характеристик кварцевого резонатора.

Упрощенная схема генератора с кварцевым резонатором показана на Рис.13. Подобная схема (без переменного конденсатора) обычно используется для тактовых генераторов в устройствах цифровой электроники. В качестве усилителя используется логический КМОП инвертор, который снабжается резистором отрицательной обратной связи (1 МОм), задающим рабочую точку инвертора на линейном участке передаточной характеристики (Рис.13).

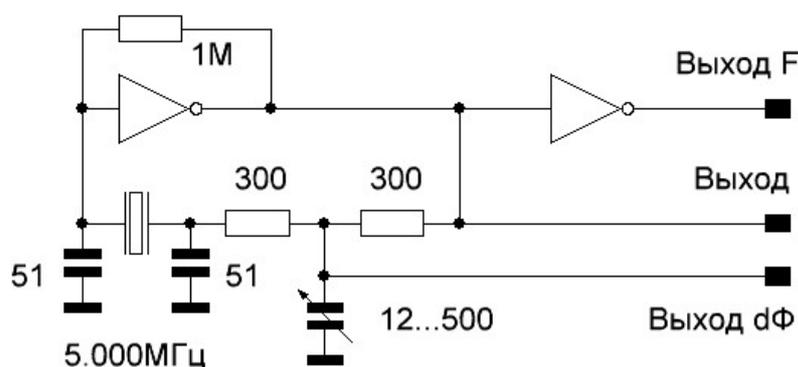


Рис.12. Схема генератора с кварцевым резонатором.

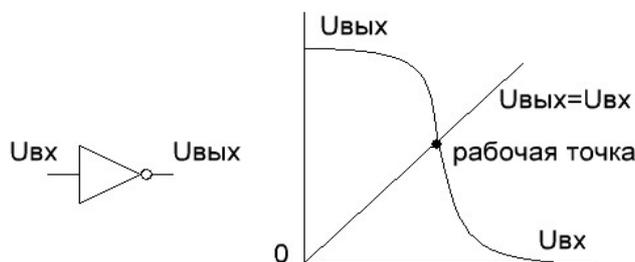


Рис.13. Характеристика логического инвертора (элемент HE) и положение рабочей точки при отрицательной обратной связи.

Штатными элементами положительной обратной связи являются резисторы (300 Ом), кварцевый резонатор и конденсаторы (51 пФ), включенные на входе и выходе резонатора. Используется последовательный резонанс резонатора. Требуемый сдвиг фаз (2π) в петле обратной связи формируется

следующим образом. Инвертирующий усилитель сдвигает фазу на π . Резисторы и конденсатор на входе резонатора, образующие интегрирующую цепочку, дают сдвиг фаз, близкий к $\pi/2$ (несколько меньше). На частоте последовательного резонанса активное сопротивление резонатора и конденсатор на выходе резонатора также образуют интегрирующую цепочку и дают сдвиг фаз, близкий к $\pi/2$. В результате на частоте последовательного резонанса получается сдвиг фаз, близкий к 2π . Поэтому с учетом высокой крутизны фазо-частотной характеристики баланс фаз выполняется практически на частоте последовательного резонанса резонатора. Амплитудное условие самовозбуждения легко выполняется за счет большого коэффициента усиления инвертора в рабочей точке (Рис.13).

В описанную выше обычную схему генератора включен переменный конденсатор 12...500 пФ, который совместно с резистором 300 Ом образует интегрирующую цепочку с регулируемой постоянной времени, которая дополнительно сдвигает фазу сигнала. С помощью этой цепочки исследуется фазо-частотная характеристика генератора. Входной сигнал фазосдвигающей цепочки измеряется на гнезде «Выход». Выходной сигнал цепочки измеряется на гнезде «Выход dФ». Частота колебаний генератора измеряется на гнезде «Выход F». Дополнительный инвертор служит для того, чтобы ослабить влияние входной емкости частотомера и емкости соединительного кабеля на работу исследуемого генератора.

УПРАЖНЕНИЯ

1. Указания по работе с аппаратурой

Измерение сигналов производится с помощью двухканального цифрового осциллографа (Rigol DS1022 или аналогичный). **Обязательно следует использовать стандартные пробники с коэффициентом деления 1/10.** Входное сопротивление пробника — 10 МОм, входная емкость — 10 пФ.

При измерении АМ сигналов рекомендуется включить режим пикового детектора (Peak detect). В случае неустойчивой синхронизации АМ сигнала можно для проведения измерения временно остановить развертку осциллографа (Run/Stop).

Для уменьшения цифрового шума осциллографа можно включить режим усреднения (Averaging), число усреднений подбирается, исходя из требуемой точности измерений и приемлимой скорости установления изображения сигнала.

Источником сигналов служит цифровой генератор (Instek SFG-2110 или аналогичный). Сигнал внешнего генератора подается на гнездо «Вход». Рекомендуемая амплитуда сигнала - 5В.

