

УДК 621.37

ЛИНЕАРИЗАЦИЯ РЕЗОНАНСНОГО КОНТУРА С ВАРИКАПАМИ

М. П. Савченко, заведующий кафедрой телекоммуникаций Балтийского Федерального университета (БФУ) им. И. Канта, к.т.н.;

savchenkomp@mail.ru

О. В. Старовойтова, старший преподаватель кафедры телекоммуникаций БФУ им. И. Канта; ostar39@mail.ru

Предлагается ввести компенсацию влияния амплитуды сигнала на среднюю за период колебания емкость варикапов путем коррекции напряжения смещения. В результате устраняется асимметрия амплитудно-частотной характеристики, присущая нелинейному контуру.

Ключевые слова: резонансный контур, варикап, встречно-последовательное соединение варикапов, амплитудно-частотная характеристика нелинейного резонансного контура, стабилизация частоты настройки резонансного контура.

Введение. В частотно-избирательных цепях широко применяются резонансные контуры с электронной перестройкой частоты варикапами. Поскольку варикапы являются нелинейными элементами, в контуре образуются гармонические составляющие тока, отрицательно влияющие на выходной сигнал. Для ослабления нелинейности контура используется встречно-последовательное соединение (ВПС) варикапов [1], при котором четные гармоники тока в контуре взаимно уничтожаются. Исследования [2] показали, что данный способ не ликвидирует зависимость постоянной составляющей емкости ВПС от амплитуды напряжения на варикапах, и резонансная частота контура

меняется с изменением уровня сигнала. Контур остается нелинейным.

В статье предлагается способ компенсации влияния амплитуды колебаний на емкость варикапов, позволяющий устранить амплитудно-частотное преобразование, т.е. линеаризовать контур с варикапами.

Характеристики контура с ВПС варикапами. На рис. 1 приведены полученные экспериментальным путем амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) контура с ВПС варикапами 2В110В при напряжении смещения $E = 2$ В. По вертикальной оси отложены эффективные значения амплитуды колебаний U на контуре. По горизонтальной оси — отклонение Δf от собственной частоты контура f_0 при $U \approx 0$. Пунктирная линия отражает изменение резонансной частоты $f_{рез}$ контура с ВПС. Амплитуда колебаний на контуре с ВПС при резонансе обозначена через U_M .

Из рисунка видно, что при уменьшении U_M частота $f_{рез}$ приближается к f_0 , а частотные характеристики становятся симметричными относительно f_0 , как в линейном контуре. При достаточно больших амплитудах U_M в некоторой области частот (заштриховано) амплитуда колебаний на контуре оказывается многозначной, что приводит к возникновению гистерезисных явлений и скачков амплитуды при плавном изменении частоты. Выражение, связывающее амплитуду и частоту колебаний в контуре с ВПС варикапами, имеет вид:

$$\frac{\Delta f}{f_0} = \pm \frac{1}{2Q} \sqrt{\frac{U_M^2}{U^2} - 1} - \frac{1}{32} \sigma_y x_m^2, \quad (1)$$

где Q — добротность контура; $\sigma_y = C_{ВПС} / (C_{\pi} + C_{ВПС})$ — доля емкости ВПС в полной емкости контура; $x_m = U_m / (E + \varphi_k)$ — относительная амплитуда колебания на одном варикапе ($U_m = U/2$); φ_k — контактная разность потенциалов p - n перехода варикапа. Область возможных значений $0 \leq x_m \leq 1$. Первое слагаемое в правой части (1) описывает линейный контур без варикапов, второе — изменение резонансной частоты $\Delta f_{рез} = f_{рез} - f_0$ в контуре с ВПС (пунктирная линия на рис. 1).

Граничной характеристикой называется АЧХ контура с нелинейной емкостью, за которой начинается гистерезис. Очевидно, что амплитуда U_M для граничной характеристики является максимально допустимым значением, т.е. предельным в контуре с варикапами — $U_{пр}$. Используя результаты работы [3], выражение для относительной предельной амплитуды можно представить как

$$(x_m)_{пр} = \frac{U_{пр}}{2(E + \varphi_k)} = \frac{4,96}{\sqrt{\sigma_y Q}}. \quad (2)$$

Способы линеаризации контура с варикапами. Эффективным способом «линеаризации» контура и повышения $U_{пр}$ является последовательное включение N пар ВПС варикапов [4, 5], как показано на рис. 2. Это позволяет при фик-

