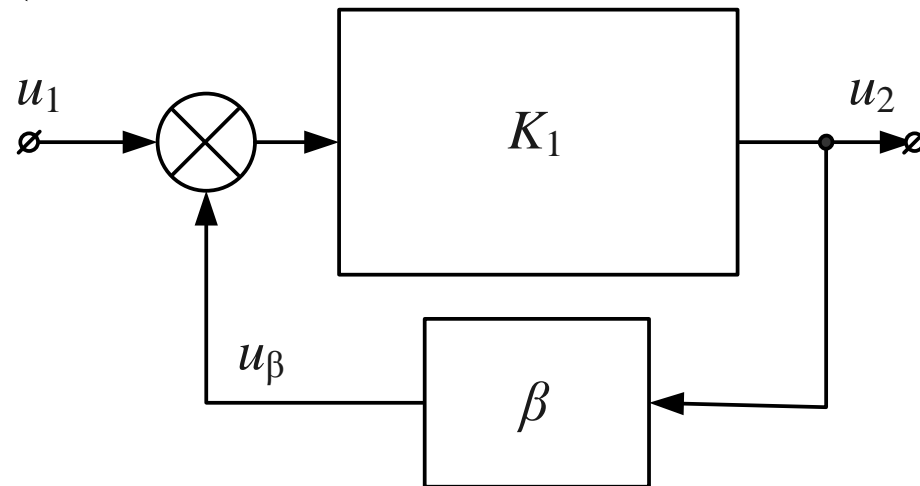


Лекция 7.

Автогенераторы

Обратная связь в усилителях

Обратная связь (ОС) – это передача на вход усиленных колебаний с выхода усилителя (или отдельного его каскада).



По происхождению ОС бывает:

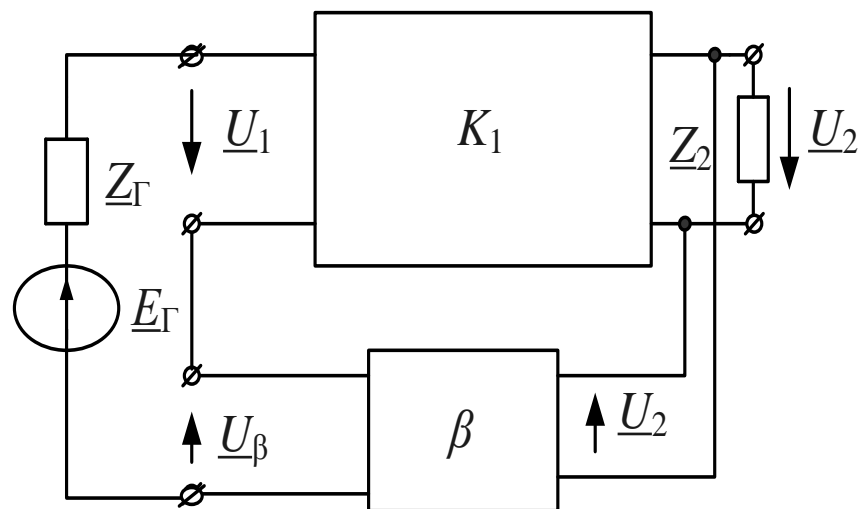
- Внутренняя (в транзисторах за счет y_{12}, h_{21});
- Искусственная (вводится специально);

- Паразитная (существует сама за счет плохого монтажа).

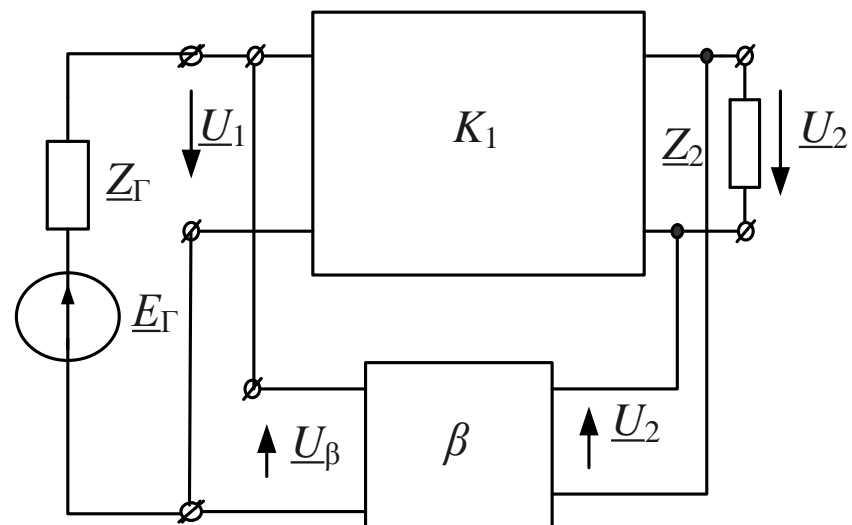
ОС бывает:

1. *Положительная*: входной сигнал u_1 и сигнал ОС u_β синфазные (совпадают по фазе и суммируются);
2. *Отрицательная*: входной сигнал u_1 и сигнал ОС u_β противофазные и вычитаются.

