

### 3.2.5 (4.6). ВЫНУЖДЕННЫЕ КОЛЕБАНИЯ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ КОНТУРЕ

ДОПОЛНИТЕЛЬНОЕ ОПИСАНИЕ

15 августа 2016 г.

**В работе используются:** генератор звуковой частоты (ЗГ), осциллограф (ЭО), вольтметр, частотомер, ёмкость, индуктивность, магазин сопротивлений, универсальный мост.

В работе исследуются вынужденные колебания, возникающие в электрическом колебательном контуре под воздействием внешней э.д.с., гармонически изменяющейся во времени.

При подключении к контуру внешнего источника (рис. 1) в нём возникают колебания, которые можно представить как суперпозицию двух синусоид: первая — с частотой собственных колебаний контура  $\omega$  и амплитудой, экспоненциально убывающей со временем; вторая — с частотой внешнего источника  $\Omega$  и постоянной амплитудой. Со временем собственные колебания затухают, и в контуре устанавливаются вынужденные колебания. Амплитуда этих колебаний максимальна при резонансе — совпадении частоты  $\Omega$  внешнего сигнала с собственной частотой контура  $\omega_0$ .

Зависимость амплитуды установившихся колебаний от частоты внешнего напряжения носит название *резонансной кривой*.

#### А. Резонансная кривая колебательного контура

Для экспериментального исследования резонансной кривой тока в последовательном колебательном контуре (рис. 1) можно снять зависимость амплитуды напряжения на резисторе  $R$  от частоты генератора (при постоянной амплитуде выходного напряжения генератора). Но импеданс этого контура включает в себя выходной импеданс генератора. Мы должны быть уверены, что выходной импеданс генератора много меньше импеданса контура и не влияет на процессы, происходящие в контуре.

Для устранения этого влияния можно использовать схему, представленную на рис. 2: синусоидальный сигнал с генератора подаётся на параллельный колебательный контур через небольшую разделительную ёмкость  $C_1$ . Напряжение с ёмкости контура  $C$  поступает на вертикальный вход ЭО.

Зависимость амплитуды этого напряжения от частоты генератора будет практически совпадать с резонансной кривой для последовательного контура, если им-

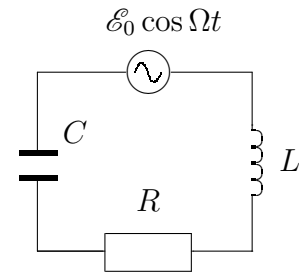


Рис. 1. Последовательный колебательный контур

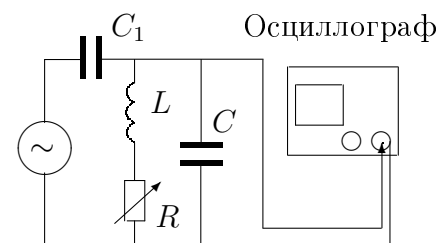


Рис. 2. Схема установки для исследования вынужденных колебаний

педансы возбуждающей и измеряющей цепей (сопротивления переменному току) намного превосходят импеданс самого контура вблизи резонанса  $Z_{\text{рез}} \approx L/(RC) = Q/(\Omega C)$ . Разделительная ёмкость  $C_1$  выбирается настолько малой, что в рабочем диапазоне частот её импеданс  $Z_{C_1} = 1/(\Omega C_1)$  много больше импеданса контура, поэтому в цепи генератора течёт ток практически с постоянной амплитудой, а колебательный контур выполняет роль нагрузочного сопротивления, которое, в свою очередь, зависит от частоты. Поскольку в резонансе сопротивление  $Z_{\text{рез}}$  параллельного контура максимально, то и напряжение на ёмкости  $C$  (неизменный ток, умноженный на максимальное сопротивление) тоже максимально. Входное сопротивление осциллографа (измеряющей цепи) достаточно велико:  $R_{\text{зо}} \approx 1 \text{ МОм}$ .

Таким образом, при выполнении условий

$$Z_{C_1} = \frac{1}{\Omega C_1} \gg |Z|_{\text{рез}} = \frac{Q}{\Omega C}, \quad R_{\text{зо}} \gg \frac{Q}{\Omega C} \quad (1)$$

и при условии, что действительная часть импеданса катушки много меньше её мнимой части, резонансная кривая в нашем контуре будет выглядеть так же, как в последовательном: максимум амплитуды при резонансе. Ширина резонансной кривой определяет важную характеристику контура — добротность.

## Б. Процессы установления и затухания колебаний в контуре

Добротность контура может быть определена и другими способами, например, по скорости нарастания амплитуды вынужденных колебаний при резонансе или по скорости затухания свободных колебаний.

