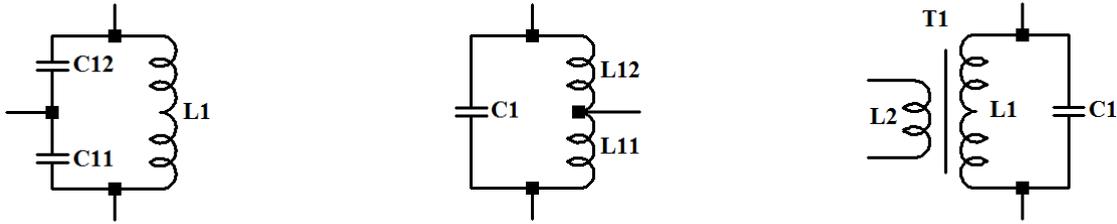


# Частотные характеристики генератора с LC-мостом

Кубов В.И. 2024

Емкостные трехточки, индуктивные трехточки и цепи с трансформаторной связью – Рис.1, хорошо известны и широко применяются в колебательных схемах.



а) Емкостная трехточка      б) Индуктивная трехточка      в) Трансформаторная связь  
Рис.1. Резонансные колебательные контуры.

В некоторых случаях используется схема, объединяющая свойства всех этих схем. В качестве примера ниже приведена схема простого генератора, широко используемого в пультах игрушечных радиоуправляемых RC - *Remote Control*, моделей – Рис.2а.

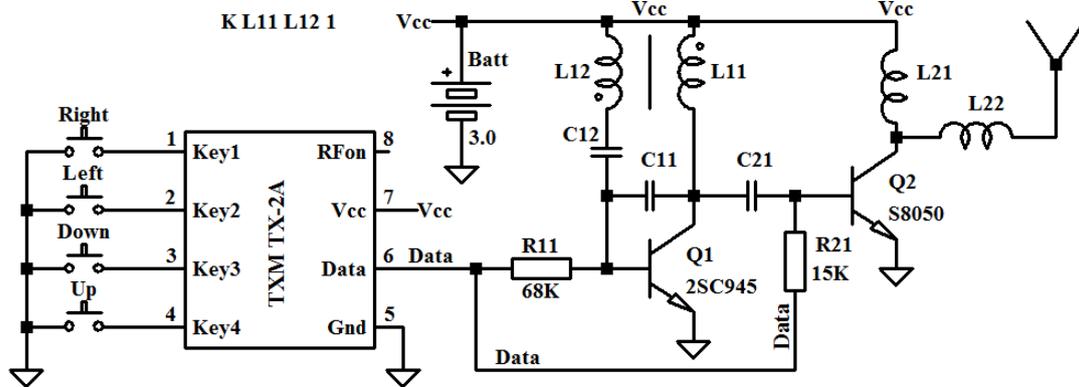


Рис.2а. Передатчик RC-модели 27MHz. Трансформаторная связь резонансных контуров.

Задающий генератор собран на транзисторе Q1. Его элементы L11, L12 и две емкости C11, C12 определяют частоту автогенерации, а также величину и знак обратной связи.

Следующий каскад на транзисторе Q2 служит усилителем мощности. Индуктивность L21 является индуктивной нагрузкой каскада с общим эмиттером, а индуктивность L22 — для согласования с емкостной нагрузкой сильно укороченной антенны.

Схема задающего генератора представляет наибольший интерес для последующего анализа. Задающий генератор на схеме рис.2а довольно сложно свести к классическому случаю трех-точечного или трансформаторного соединения. Удобнее рассматривать его как мост из двух индуктивно связанных индуктивностей и двух емкостей — рис.2б.

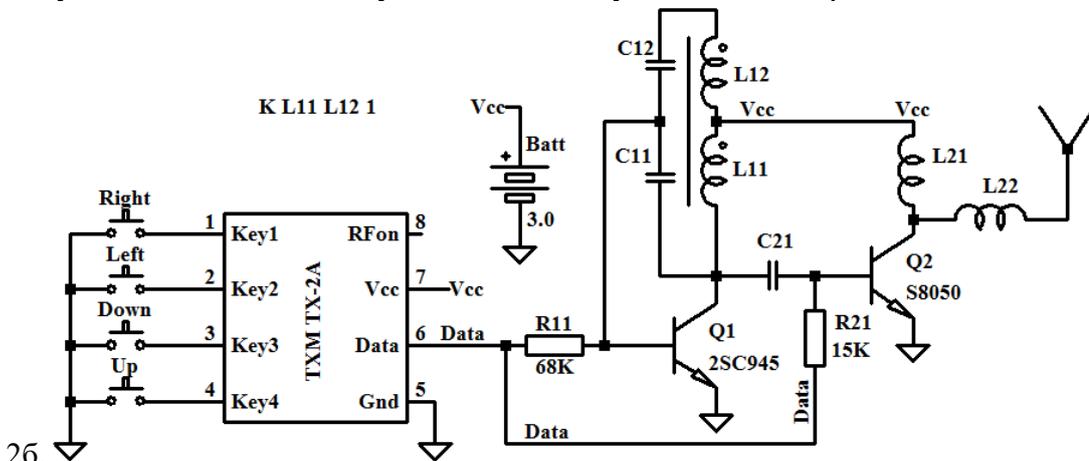


Рис.2б. Передатчик RC-модели 27MHz. LC-мост.