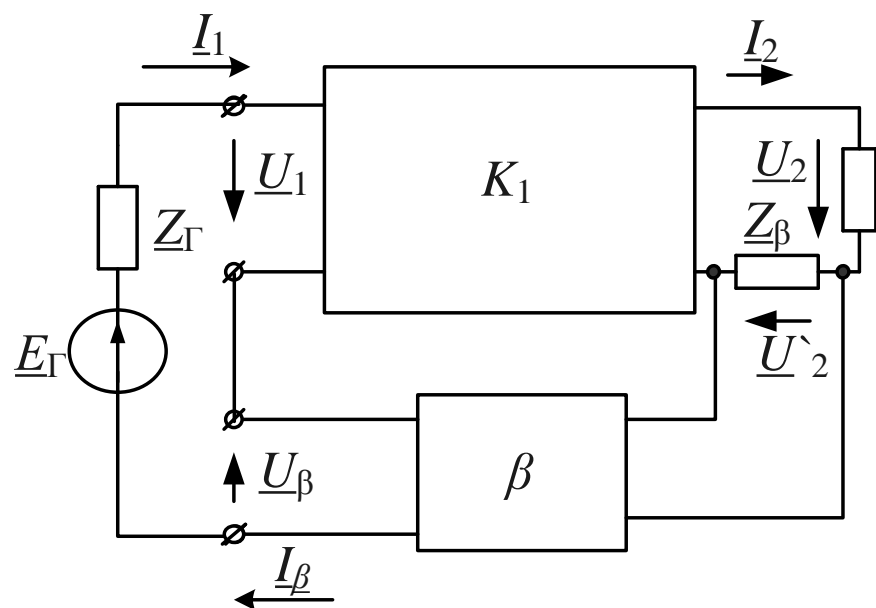
По способу получения ОС бывает:



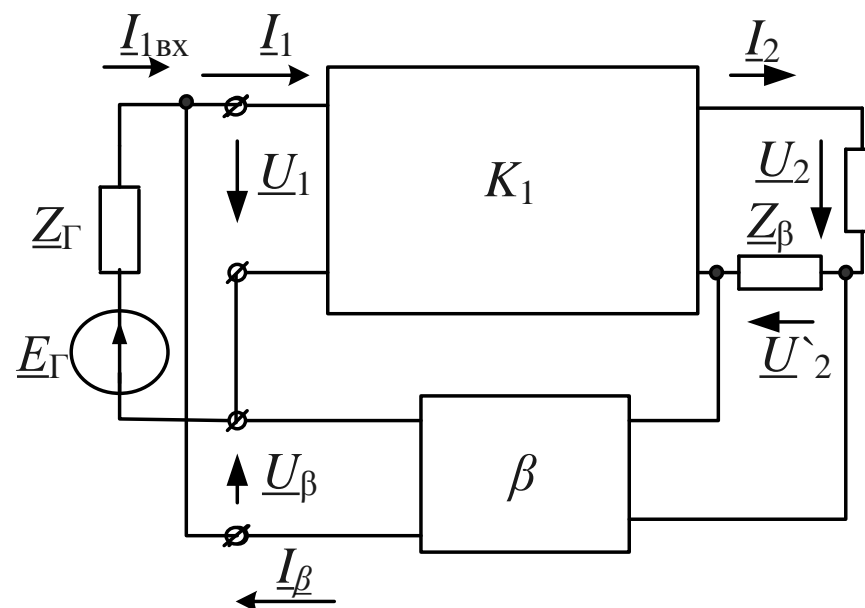
а) Последовательная ОС по напряжению



б) Параллельная ОС по напряжению



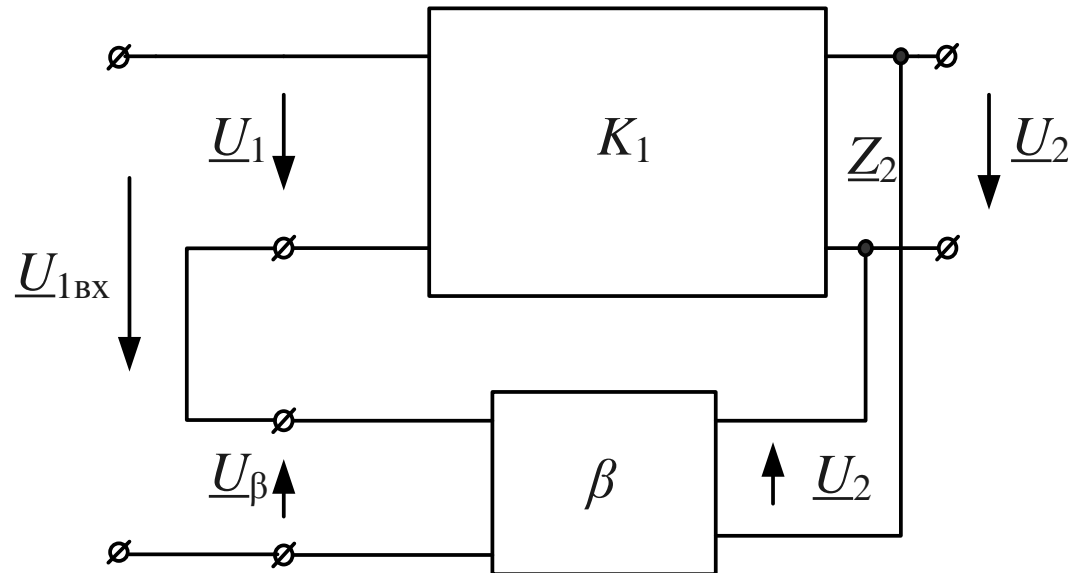
в) Последовательная ОС по току



г) Параллельная ОС по току

Свойства усилителей с ОС

Рассмотрим последовательную ОС по напряжению:



Передаточная функция основного четырехполюсника без ОС:

$$\underline{K}_1(j\omega) = \frac{\underline{U}_2}{\underline{U}_1}.$$

Передаточная функция обратной связи: $\underline{\beta}(j\omega) = \frac{\underline{u}_\beta}{\underline{u}_2}$,

$\underline{\beta}(j\omega)$ - коэффициент обратной связи.

$$\underline{U}_{1ex} = \underline{U}_1 - \underline{U}_\beta.$$

Передаточная функция 4-х полюсника с обратной связью:

$$\begin{aligned} \underline{K}(j\omega) &= \frac{\underline{U}_2(j\omega)}{\underline{U}_{1ex}(j\omega)} = \frac{\underline{U}_2(j\omega)}{\underline{U}_1(j\omega) - \underline{U}_\beta(j\omega)} = \\ &= \frac{\underline{U}_2(j\omega)}{\underline{U}_1(j\omega)} = \frac{\underline{K}_1(j\omega)}{1 - \frac{\underline{\beta}(j\omega) \cdot \underline{U}_2(j\omega)}{\underline{U}_1(j\omega)}} = \frac{\underline{K}_1(j\omega)}{1 - \underline{\beta}(j\omega) \cdot \underline{K}_1(j\omega)}. \end{aligned}$$

Обозначим $\underline{\beta}(j\omega) \cdot \underline{K}_1(j\omega)$ - петлевое усиление (коэффициент

передачи разомкнутой петли ОС);

$\underline{E}(j\omega) = 1 - \underline{\beta}(j\omega) \cdot \underline{K}_1(j\omega)$; $|\underline{E}(j\omega)|$ — глубина обратной связи.

Если $\underline{\beta}(j\omega) \cdot \underline{K}_1(j\omega) > 0$ и вещественно, **обратная связь положительная**.

При этом: \underline{U}_1 и \underline{U}_β совпадают по фазе, $0 < \underline{\beta} \underline{K}_1 < 1$,
 $\underline{K} = \frac{\underline{K}_1}{1 - \underline{\beta} \cdot \underline{K}_1} > \underline{K}_1$. Если $\underline{\beta} \cdot \underline{K}_1 = 1, K \rightarrow \infty$ - возникает возбуждение.

Если $\underline{\beta}(j\omega) \cdot \underline{K}_1(j\omega) < 0$ и вещественно, **обратная связь отрицательная**.