Нарастание и затухание колебаний (рис. 3)

можно наблюдать на экране осциллографа, если на контур подаются цуги — отрезки синусоиды, разделённые интервалами, в течение которых сигнал отсутствует. Чем выше добротность, тем медленнее нарастают и медленнее затухают колебания в контуре. Количественные оценки можно сделать, если определить логарифмический декремент затухания по скорости нарастания или затухания колебаний. В условиях резонанса огибающая затухающих колебаний — это перевёрнутая огибающая нарастающего участка, поэтому при расчёте логарифмического декремента по затуханию нет необходимости использовать амплитуду установившихся колебаний  $U_0$ , которая в контуре с высокой добротностью иногда не успевает установиться за время продолжительности цуга.

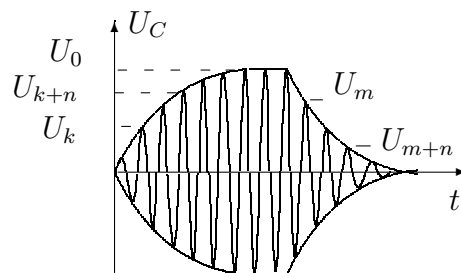


Рис. 3. Нарастание и затухание вынужденных колебаний

**Экспериментальная установка.** Схема установки для исследования вынужденных колебаний приведена на рис. 4. Колебательный контур состоит из ёмкости  $C = 0,1$  мкФ, индуктивности  $L = 100$  мГн и переменного сопротивления  $R$ .

Синусоидальное напряжение от звукового генератора проходит через частотомер, позволяющий измерять рабочую частоту с высокой точностью. В корпус частотомера вмонтирован генератор цугов — электронное реле, разрезающее синусоиду на периодически повторяющиеся цуги — отрезки синусоиды, содержащие 32 или 40 периодов колебаний.

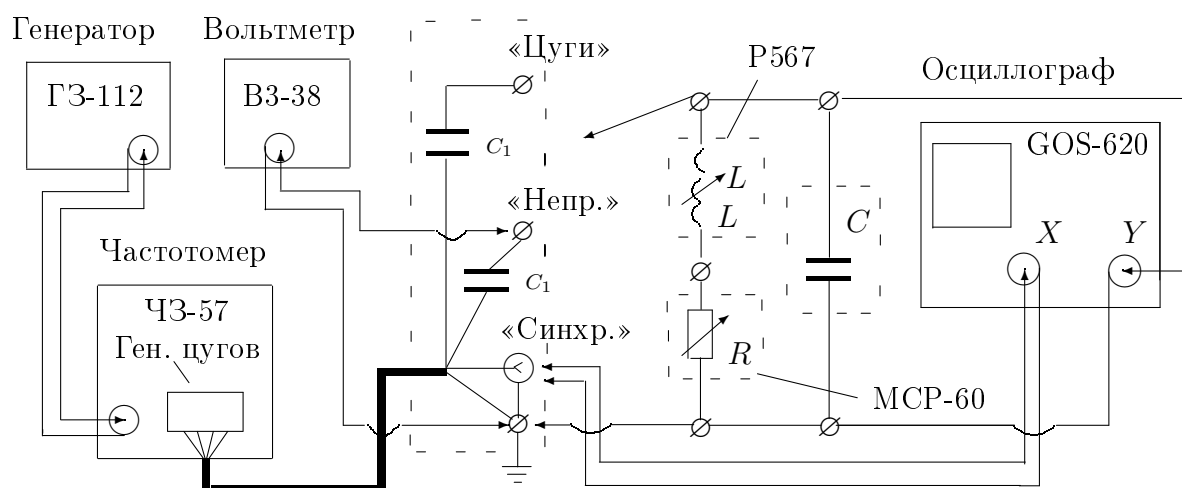


Рис. 4. Схема установки для исследования вынужденных колебаний

После частотомера через небольшую ёмкость  $C_1 \approx 600$  пкФ сигнал поступает на клеммы, смонтированные на отдельной панельке. При подключении контура к клеммам « $\perp$ » (земля) и «Непр» на контур подаётся непрерывный сигнал — синусоида; если контур подключён к клеммам « $\perp$ » и «Цуги» — на контур поступают отрезки синусоиды.

Для наблюдения за процессом колебаний напряжение с ёмкости подаётся на вход осциллографа. Чтобы картина на экране была устойчивой, частота развёртки осциллографа принудительно синхронизируется с частотой повторения цугов. Для этого на генератор развёртки ЭО подаются следующие с частотой повторения цугов управляющие импульсы, которые вырабатываются в блоке электронного реле (клемма «Синхр», смонтированная на панельке). Для измерений напряжения на ёмкости используется электронный вольтметр.

### ЗАДАНИЕ

В работе предлагается при двух значениях сопротивления магазина ( $R = 0$  и  $100$  Ом) исследовать резонансные кривые и определить по ним добротность контура; затем рассчитать добротность, определив логарифмический декремент затухания при нарастании и при затухании колебаний.

## I. Подготовка приборов к работе

1. Соберите схему согласно рис. 4 и подключите контур к клеммам « $\perp$ » и «Непр». Включите приборы в сеть.