Рассмотрим частотные свойства резонансного контура, образованного двумя магнитно-связанными индуктивностями и двумя емкостями.

Резонансная частота контура, образованного двумя магнитно-связанными индуктивностями  $L_{11}$ ,  $L_{12}$  и двумя емкостями  $C_{11}$ ,  $C_{12}$ , определяется по формуле:  $f_0 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L_\Sigma \cdot C_\Sigma}}$ .

А волновое сопротивление определяется по формуле:  $X = \frac{L_\Sigma}{C_\Sigma}$ .

Здесь:

$$L_\Sigma = (\sqrt{L_{11}} + \sqrt{L_{12}})^2; \rightarrow N_\Sigma = N_{11} + N_{12}; L_i = k \cdot N_i^2;$$

$$C_\Sigma = \frac{C_{11} \cdot C_{12}}{C_{11} + C_{12}}; \rightarrow \frac{1}{C_\Sigma} = \frac{1}{C_{11}} + \frac{1}{C_{12}}.$$

Эти соотношения реализованы в модели LC-моста таким образом, что при изменении емкости  $C_{11}$  и индуктивности  $L_{11}$  результирующие параметры резонансного контура  $C_\Sigma$ ,  $L_\Sigma$  не изменяются.

$$L_{12} = (\sqrt{L_\Sigma} - \sqrt{L_{11}})^2; C_{12} = \frac{C_\Sigma \cdot C_{11}}{C_{11} + C_\Sigma}.$$

### LC-мост

Рассмотрим характеристики индуктивно-емкостного LC-моста в LTSpice-модели – Рис.3..

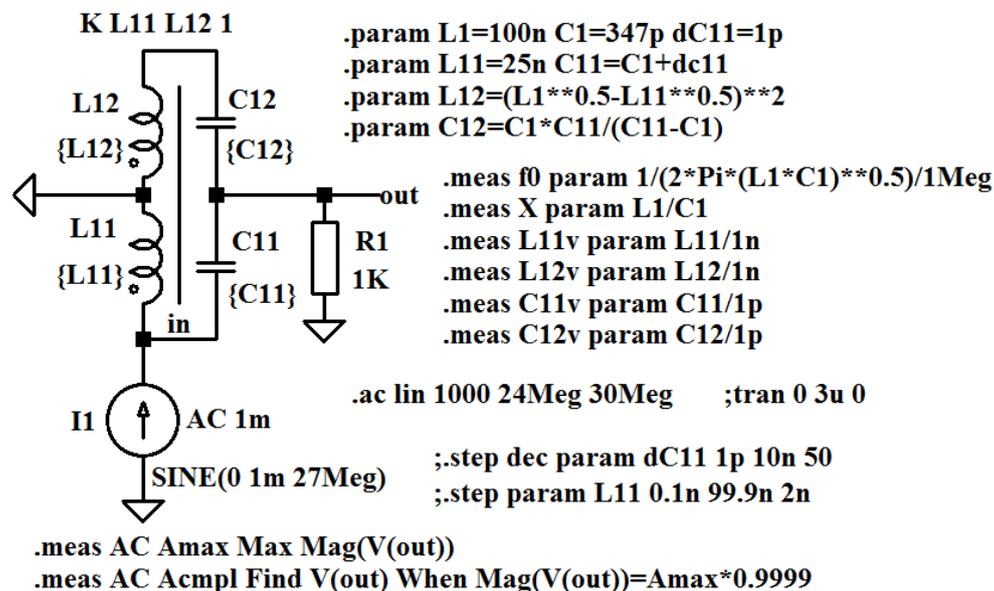


Рис.3. Spice-модель LC-моста.

В качестве источника возбуждения в схеме используется генератор тока  $I_1$ , а в качестве выходной нагрузки — резистор  $R_1$ .

Значения индуктивности  $L_{12}$  и емкости  $C_{12}$  определяются основными значениями  $L_1$ ,  $C_1$  резонансного контура через  $L_{11}$  и  $C_{11}$ .

Для удобства отображения графиков емкость  $C_{11}$  представлена в виде суммы основной емкости и добавочной  $C_{11}=C_1+dC_{11}$ .

Числовые значения параметров можно посмотреть в окне Spice Error Log.

```

f0: 1/(2*Pi*(L1*C1)**0.5)/1meg=27.0181 {MHz}
X: L1/C1=288.184 {Ω}
L11v: L11/1n=25 {nH}
L12v: L12/1n=25 {nH}
C11v: C11/1p=348 {pF}
C12v: C12/1p=120756 {pF}
    
```

Рис.4. Окно Spice Error Log.  $L_{11}=25\text{nH}$ ;  $C_{11}=348\text{pF}$ .

Ниже приведены переходные характеристики напряжений на входе и выходе генератора – Рис.5.