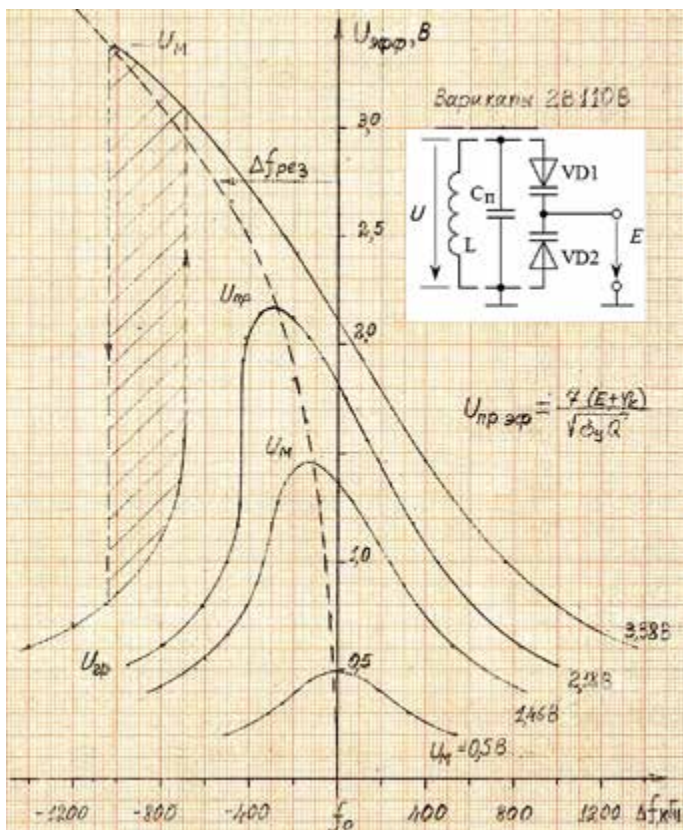


Рис. 1. АЧХ контура с ВПС варикапами: $f_0 = 62000$ кГц, $Q = 110$, $\sigma_y = 0,57$, $E = 2$ В, $\varphi_k = 0,6$ В, $C_{ВПС} = 15,15$ пФ

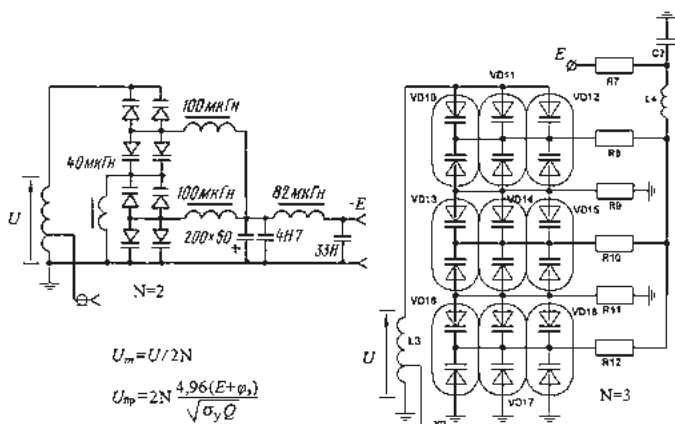


Рис. 2. Схемы включения пар ВПС варикапов

сированной амплитуде в N^2 раз уменьшить $\Delta f_{\text{рез}}$ и в N раз увеличить $U_{\text{пр}}$ при фиксированном смещении, или наоборот уменьшить в N раз смещение при фиксированной амплитуде $U_{\text{пр}}$. Однако полностью устранить зависимость $f_{\text{рез}}$ от U таким способом невозможно. Как следует из (1) и (2), для предельной амплитуды отношение

$$\frac{\Delta f}{f_0} = -\frac{3}{4Q}.$$

С целью устранения зависимости частоты настройки резонансного контура от амплитуды колебаний на варикапах предлагается ввести коррекцию напряжения смещения на такую величину ΔE , чтобы средняя за период колебания емкость ВПС оставалась постоянной при изменении амплитуды колебаний на контуре (рис. 3).

