

3.4.6 (147). ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ РЕЗОНАНС

ДОПОЛНИТЕЛЬНОЕ ОПИСАНИЕ

6-X-2014

Экспериментальная установка. Для изучения параметрических колебаний используется «параметрон» — установка с нелинейной индуктивностью, схема которой представлена на рис. 2. «Параметрон» включает в себя две тороидальные катушки, интегрирующую ячейку r_0 , C_0 , резисторы r_1 и r_2 , ключи K_1 и K_2 и колебательный контур. Колебательный контур состоит из двух последовательно соединённых индуктивностей L_1 и L_2 , ёмкости C и сопротивлений R_M и r_2 . На рисунке контур заключён в пунктирную рамку.

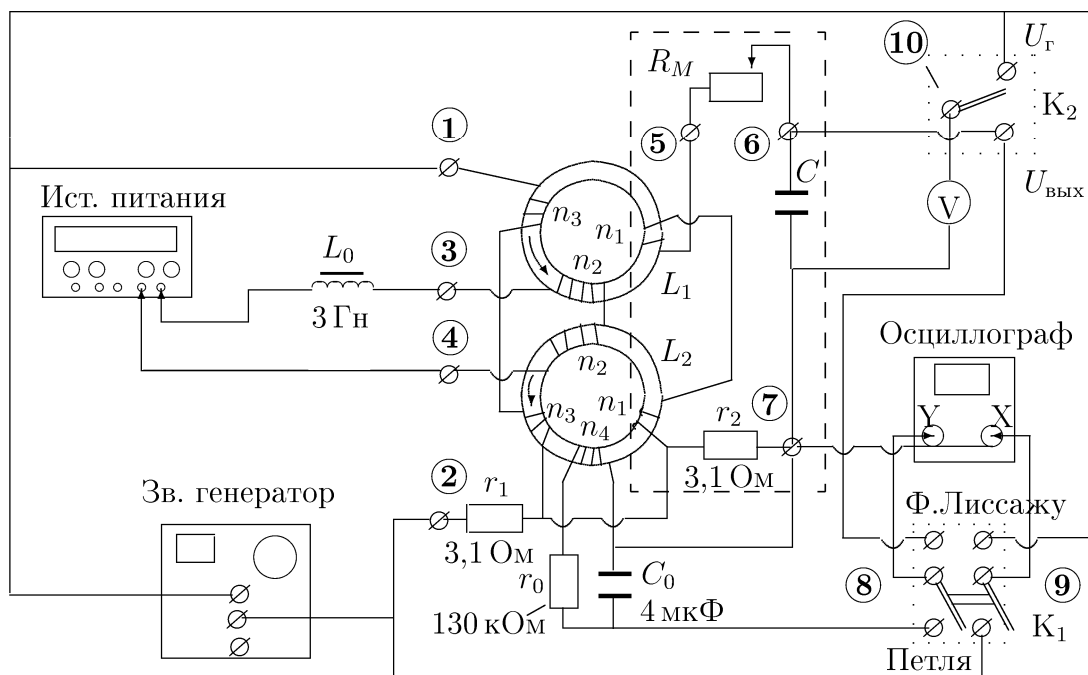


Рис. 2. Схема установки

Обе катушки L_1 и L_2 с одинаковым числом витков n_1 намотаны на одинаковые тороидальные ферромагнитные сердечники. Длина каждого сердечника — l , сечение — S , магнитная проницаемость — μ . С помощью теоремы о циркуляции можно показать, что общая индуктивность катушек

$$L = 2\mu_0\mu \frac{n_1^2 S}{l}. \quad (5)$$

Постоянный ток подмагничивания от источника постоянного напряжения GPS-2303 (30 В) проходит через две последовательно соединённые обмотки с числом витков n_2 . Ток регулируется ручками источника питания. Индуктивность $L_0 = 3$ Гн поставлена для того, чтобы увеличить сопротивление цепи переменному току. Переменный ток в этой цепи практически отсутствует, постоянный измеряется амперметром источника питания.