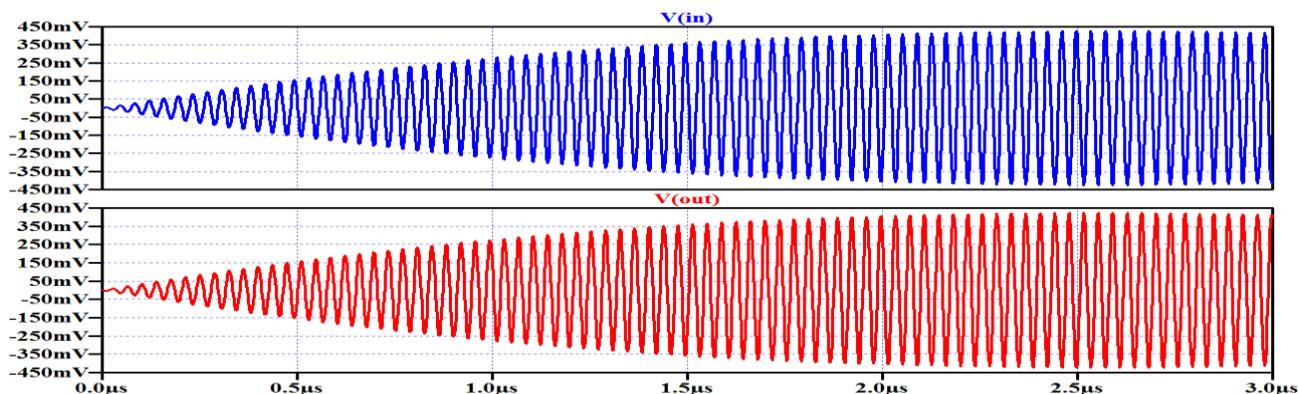


Рис.5. Переходная характеристика  $V(in)$ ,  $V(out)$ .  $L_{11}=25\text{nH}$ ;  $C_{11}=348\text{pF}$ .

Следующий график – Рис.6, показывает частотную характеристику контура при различных значениях емкости  $C_{11}$ , при фиксированном значении  $L_{11}$  ( $L_{11}=L_{12}=L_1/4=25\text{nH}$ ). Напомним, что параметры –  $L_1$ ,  $C_1$ , определяющие резонансную частоту контура, остаются неизменными.

На графике Рис.6 показаны две фазовые ветви - около  $+90^\circ$  и около  $-90^\circ$ , в зависимости от конкретной емкости  $C_{11}$ .

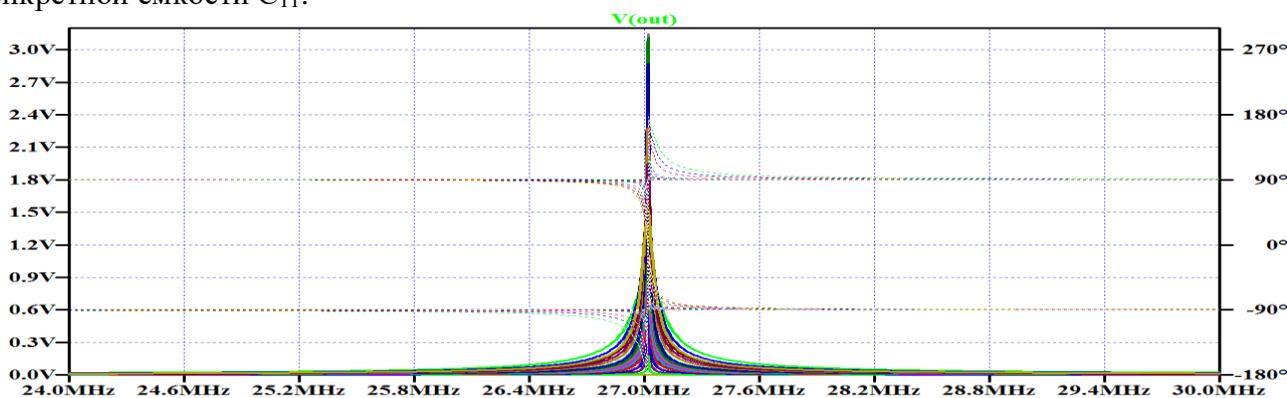


Рис.6. Частотная АС-зависимость  $V(out)$ .  $L_{11}=25\text{nH}$ .  $C_{11}=347\text{pF} - 2\text{nF}$ .

При переходе через точку равенства значений ёмкости  $C_{11}=C_{12}=C_1*2$  происходит изменение фазы ( $180^\circ$ ).