При этом: \underline{U}_1 и \underline{U}_β противоположны по фазе,

$$\underline{K} = \frac{\underline{K}_1}{1 - \underline{\beta} \cdot \underline{K}_1} < \underline{K}_1, \quad \underline{\beta} \cdot \underline{K}_1 < 0.$$

Если $\underline{K}_1 \gg 1$, то $K \approx \left| \frac{1}{\underline{\beta}} \right|$ - определяется обратной связью.

Входное сопротивление

Для усилителя без ОС: $\underline{Z}_{ex} = \frac{\underline{U}_1}{\underline{I}_1}$;

$$\begin{aligned} \text{с ОС: } \underline{Z}_{exOC} &= \frac{\underline{U}_{1ex}}{\underline{I}_1} = \frac{\underline{U}_1 - \underline{U}_{\beta}}{\underline{I}_1} = \frac{\underline{U}_1 - \underline{U}_{\beta}}{\underline{I}_1} = \\ &= \frac{\underline{U}_1 - \underline{U}_1 \underline{\beta} \cdot \underline{K}_1}{\underline{I}_1} = \underline{Z}_{ex} (1 - \underline{\beta} \cdot \underline{K}_1). \end{aligned}$$

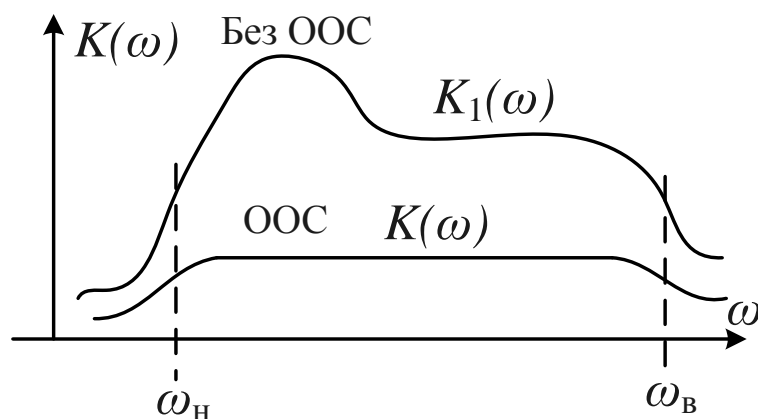
Если ОС последовательная и отрицательная $\underline{K}_1 \underline{\beta} < 0$, то входное

сопротивление увеличивается.

При положительной ОС $\underline{Z}_{вхОС} = \underline{Z}_{вх} (1 - \underline{\beta} \cdot \underline{K}_1)$ - уменьшается.

Отрицательная ОС по напряжению уменьшает выходное сопротивление:

$$\underline{Z}_{выхОС} = \frac{\underline{Z}_{вых}}{(1 - \underline{\beta} \cdot \underline{K}_1)}.$$



$$K(\omega) = \left| \frac{\underline{K}_1(j\omega)}{1 - \underline{\beta}(j\omega) \cdot \underline{K}_1(j\omega)} \right|$$

Отрицательная обратная связь (ООС) снижает усиление, но амплитудно-частотную характеристику $K(\omega)$ в полосе пропускания мож-

но сделать достаточно равномерной

Достоинства отрицательной ОС

- Уменьшаются искажения (амплитудно-частотные, фазочастотные, нелинейные).
- Повышается стабильность коэффициента усиления.
- Увеличивается входное сопротивление.
- Уменьшается выходное сопротивление.

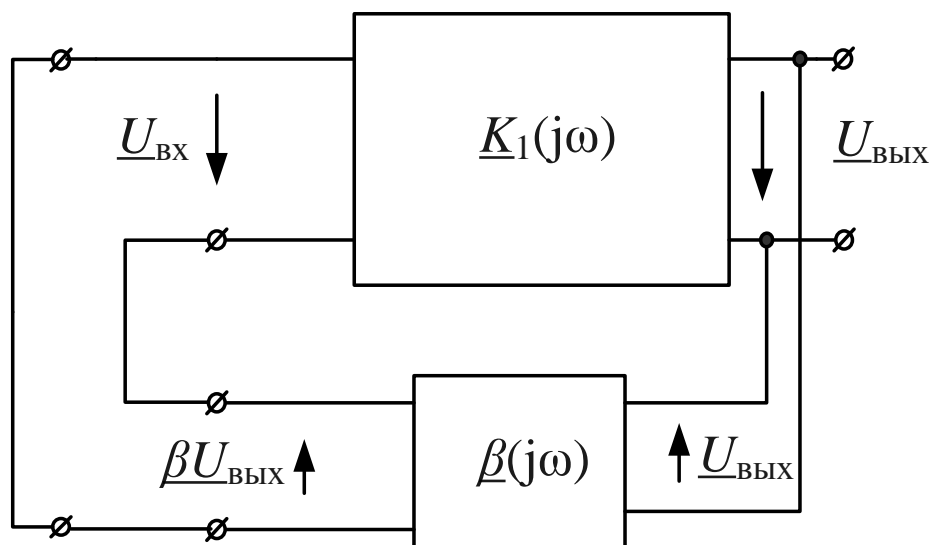
Недостатки отрицательной ОС

Снижается усиление.