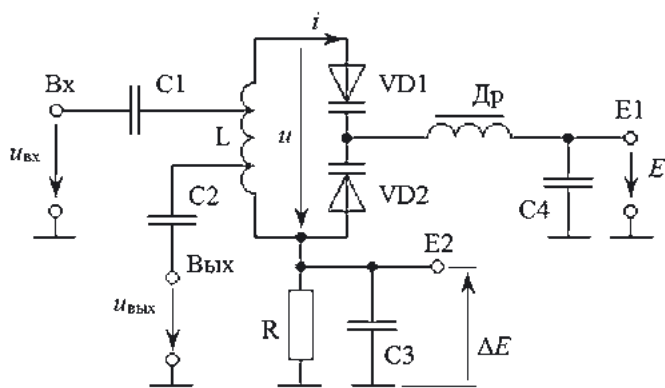


Рис. 3. Схема включения напряжения компенсации ΔE

Связь напряжения компенсации с амплитудой колебаний. Варикап в контуре находится под воздействием постоянного напряжения смещения E и гармонического напряжения с амплитудой U_m

$$u_{\text{в}} = E - U_m \cos \omega t. \quad (3)$$

Эквивалентная емкость ВПС идентичных варикапов по первой гармонике может быть представлена [2] в общем случае выражением

$$C_{\text{э}}(E, U_m) = C_{0\text{э}}(E) f(x_m), \quad (4)$$

где $C_{0\text{э}}(E)$ — эквивалентная емкость ВПС варикапов при $U_m = 0$; $f(x_m)$ — функция, определяемая вольт-фарадной характеристикой варикапов. Для $x_m = 0$ функция $f(x_m) = 1$. Увеличение амплитуды U_m при $E = \text{const}$ вызывает рост x_m и $f(x_m)$. Соответственно растет эквивалентная емкость ВПС, что, в свою очередь, приводит к уменьшению резонансной частоты контура

$$\omega_p = 1/\sqrt{LC_{\text{э}}}.$$

Для того чтобы ω_p оставалась постоянной напряжение смещения E должно изменяться на такую величину ΔE , чтобы эквивалентная емкость ВПС не менялась при изменении U_m . Связь между U_m и ΔE найдем из уравнения

$$C_{\text{э}}(E_0) = C_{\text{э}}(E, U_m), \quad (5)$$

где E_0 — смещение на варикапах при $U_m \approx 0$, а $E = E_0 - \Delta E$.

Для варикапов с резким p - n переходом, согласно [2], эквивалентная емкость ВПС идентичных варикапов по первой гармонике описывается выражением

$$C_{\text{э}}(E, U_m) = C_{0\text{э}}(E) \left(1 - \frac{1}{8} \chi_m^2\right)^{-1/2}, \quad (6)$$

где $C_{0\text{э}}(E) = 0,5C_0(E)$; $C_0(E)$ — емкость одного варикапа в отсутствие переменного напряжения. Согласно [6], варикапы этого типа хорошо аппроксимируются выражением

$$C_0(E) = C_{\varepsilon} \left(\frac{\varepsilon + \varphi_k}{E + \varphi_k}\right)^{1/2}, \quad (7)$$

где C_{ε} — емкость p - n перехода, измеренная при значении напряжения $E = \varepsilon$ (указывается в паспорте варикапа).

Для $U_m \approx 0$ при $E = E_0$ из (6) следует

$$C_{\text{э}}(E_0) = C_{0\text{э}}(E_0). \quad (8)$$

Уравнение (5) с учетом (6), (8) примет вид

$$C_{0\text{э}}(E_0) = C_{0\text{э}}(E) \left(1 - \frac{1}{8} \chi_m^2\right)^{-1/2}. \quad (9)$$

Учитывая, что $E_0 = E + \Delta E$, из выражения (7) имеем

$$\begin{aligned} C_{0\text{э}}(E + \Delta E) &= \frac{1}{2} C_{\varepsilon} \left(\frac{\varepsilon + \varphi_k}{E + \Delta E + \varphi_k}\right)^{1/2} = \\ &= C_{0\text{э}}(E) \left(1 + \frac{\Delta E}{E + \varphi_k}\right)^{-1/2}. \end{aligned} \quad (10)$$

Подставив (10) в (9), получим

$$\frac{\Delta E}{E + \varphi_k} = -\frac{1}{8} \chi_m^2. \quad (11)$$

Принимая во внимание обозначение для x_m из (11), получим

$$\Delta E = -\frac{1}{16} \chi_m U, \text{ или } \Delta E = -\frac{1}{16} \frac{U_{\text{эфф}}^2}{E + \varphi_k}. \quad (12)$$

Справедливость выражения (12) подтверждена на практике. В эксперименте для заданного значения амплитуды U рассчитывалось напряжение поправки ΔE и подавалось на вход $E2$ схемы рис. 3. Затем подбирались частота входного сигнала, на которой амплитуда колебаний совпадала с заданным значением. На рис. 4 сплошной линией построена граничная характеристика, приведенная на рис. 1 для контура с ВПС без компенсации, штрихпунктирной — характеристика с компенсацией. Штрихпунктирная линия практически симметрична, как в линейном контуре.