а. Установите частоту выходного сигнала генератора  $\nu \approx 10^3$  Гц: ручка «ЧАСТОТА ПЛАВНО» — на отметке  $(15 \div 20)$ , «МНОЖИТЕЛЬ ЧАСТОТЫ» —  $10^2$ , «РЕГУЛИРОВКА НАПРЯЖЕНИЯ» — в среднем положении, тумблер выбора режима работы — в положении « $\sim$ » (синусоида).

Для измерения частоты в автоматическом режиме подготовьте частотомер: нажмите нижнюю кнопку левого вертикального ряда (автоматический режим), кнопку «ЧАСТОТА» правого вертикального ряда (режим измерения частоты), кнопку « $10^3$ » верхнего горизонтального ряда (точность измерения частоты — 0,1%).

б. Настройте осциллограф, руководствуясь техническим описанием, расположенным в конце папки.

в. Чтобы проверить работоспособность источника питания, отключите магазин сопротивлений от панельки и подключите вход « $Y$ » ЭО к клемме «Непр» или к клемме «Цуги». Увидев на экране непрерывную синусоиду или цуги, можно вернуться к схеме на рис. 4.

г. Выведите до нуля сопротивление  $R$  магазина. Установите на магазине индуктивностей значение  $L = 100$  мГн (убедитесь, что включена только крайняя левая декада).

## II. Исследование резонансных кривых

2. Рассчитайте резонансную частоту контура  $\nu_0 = 1/(2\pi\sqrt{LC})$ .

3. Изменяя частоту генератора вблизи резонансной и наблюдая за синусоидой на экране ЭО, убедитесь, что в резонансе амплитуда колебаний максимальна. Подберите частоту развёртки осциллографа и амплитуду синхронизации, при которых картина неподвижна.

а. С помощью переключателя пределов шкалы вольтметра и ручки регулировки выходного напряжения генератора подберите условия, при которых стрелка вольтметра при резонансе отклоняется на всю шкалу (удобно вести измерения, когда максимальное значение напряжения кратно десяти).

б. Меняя частоту генератора в обе стороны от резонансной, снимите зависимость показаний вольтметра  $U$  от показаний частотомера  $\nu$ . Расчёт добротности ведётся на уровне 0,7 от резонансной амплитуды, поэтому измерения следует вести до тех пор, пока амплитуда сигнала упадёт до величины (0,3–0,4) от резонансной.

в. Установите на магазине сопротивлений значение  $R = 100$  Ом и повторите измерения (п.3а и 3б). Закончив, отключите вольтметр от сети.

## III. Процессы установления и затухания колебаний

4. Подключите контур к клемме «Цуги» (и « $\perp$ »). Выведите до нуля сопротивление магазина.

а. Установите на генераторе резонансную частоту. Подберите частоту развёртки ЭО, при которой на экране укладывается один цуг колебаний.

Убедитесь, что огибающая затухающих колебаний это перевёрнутая огибающая нарастающего участка. Если они заметно отличаются (искажения может внести реле), следует уменьшить амплитуду сигнала с генератора.

б. Для расчёта добротности по скорости нарастания амплитуды измерьте амплитуды двух колебаний  $U_k$  и  $U_{k+n}$ , разделённых целым числом периодов  $n$ , и амплитуду установившихся колебаний  $U_0$  (см. рис. 3).

Перед началом измерений заземлите канал Y, чтобы уточнить положение оси X — начала отсчёта амплитуды.

Можно увеличить амплитуду, сместив горизонтальную ось симметрии цуга в нижнюю часть экрана. Расчёт будет тем точнее, чем больше отличаются друг от друга все три амплитуды, а минимальная не должна быть меньше, чем 6–8 мм.

Проведите измерения для 3–4-х пар амплитуд.

в. Для определения добротности по скорости *затухания* измерьте две амплитуды, разделённые целым числом периодов (для 3–4-х пар).

г. Повторите измерения пп. 4б и 4в для  $R = 100 \text{ Ом}$ .

5. Сместите частоту генератора с резонансного значения и получите на экране картину биений. Зарисуйте и объясните эту картину.

6. Отключите приборы от сети и разберите схему.

7. Измерьте активное сопротивление  $R_L$  и индуктивность  $L$  магазина индуктивностей с помощью измерителя LCR на частотах 50 Гц, 500 Гц и 1500 Гц.

#### IV. Обработка результатов

1. Постройте на одном графике резонансные кривые в координатах  $U/U_0 = f(\nu/\nu_0)$ , где  $U_0$  — напряжение при резонансной частоте  $\nu_0$ .

Определите добротность по формуле  $Q = \omega_0/(2\Delta\Omega)$ . Сравните теоретическое и экспериментальное значения резонансной частоты.

2. Рассчитайте добротность контура по скорости нарастания и затухания колебаний.

3. Рассчитайте теоретическое значение добротности через параметры контура  $L$ ,  $C$  и  $R$ .

4. Сведите результаты определения  $Q$  в таблицу:

$R \text{ Ом}$	$R_{\text{конт}}$	$Q$			
		$\nearrow$	$\leftarrow$	$\searrow$	$f(LCR)$
0					
100					

5. Оцените погрешности и сравните результаты расчётов.

15-VIII-2016 г.