Переменный ток подмагничивания, создаваемый генератором звуковых частот, проходит через последовательно соединённые обмотки n_3 . Обмотка n_4 имеет всего на одном из сердечников. Она служит для измерения полного магнитного

потока, проходящего через сердечник. Обмотки n_1 соединены так, что возникающие в них ЭДС имеют противоположные знаки, поэтому в колебательном контуре не возникают токи, имеющие частоту звукового генератора.

Для измерения напряжений в схему включён вольтметр переменного тока. При переключении ключа K_2 в верхнее положение вольтметр измеряет напряжение U_{Γ} на выходе генератора, при переключении в нижнее — выходное напряжение $U_{\text{вых}}$ на ёмкости C .

Осциллограф позволяет наблюдать петлю гистерезиса, фиксировать момент возникновения и срыва параметрических колебаний и определять их частоту с помощью фигур Лиссажу.

При верхнем положении ключа K_1 на вход X осциллографа подаётся падение напряжения между точками 1 и 7, практически равное напряжению $U_{3\Gamma}$ на генераторе (падением напряжения на резисторах r_1 и r_2 можно пренебречь, поскольку оно мало по сравнению с $U_{3\Gamma}$). На вход Y подаётся напряжение с ёмкости C колебательного контура. По фигурам Лиссажу, возникающим на экране, можно сравнить частоту накачки (частоту генератора) с частотой колебаний контура.

При нижнем положении ключа K_1 на вход Y подаётся напряжение U_Y с ёмкости C_0 . Эта ёмкость входит в состав интегрирующей цепочки $r_0 C_0$, подключённой к обмотке n_4 . ЭДС индукции, возникающая в обмотке n_4 , пропорциональна dB/dt :

$$U_4 = n_4 S \frac{dB}{dt}.$$

Параметры интегрирующей цепочки подобраны так, что сопротивление r_0 заметно превышает сопротивление обмотки n_4 и сопротивление ёмкости:

$$r_0 \gg \frac{1}{\omega_0 C_0}.$$

При этом условии ток в цепочке пропорционален dB/dt :

$$I_0 = \frac{U_4}{r_0} = \frac{n_4 S}{r_0} \frac{dB}{dt},$$

а напряжение U_Y на конденсаторе C_0 пропорционально B :

$$U_Y = \frac{1}{C_0} \int I_0 dt = \frac{1}{r_0 C_0} \int U_4 dt = \frac{n_4 S}{r_0 C_0} B. \quad (6)$$

На вход X осциллографа подаётся сумма падений напряжения на резисторах r_1 и r_2 . Напряжение, возникающее на r_1 , пропорционально току, протекающему через обмотки n_3 от генератора. В отсутствие параметрических колебаний через r_2 ток не течёт, и на вход X подаётся напряжение U_X , пропорциональное переменному току подмагничивания I , которым определяется поле H в сердечнике:

$$H = \frac{n_3 I}{l}.$$

Следовательно,

$$U_X = Ir_1 = \frac{lr_1}{n_3} H. \quad (7)$$

Таким образом, в отсутствие параметрических колебаний на экране появляется кривая гистерезиса ферромагнитного сердечника. При возникновении колебаний в контуре через r_2 начинает проходить ток, кривая резко искажается и для измерений непригодна. Но искажение петли позволяет отметить момент возникновения параметрических колебаний и даёт возможность измерить параметры петли при подходе к моменту самовозбуждения.

Зарисовав с экрана на кальку петлю гистерезиса, соответствующую границе возбуждения параметрических колебаний, можно экспериментально проверить справедливость формулы (3) — условия самовозбуждения. Из (5) и (4) следует:

$$\Delta L = L_{\max} - L_{\min} = 2 \frac{\mu_0 n_1^2 S}{l} (\mu_{\max} - \mu_{\min}) = 2 \frac{n_1^2 S}{l} \left[\left(\frac{dB}{dH} \right)_{\max} - \left(\frac{dB}{dH} \right)_{\min} \right]. \quad (8)$$