Автоматическая стабилизация частоты настройки контура с варикапами. На рис. 5 представлена одна из возможных схем [7] автоматической компенсации влияния амплитуды колебаний на частоту настройки контура с варикапами, реализующая выражение (12). Колебательный контур включает катушку индуктивности L и соединенные встречно-последовательно варикапы $VD1, VD2$. Для управления

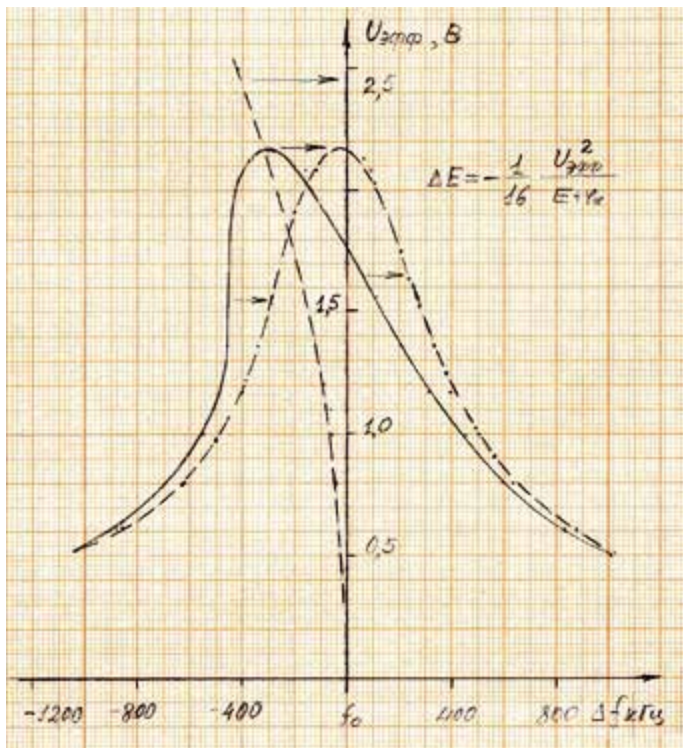


Рис. 4. АЧХ контура с ВПС без компенсации и с компенсацией влияния амплитуды колебаний на варикапы

варикапами по постоянному напряжению предусмотрены две отдельные цепи с входами в точках E1 и E2 с сопротивлениями подачи напряжения смещения на варикапы Z1(ω) и Z2(ω) соответственно. Для постоянного тока и модулирующих частот Z1 и Z2 имеют конечную величину, а для тока с частотой колебаний в контуре ω сопротивление Z1(ω) = ∞, Z2(ω) = 0.

Входной сигнал u_вх поступает в контур через разделительную емкость C1 и создает в нем гармонические колебания u с амплитудой напряжения на контуре U(ω). Выходной сигнал u_вых с амплитудой U_вых = kU (k < 1) отводится через емкость C2. Этот сигнал детектируется амплитудным де-

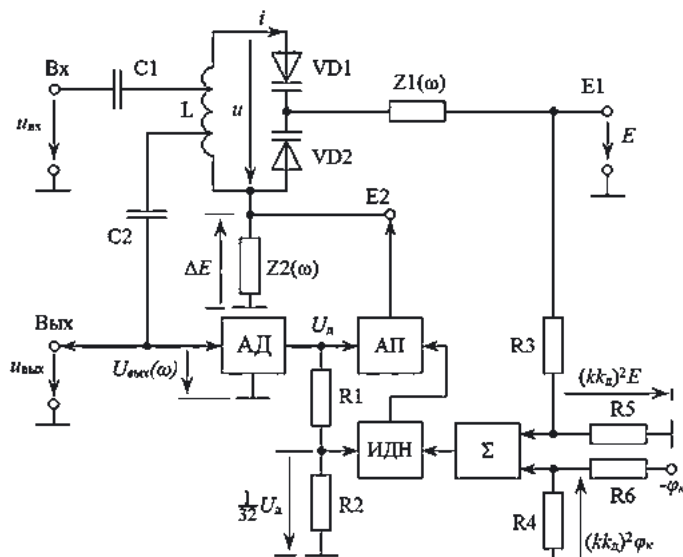


Рис. 5. Блок-схема устройства автоматической стабилизации частоты настройки резонансного контура для варикапов с резким p-n переходом: АД — амплитудный детектор; ИДН — интегральный делитель напряжения $[U_d/32]/[(kk_d)^2(E + \varphi_k)]$; АП — аналоговый перемножитель $Z = YU_d$; Σ — сумматор напряжений $Y = [U_d/32]/[(kk_d)^2(E + \varphi_k)]$