Положительная обратная связь в автогенераторах

Автогенератором преобразует энергию источника постоянного напряжения или тока в энергию гармонических колебаний.

Автогенератор (АГ) гармонических колебаний является нелинейным устройством с положительной обратной связью и содержит, как правило, колебательный контур.



Структурная схема АГ с обратной связью

Два этапа в работе АГ:

1. Этап возбуждения колебаний.
2. Этап стационарного режима.

Условие возникновения колебаний

На входе действует сигнал $\underline{U}_{вх}$.

При этом на выходе усилителя: $\underline{U}_{вых} = \underline{U}_{вх} \cdot \underline{K}_1(j\omega)$.

Через цепь положительной обратной связи на вход усилителя вновь поступают сигнал: на вход усилителя, поэтому:

$$\underline{U}_{вх} = \underline{U}_{вых} \cdot \underline{\beta}(j\omega).$$

$$\text{Получим: } \underline{U}_{вых} = \underline{U}_{вых} \cdot \underline{\beta}(j\omega) \cdot \underline{K}_1(j\omega)$$

или

$$\underline{U}_{вых} (1 - \underline{K}(j\omega) \cdot \underline{\beta}(j\omega)) = 0.$$

Из уравнения следует, что напряжение на выходе усилителя $\underline{U}_{вых}$ может быть отличным от нуля только при выполнении *условие возникновения колебаний*:

$$\underline{K}(j\omega) \cdot \underline{\beta}(j\omega) = 1.$$

$\underline{K}(j\omega) \cdot \underline{\beta}(j\omega)$ - петлевое усиление усилителя с обратной связью.

Условия баланса амплитуд и фаз:

$$\begin{cases} \left| \underline{K}(j\omega) \cdot \underline{\beta}(j\omega) \right| = 1 \\ \arg(\underline{K}(j\omega) \cdot \underline{\beta}(j\omega)) = \phi_k + \phi_\beta = 2\pi n, \end{cases}$$

где n - любое целое число.

В стационарном режиме полное петлевое усиление на рабочей частоте автогенератора должно быть равно единице.

Регулируют петлевое усиление нелинейные элементы или транзисторы.

Условие баланса фаз означает, что полный фазовый сдвиг в замкнутом контуре автогенератора должен быть равен $2\pi n$, где n - любое целое число.

Если условие баланса фаз выполняется только на одной частоте, то

колебания будут гармоническими.

Цепь положительной обратной связи выполняют на *последовательных или параллельных резонансных контурах*.

Применяют автогенераторы с трансформаторной обратной связью, трехточечные генераторы с индуктивной и емкостной обратной связью.