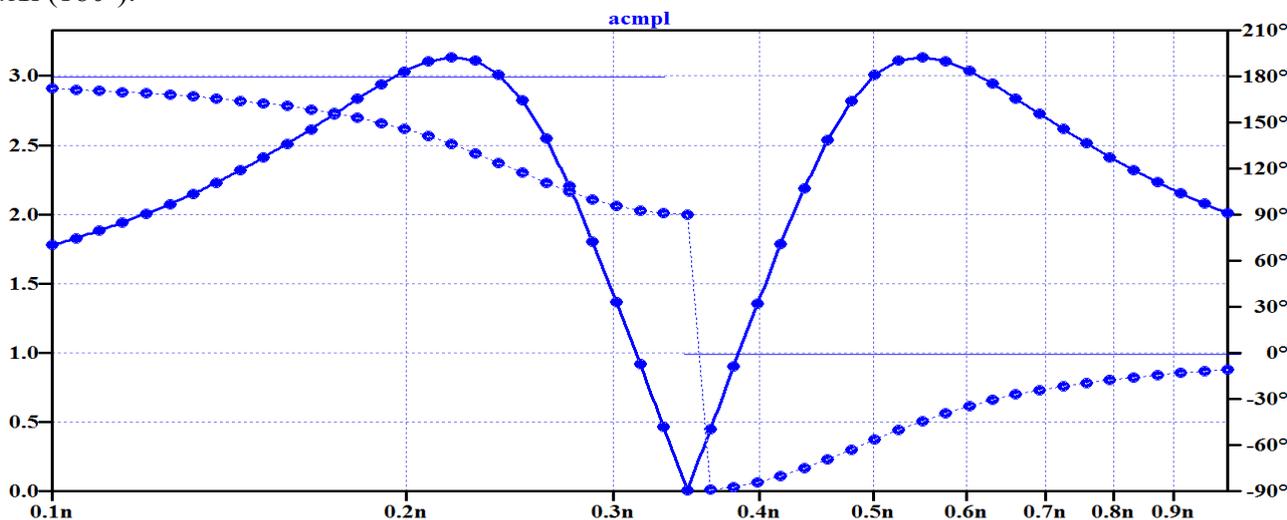


Рис.7. Зависимость  $V(out)$  от  $dC_{11}$ . LC-мост.  $L_{11}=25\text{nH}$ .  $C_{11}=357\text{pF} - 1347\text{pF}$ .

Ниже приведены примеры расчетов для случая симметричных индуктивностей  $L_{11}=L_{12}=L_1/4=25\text{nH}$ . При изменении емкости, фаза выходного сигнала меняется на противоположное значение. В точке перехода  $C_{11}=695\text{pF}$  ( $dC_{11}=347\text{pF}$ ) ( $C_{11}=2*C_1$ ) амплитуда выходного сигнала, достаточно плавно, обращается в ноль. Это позволяет управлять знаком обратной связи, и плавно регулировать глубину этой связи. В частности, это можно использовать для обратной связи в схеме транзисторного генератора с общим эмиттером.

Посмотрим, как изменится зависимость выходного сигнала от емкости  $C_{11}$  при изменении индуктивности  $L_{11}$  в обе стороны от симметричного случая.

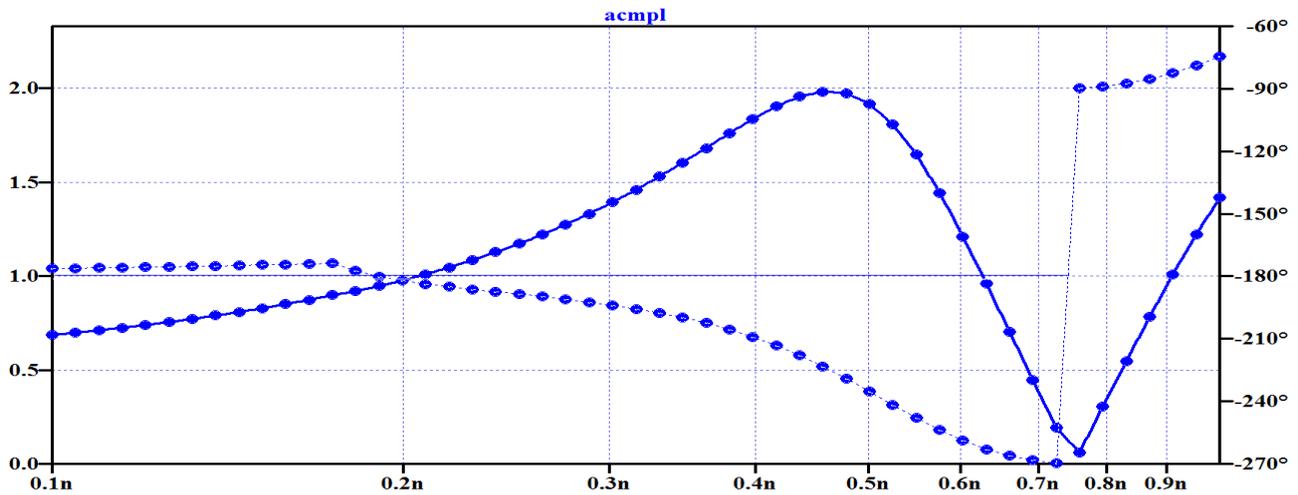


Рис.8. Зависимость  $V(\text{out})$  от  $dC_{11}$ . LC-мост.  $L_{11}=10\text{nH}$ .  $C_{11}=357\text{pF} - 1347\text{pF}$ .

Здесь индуктивность смещена в меньшую сторону  $L_{11}=10\text{mH}$ . Точка перехода через нулевую амплитуду сместилась в сторону больших значений емкости.  $C_{11}=1.1\text{nH}$  ( $dC_{11}=750\text{pF}$ ).