тектором АД, на выходе которого создается напряжение $U_d = k_d U_{\text{вых}} (k_d < 1)$. Зная коэффициенты k и k_d, представим выражение (12) в виде:

$$\Delta E = -\frac{U_d/32}{(kk_d)^2(E + \varphi_k)} U_d. \quad (13)$$

Для создания напряжения (13) в схему введены интегральный делитель напряжения ИДН, аналоговый перемножитель АП, сумматор напряжений Σ и резисторы R1 ÷ R6.

С выхода АД напряжение U_d подается на первый вход АП, выполненного по известной схеме [8], и через делитель напряжения 1:32 на резисторах R1, R2 на первый вход ИДН, собранного по схеме [8]. На второй вход ИДН поступает напряжение $(kk_d)^2(E + \varphi_k)$, полученное в сумматоре напряжений Σ, выполненном по схеме [8]. На входы сумматора Σ подаются ослабленные в $(kk_d)^2$ раз на резистивных делителях R3, R5 и R4, R6 соответственно напряжения E и -φ_k. Напряжение φ_k для кремниевых варикапов составляет 0,6 ÷ 0,8 В [6]. С выхода ИДН напряжение $[U_d/32] / [(kk_d)^2 \times (E + \varphi_k)]$ поступает на второй вход АП, где перемножается с напряжением U_d. С выхода АП напряжение (13) в полярности противоположной напряжению E подается на второй вход E2 цепи управления варикапами.

В результате негативное влияние амплитуды колебаний в контуре с варикапами на частоту настройки колебательного контура ослабляется, и АЧХ контура с ВПС приближается к АЧХ линейного контура. Аналогичным образом можно решить задачу для других типов варикапов [2].

Заключение. Встречно-последовательное соединение пар идентичных варикапов не ликвидирует зависимость резонансной частоты контура от амплитуды колебаний. Включение N пар ВПС последовательно, хотя и дает возможность при заданном напряжении смещения в N^2 раз снизить амплитудно-частотное преобразование, полностью избавиться от нелинейных эффектов не позволяет. Для линейризации колебательного контура с варикапами наряду с увеличением числа варикапов следует применять автоматическую стабилизацию частоты настройки контура. В случае варикапов с резким переходом выражение (11) справедливо для любого значения N.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лабутин В. К. Частотно-избирательные цепи с электронной настройкой.— М.— Л.: Энергия, 1966.— 208 с.
2. Кулешов В. Н., Савченко М. П. Эквивалентная емкость ВПС варикапов // Радиоэлектроника.— 1988.— № 2.— С. 71–74.
3. Андреев В. С. Теория нелинейных электрических цепей.— М.: Связь, 1972.— 328 с.
4. Савченко М. П., Кулешов В. Н. Экспериментальное исследование флуктуаций в транзисторном автогенераторе с варикапами // Электросвязь.— 1984.— № 2.— С. 55–58.
5. Бобрешов А. М., Аверина Л. И., Исаев А. В. Интермодуляционные искажения в перестраиваемых полосовых фильтрах // Вестник ВГУ. Серия: Физика. Математика.— 2010.— № 2.— С. 181–188.
6. Савченко М. П., Карпинская Т. А. Эквивалентная схема и параметры УКВ варикапов // Радиотехника.— 1985.— № 11.
7. Заявка на изобретение РФ, № 2014114299 от 10.04.2014. Способ и устройство повышения стабильности фазы колебаний в резонансном контуре с варикапами / М. П. Савченко, О. В. Старовойтова. Заявитель БФУ им. И. Канта.
8. Якубовский С. В., Барканов Н. А., Кудряшов и др. Аналоговые и цифровые интегральные схемы / Под ред. С. В. Якубовского.— М.: Сов. радио, 1979.— 336 с.