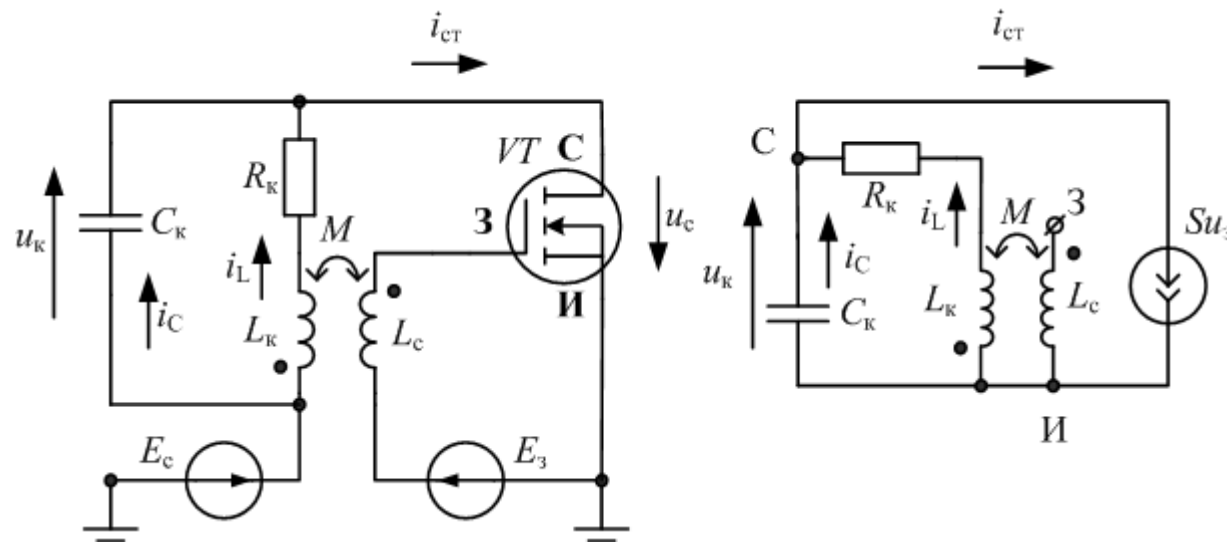


Схема генератора на полевом транзисторе и его схема замещения.

Режим по постоянному току устанавливают источники питания стока

E_c и источника смещения затвора E_3 .

Положительная обратная связь в цепь затвора осуществляется через обмотку связи L_c , индуктивно связанную с катушкой L_k контура.

Катушки связи должны обеспечивать поворот фазы примерно на π и выполнение условия баланса фаз.

Уравнения автогенератора

$$i_{ст} = Su_3, u_3 = M \frac{di_L}{dt}, i_{ст} = SM \frac{di_L}{dt}.$$

Напряжение на конденсаторе контура $u_c = R_k i_L + L_k \frac{di_L}{dt}$.

Ток в конденсаторе $i_c = C_k \frac{du_c}{dt} = R_k C_k \frac{di_L}{dt} + L_k C_k \frac{d^2 i_L}{dt^2}$.

Ток стока $i_{\text{ст}} = i_L + i_C = i_L + R_{\kappa} C_{\kappa} \frac{di_L}{dt} + L_{\kappa} C_{\kappa} \frac{d^2 i_L}{dt^2} = SM \frac{di_L}{dt}$

Получили уравнение АГ:

Уравнение АГ: $\frac{d^2 i_L}{dt^2} + 2\alpha \frac{di_L}{dt} + \omega_0^2 i_L = 0$, где:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_{\kappa} C_{\kappa}}}, \alpha = \frac{1}{2} \left(\frac{R_{\kappa}}{L_{\kappa}} - \frac{SM}{L_{\kappa} C_{\kappa}} \right) - \text{коэффициент затухания контура,}$$

S - крутизна транзистора.

Решение уравнения АГ имеет вид: $i_L = I_{mL} e^{-\alpha t} \sin \omega t$,

где $\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2}$ - частота колебаний в контуре.

Если $\alpha > 0$ колебания в контуре затухают, если $\alpha < 0$ - нарастают.

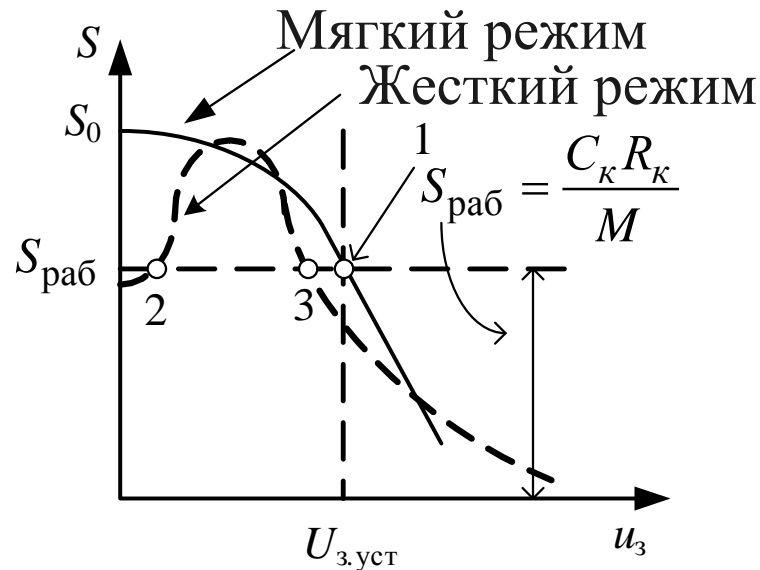
При $\alpha = 0$ в контуре стационарные колебания: $i_{L_{\text{уст}}} = I_{mL} \sin \omega t$.

Условие возбуждения колебаний: $S > \frac{R_K C_K}{M} = S_{\text{кр}}$.