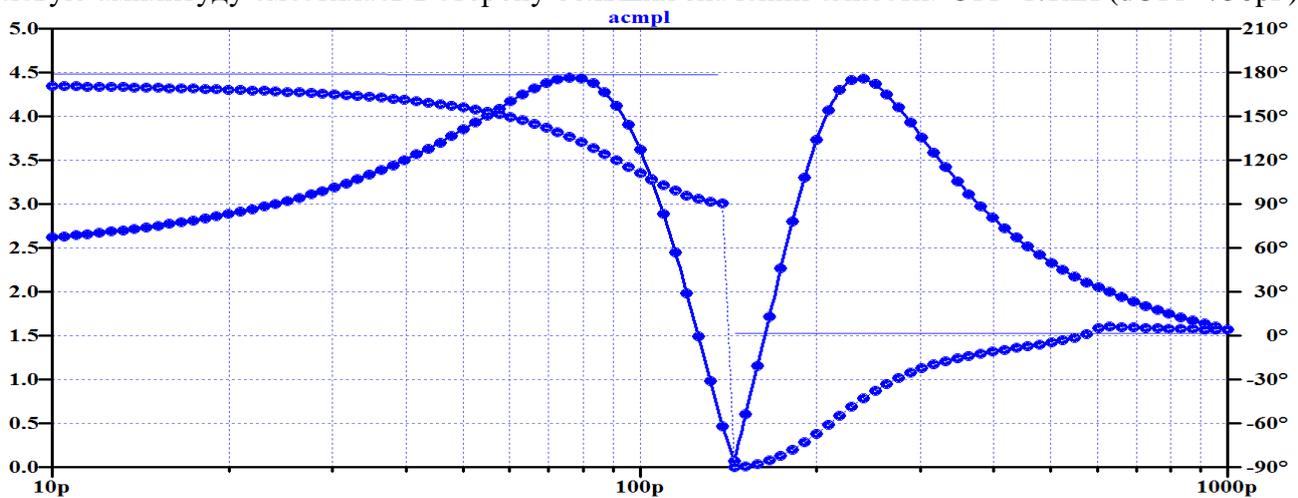


Рис.9. Зависимость  $V(\text{out})$  от  $dC_{11}$ . LC-мост.  $L_{11}=50\text{mH}$ .  $C_{11}=348\text{pF} - 1347\text{pF}$ .

Здесь индуктивность смещена в большую сторону  $L_{11}=50\text{mH}$ . Точка перехода через нулевую амплитуду сместилась в сторону меньших значений емкости.  $C_{11}=500\text{pF}$  ( $dC_{11}=150\text{pF}$ ).

Давайте сравним рассмотренную выше схему LC-моста со схемами емкостной и индуктивной трехточки.

### Емкостная трехточка

Полагая индуктивность  $L_{12}$  в схеме равной нулю, получим схему емкостной трехточки. Учтите, что симулятор не допускает значений индуктивности, равных нулю. Поэтому сделаем эту индуктивность пренебрежимо малой, но не нулевой -  $L_{11}=99\text{nH}$ ,  $L_{12}=0.0025\text{nH}=2.5\mu\text{H}$ .

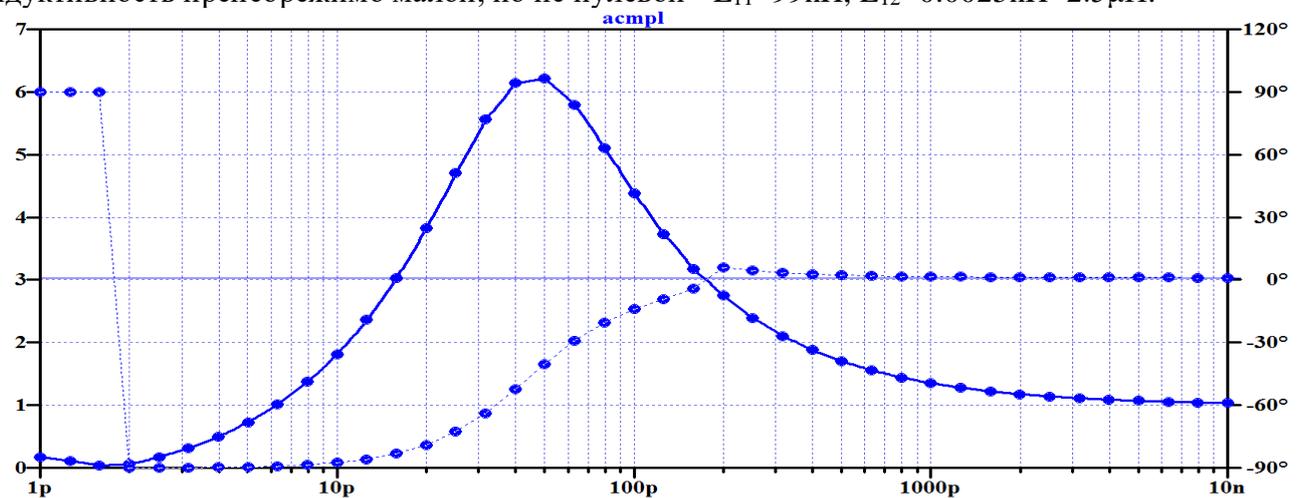


Рис.10. Зависимость  $V(\text{out})$  от  $dC_{11}$ . Емкостная трехточка.  $L_{11}=99\text{nH}$ .  $C_{11}=347\text{pF} - 10\text{nF}$ .