Производные dB/dH следует взять из чертежа, проведя касательные к кривой $\mathbf{B}(\mathbf{H})$ слева и справа от излома петли. Для расчёта масштабов выразим \mathbf{B} и \mathbf{H} через напряжения U_Y и U_X . Подставляя (6) и (7) в (8), получим

$$\Delta L = 2r_0 C_0 r_1 \frac{n_1^2}{n_3 n_4} \left[\left(\frac{\Delta U_Y}{\Delta U_X} \right)_{\max} - \left(\frac{\Delta U_Y}{\Delta U_X} \right)_{\min} \right]. \quad (9)$$

В нашей установке $n_1 = n_3 = n_4$, так что $\frac{n_1^2}{n_3 n_4} = 1$. Параметры r_0 , C_0 и r_1 приведены на схеме.

ЗАДАНИЕ

В работе предлагается с помощью фигур Лиссажу найти критическое сопротивление и определить частоту параметрических колебаний контура; с помощью кривых гистерезиса определить критическое сопротивление и проверить условие самовозбуждения; по кривой зависимости напряжения на конденсаторе от частоты определить резонансную частоту и индуктивность колебательного контура.

1. Подготовка приборов к работе

1. Соберите схему согласно рис. 3 [источник подключите к клеммам $CH_1(\pm)$]. Сравните схему, изображённую на рис. 3, со схемой на рис. 2.

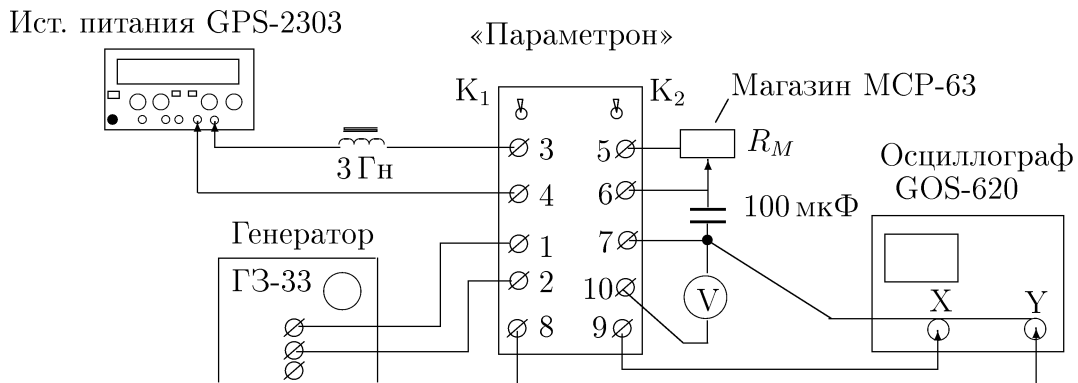


Рис. 3. Блок-схема установки

Установите ручку «Регулировка выходного напряжения» звукового генератора на минимальное напряжение, включите генератор в сеть и дайте ему прогреться.

Подготовьте осциллограф согласно техническому описанию (ТО), расположенному на установке.

- Установите ёмкость $C = 100$ мкФ, сопротивление магазина $R_M = 0$. Поставьте обе ручки (6) и (7) регулировки источника питания на минимум выходного напряжения (см. техническое описание источника). Включите источник питания GPS-2303 кнопкой (1) – «POWER»; нажмите левую верхнюю кнопку (28) – при этом должен загореться зелёный индикатор; установите ручку регулировки тока (7) на максимум; с помощью ручки (6) регулировки U установите постоянный ток подмагничивания $I \simeq 80$ мА.

Переменный ток подмагничивания установите с помощью генератора: частота $\nu = 150$ Гц; тумблер «Внутр. нагрузка» – в положение «Выкл»; выходное напряжение на вольтметре генератора $U_{зг} = 15$ В (пределы измерения вольтметра изменяются переключателем «Внешняя нагрузка»).

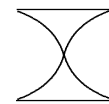
II. Возбуждение параметрических колебаний. Фигуры Лиссажу

- Ключ K_1 параметрона поставьте в положение «Фигура Лиссажу». Увеличивая постоянный ток подмагничивания, определите момент возникновения параметрических колебаний (при $U_{зг} = 15$ В) по появлению на экране ЭО фигуры Лиссажу, имеющей одно самопересечение (рис. 4а).