Крутизна S уменьшается при увеличении напряжения на затворе и увеличении амплитуды колебаний.

Приближенная зависимость крутизны от напряжения колебаний на затворе транзистора имеет вид:

$S(u_3) = S_0 - bu_3^2$, где S_0 - крутизна при нулевой амплитуде колебаний.



Моделирование автогенератора гармонических колебаний

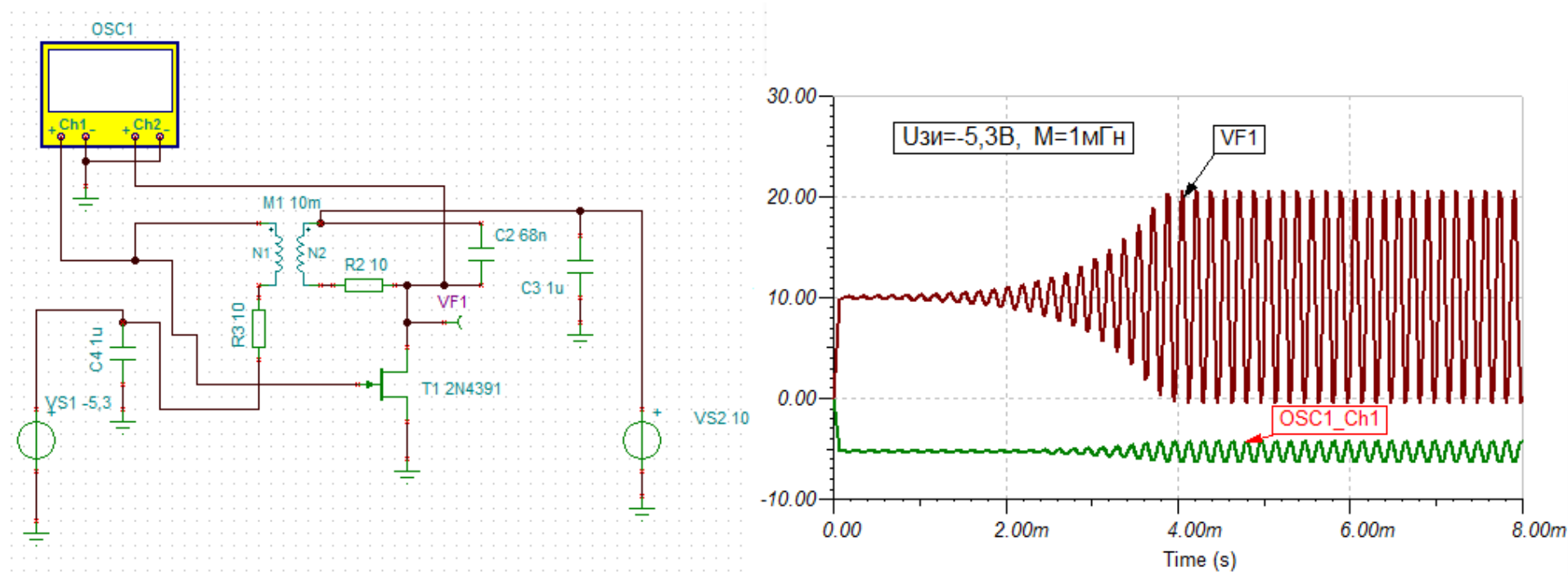
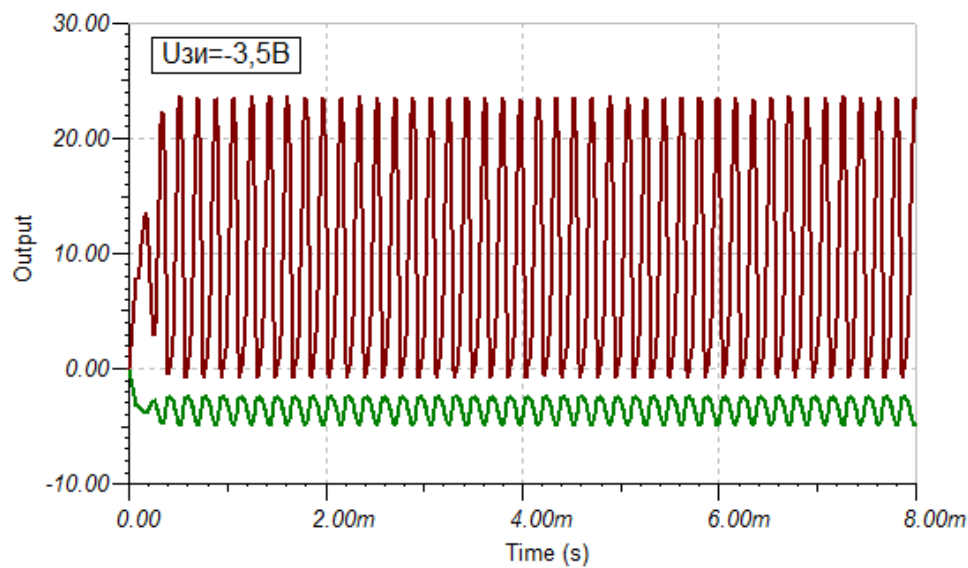
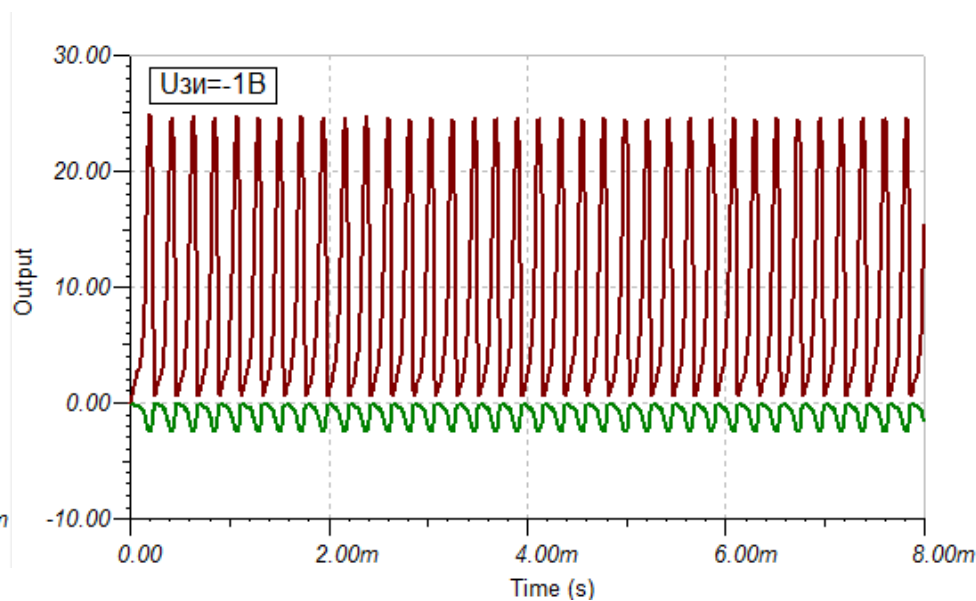