Максимальный выходной сигнал достигается при значении емкости около  $C_{11}=390\text{pF}$  ( $dC_{11}=45\text{pF}$ ). Кроме того, в диапазоне значений емкости  $C_{11}>500\text{pF}$  ( $dC_{11}>100\text{pF}$ ), фазы входного и выходного сигналов близки.

Данная схема имеет постоянный фазовый сдвиг (около нуля) практически во всем диапазоне изменения емкости. Поэтому такую схему можно использовать только в усилителях без инверсии сигнала. Например, в одно-транзисторном усилителе с общей базой.

### Индуктивная трехточка

Полагая значение емкости  $C_{12}$  бесконечным, мы фактически закоротим ее и получим схему индуктивной трехточки.

Обратите внимание, что в реальной схеме, особенно в схеме генератора с одним транзистором, мы не всегда можем удалить конденсатор  $C_{12}$ , поскольку выход будет подключен к входу по постоянному току. Поэтому надо сохранить конденсатор  $C_{12}$ , но сделаем его емкость достаточно большой, чтобы она не влияла на резонансную частоту.

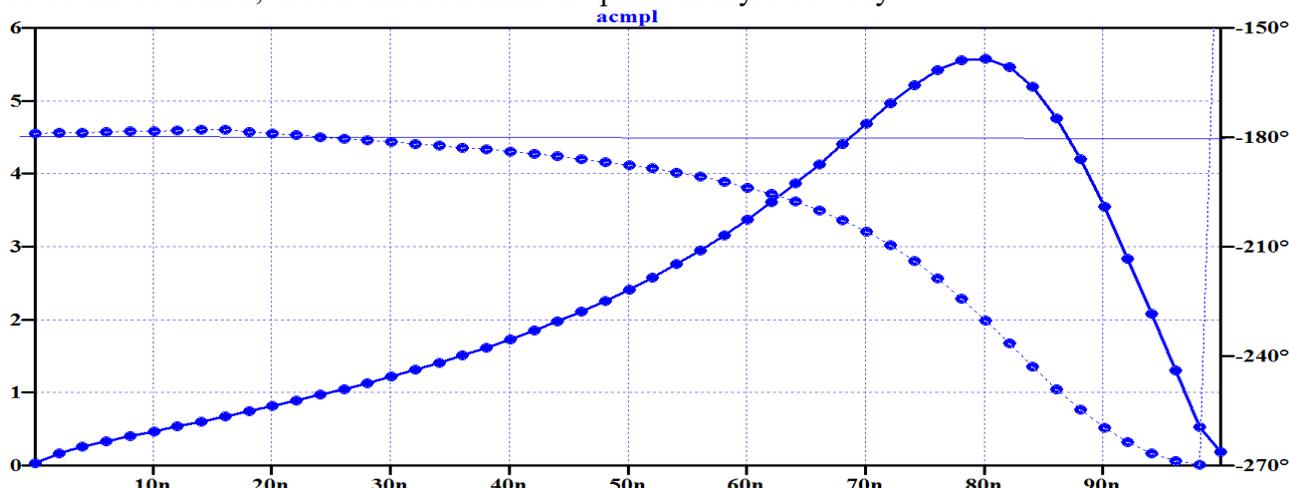


Рис.11. Зависимость  $V(\text{out})$  от  $L_{11}$ . Индуктивная трехточка.  $C_{11}=348\text{pF}$ .  $L_{11}=0.1\text{nH} - 99.9\text{nH}$ .

Максимальный выходной сигнал достигается при значении индуктивности около  $L_{11}=80\text{nH}$ . In this case, in the range of approximately up to  $L_{11}<40\text{nH}$ , the phase of the output signal is inverted ( $180^\circ$ ).

При условии сохранения дополнительного разделительного конденсатора  $C_{12}$ , подобная схема, вполне пригодна для построения одно-транзисторного генератора по схеме с общим эмиттером. Но, сохраняя в схеме два конденсатора, мы возвращаем ее к общему случаю индуктивно-емкостного LC-моста.

### Генератор с LC-мостом

Таким образом, индуктивно-емкостная мостовая схема имеет явные преимущества по сравнению с классической схемой трехточки. В частности, ее можно использовать в более простой схеме транзисторного генератора с общим эмиттером.

В качестве примера на рис.12 показана схема генератора на одном транзисторе с использованием схемы с общим эмиттером.