Для измерения частоты сигналов используется встроенный частотомер генератора. Для измерения частоты внешнего сигнала не забудьте переключить частотомер генератора в режим измерения внешнего сигнала.

Нормальное положение переключателя П2 - «С0», другие положения используются только по необходимости.

Для правильной интерпретации результатов измерений следует учитывать:

- конечное выходное сопротивление генератора сигналов (указано в соответствующей документации, обычно — 50 Ом),
- паразитную емкость монтажа электрической схемы (порядка 1...10 пФ),
- паразитную емкость резисторов схемы (порядка единиц пФ).

Поэтому перед выполнением работы рекомендуется для частоты 5 МГц рассчитать величину емкостного сопротивления для указанных выше емкости пробника и паразитных емкостей.

2. Измерение характеристик кварцевого резонатора

2.1. Последовательный резонанс.

Поставьте переключатель П1 в положение 10 Ом, на осциллограф подайте сигнал резонатора (гнездо «Выход U») и сигнал с последовательного сопротивления 10 Ом (гнездо «Выход I»).

Найдите частоту последовательного резонанса. На резонансной частоте определите активное сопротивление резонатора R по отношению напряжений на резонаторе и на последовательном сопротивлении 10 Ом.

Измерьте амплитудно-частотную и фазо-частотную характеристики последовательного резонанса. По этим характеристикам определите добротность резонатора. Оцените влияние сопротивлений источника сигнала и измерительной схемы на добротность резонатора.

2.2 Параллельный резонанс.

Поставьте переключатель П1 в положение 10 кОм, на осциллограф подайте сигнал резонатора (гнездо «Выход U») и выходной сигнал источника сигнала (гнездо «Вход»).

Найдите частоту параллельного резонанса. Измерьте амплитудно-частотную и фазо-частотную характеристики параллельного резонанса, определите добротность. Измерьте эти характеристики и в области последовательного резонанса.

Проведите измерения характеристик параллельного резонанса для сопротивления источника сигнала 1 МОм.

Для этого же сопротивления 1 МОм определите частоты параллельного резонанса при других значениях параллельной емкости (+51 пФ, +100 пФ). По окончании измерений верните переключатель П2 в положение «С0». Определите величину резонансного промежутка и емкостное отношение для разных значений параллельной емкости. По полученным значениям рассчитайте емкость резонатора C, по резонансной частоте определите индуктивность резонатора L. Вычислите добротность.

Сравните измеренные значения добротности параллельного резонанса с расчетным значением, объясните результаты измерения амплитудных и фазовых характеристик.

3. Фильтрация амплитудно-модулированного сигнала

Сделайте соединения, соответствующие измерению параллельного резонанса при сопротивлении источника сигнала 1 МОм. Включите на внешнем

генераторе режим внутренней амплитудной модуляции (частота модуляции — 400 Гц). Установите частоту, равную резонансной частоте, и глубину модуляции примерно 50%. Глубину модуляции сигнала генератора контролируйте с помощью осциллографа на гнезде «Вход».

Рассчитайте относительные амплитуды несущей и боковых составляющих АМ сигнала. Измерьте глубину модуляции на выходе резонатора (гнездо «Выход U»). Перестраивая частоту генератора поочередно настройте боковые составляющие на резонансную частоту и также измерьте глубину модуляции на выходе резонатора. На основе характеристик резонатора, измеренных ранее, рассчитайте ожидаемую глубину модуляции на выходе резонатора и сравните эти значения с результатами измерений.

В ходе перестройки частоты проследите и зарисуйте изменение формы амплитудной модуляции.

4. Исследование генератора, стабилизированного пьезорезонатором

Включите питание установки (иначе исследуемый генератор работать не будет), по окончании работы — выключите. Подключите частотомер к гнезду «Выход F», на осциллограф подайте входной и выходной сигналы цепочки сдвига фазы (гнезда «Выход» и «Выход dФ»).

Измерьте фазо-частотную характеристику генератора. По этой характеристике определите добротность резонатора, включенного в схему генератора. Оцените сопротивление потерь резонатора. Сравните полученное значение добротности со значениями, полученными в других упражнениях.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

- На чем основана работа пьезорезонатора?
- Нарисуйте и обоснуйте эквивалентную схему пьезорезонатора, какие значения имеют параметры кварцевых резонаторов? Чем обусловлена высокая добротность кварцевых резонаторов?
- Какие условия необходимы для измерения последовательного и параллельного резонансов? Как определить параметры резонатора по резонансным кривым?
- Что такое емкостное отношение и как оно влияет на резонансные характеристики пьезорезонатора?
- На чем основана стабилизация частоты генератора с помощью резонатора?

ЛИТЕРАТУРА

1. Основы радиифизики. Под ред. А.С.Логгинова. М.: УРСС, 1996.
2. Глюкман Л.И. Пьезоэлектрические кварцевые резонаторы. М.: Радио и связь, 1981.
3. Ярославский М.И., Смагин А.Г. Конструирование, изготовление и применение кварцевых резонаторов. М.: Энергия, 1971.