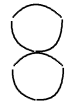
Оцените интервал ΔI , внутри которого эти колебания существуют.

Используя показания генератора, определите по виду фигуры Лиссажу частоту параметрических колебаний.

- Убедитесь в том, что Вы наблюдаете именно параметрические колебания, внося в контур дополнительное затухание – увеличивая сопротивление магазина R_M . Колебания, возбуждаемые внешним источником, при увеличении затухания постепенно уменьшаются по амплитуде, в то время как параметрические колебания при критическом сопротивлении $R_{кр}$ срываются.
- Определите $R_{кр}$ для токов: $I_1 = 100$ мА и $I_2 = 160$ мА. Увеличивая сопротивление магазина, следите за постоянством напряжения на генераторе ($U_{зг} = 15$ В).
- При фиксированных значениях: $I = 160$ мА, $U_{зг} = 15$ В, $R_M = 0$ – проследите, как изменяется фигура Лиссажу при уменьшении частоты от 150 до 50 Гц. Определите резонансную частоту и частоту срыва колебаний.



а) 150 Гц



б) 60 Гц

Рис. 4. Фигуры Лиссажу при отношении частот 1:2 (масштабы разные)

III. Петля гистерезиса. Определение индуктивности

- Переключите ключ K_1 в положение «Петля гистерезиса».

Снова задайте параметры: $I = 160$ мА, $R_M = 0$, $n = 150$ Гц, $U_{зг} = 15$ В. Подберите чувствительность осциллографа так, чтобы на экране была видна петля гистерезиса в удобном масштабе.

При наличии параметрических колебаний петля гистерезиса имеет сложную форму. Увеличьте сопротивление R_M до критического. В этом случае параметрические колебания срываются и на экране видна частная петля (на рис. 1 она выделена пунктиром).

Чтобы посмотреть форму полной петли, уберите сопротивление R_M и ток I до нуля. При увеличении напряжения $U_{зг}$ до 20–25 вольт полная петля становится предельной.

8. Увеличивая постоянный ток, проследите, как меняется форма петли в момент возникновения и срыва параметрических колебаний, как перемещается частная петля.
9. Для тока $I = 160$ мА, $U_{зг} = 15$ В определите $R_{кр}$, выводя параметрон на самую границу колебаний.
10. При сопротивлении чуть больше критического зарисуйте петлю. Для этого установите ручки плавной регулировки усиления по каналам X и Y в крайнее правое положение (до щелчка), тогда цифры возле дискретных переключателей усиления задают масштабы изображения K_X и K_Y в мВ/дел.

Подберите коэффициенты усиления так, чтобы петля занимала практически весь экран. Зарисуйте на кальку петлю, оси координат, деления шкалы и запишите на ней рабочие параметры схемы и коэффициенты K_X и K_Y .

IV. Зависимость выходного напряжения параметрона от частоты

11. Уберите сопротивление магазина до нуля и поставьте ключ K_2 в положение « $U_{вых}$ ». Снимите зависимость напряжения на ёмкости C колебательного контура $U_{вых} = f(\nu)$, уменьшая частоту от 150 Гц до срыва колебаний. Напряжение $U_{зг} = 15$ В и ток $I = 160$ мА следует поддерживать постоянными.

Обработка результатов

1. Определите по рисунку максимальный и минимальный наклоны касательных ($\Delta U_Y / \Delta U_X$) и рассчитайте величину ΔL по формуле (9).

Проверьте справедливость условия (3). Сопротивление контура включает в себя сопротивление магазина и сопротивление параметрона между точками 5 и 7, указанное на установке.

2. Постройте график $U_{вых} = f(\nu)$ и определите по нему резонансную частоту контура ν_0 . Рассчитайте индуктивность контура ($\Omega^2 = 1/LC$, $\Omega = 2\pi\nu_0$) и проверьте справедливость условия (3) на этой частоте, полагая $\Delta L \simeq L$.

Исправлено 6-X-2014 г.