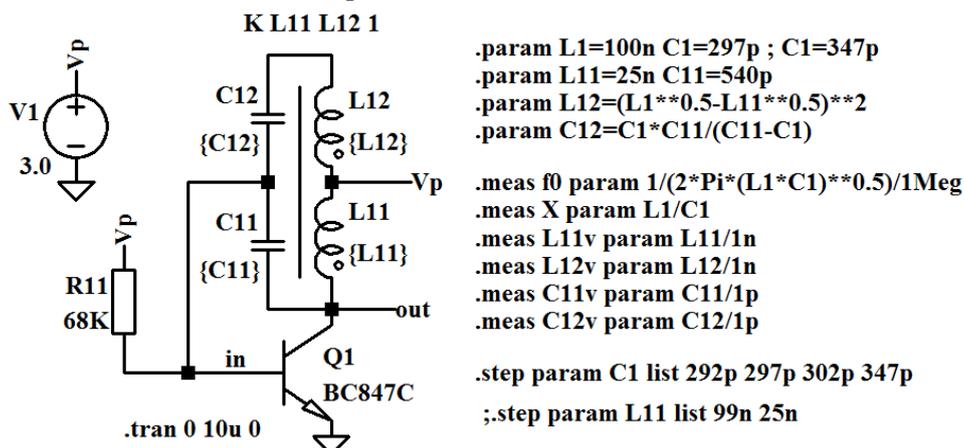


Рис.12. Генератор с LC-мостом.

Паразитная емкость транзисторных переходов смещает резонансную частоту схемы в сторону более низких частот, близких к 24MHz – Рис.16.

Поэтому значения емкости были подобраны таким образом, чтобы частота генератора была близка к частоте 27MHz.

Без учета паразитной емкости частота схемы составляет около 29MHz. Соответствующие значения параметров схемы показаны на рис.13.

```
f0: 1 / (2*Pi* (L1*C1)**0.5) /1meg=29.204 {MHz}
X: l1/c1=336.7 {Ω}
L11v: l11/1n=25 {nH}
L12v: l12/1n=25 {nH}
C11v: c11/1p=540 {pF}
C12v: c12/1p=660 {pF}
```

Fig.13. Окно Spice Error Log. L<sub>11</sub>=25nH; C<sub>11</sub>=540pF.

Ниже приведены переходные характеристики напряжений на входе и выходе LC-моста – Рис.14.

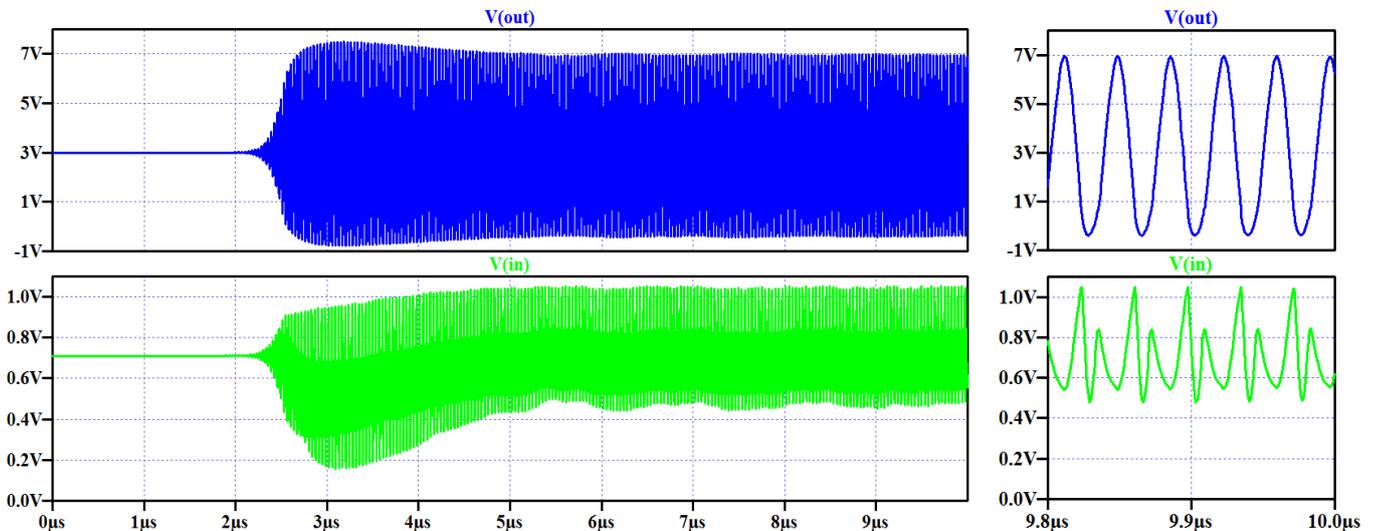


Рис.14. Переходные характеристики V(in) - база, V(out) – коллектор. L<sub>11</sub>=25nH; C<sub>11</sub>=540pF.

Выходной сигнал генератора имеет спектр, показанный на Рис.15.

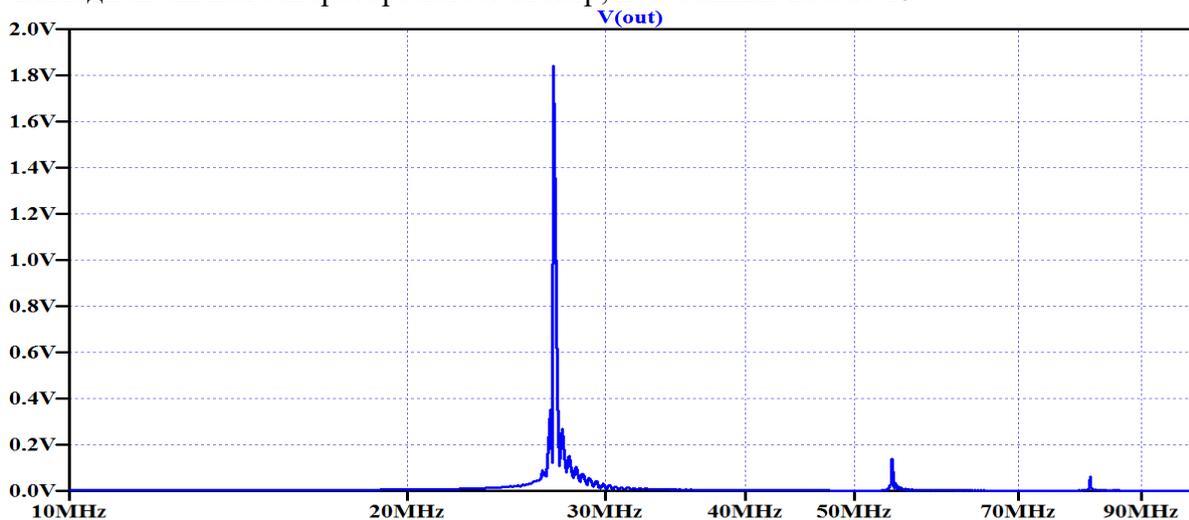


Рис.15. FFT спектр на выходе генератора. L<sub>11</sub>=25nH; C<sub>11</sub>=540pF.

В спектре сигнала, помимо основной частоты 27MHz, заметны гармоники 54MHz и 81MHz. Есть надежда, что амплитуду гармоник можно уменьшить, уменьшив глубину обратной связи.

Напомним, что индуктивно-емкостная схема LC-моста позволяет изменять величину и знак сигнала обратной связи. Для этого нужно более тщательно подобрать номиналы конденсаторов C<sub>11</sub>, C<sub>12</sub>.

Рис.16 иллюстрирует влияние уменьшенной емкости LC-моста – C<sub>1</sub>, на выходную частоту генератора.

Требуемой частоте 27MHz соответствует емкость  $C_1=297\text{pF}$ . А емкость  $C_1=347\text{pF}$  соответствует более низкой частоте, около 24MHz.

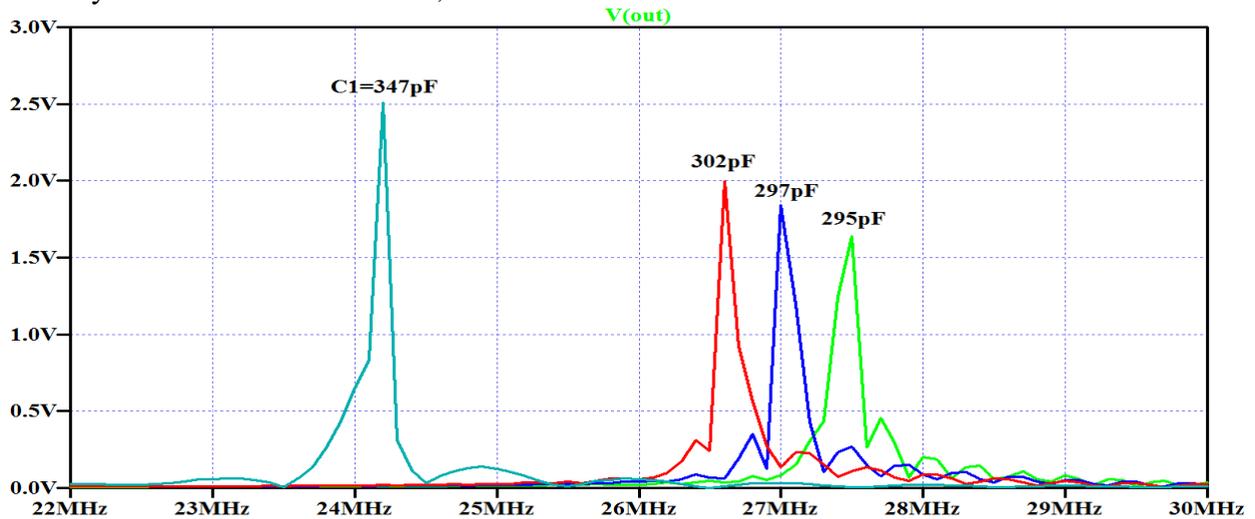


Рис.16. FFT спектр для разных значений  $C_1$ .  $L_{11}=25\text{nH}$ ;  $C_1=295\text{pF} - 347\text{pF}$ .

В реальной схеме для точной настройки частоты используется регулируемая сердечником индуктивность. Но в данном конкретном случае это не имеет принципиального значения. .

Таким образом, схема индуктивно-емкостного LC-моста имеет преимущество перед классической схемой емкостной и индуктивной трехточки. И ее можно использовать в более простой схеме генератора на транзисторе с общим эмиттером.

Можно предположить, что данная схема позволяет подавлять нежелательные гармоники сигнала генератора путем более тщательного подбора глубины обратной связи.