Рис.5.8



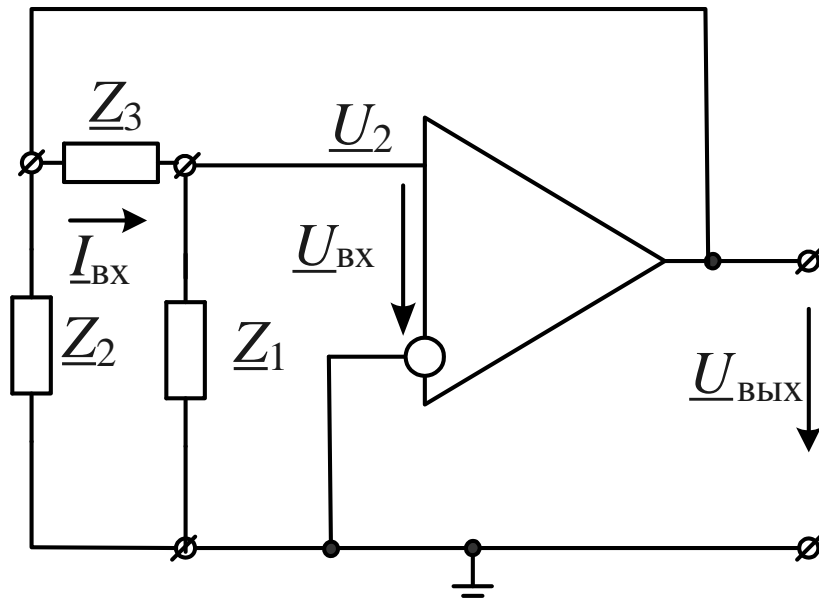
Быстрое возбуждение



Искажения

Индуктивная трехточка

Во многих схемах LC- генераторов напряжение обратной связи снимают с части колебательного контура. Такое включение контура называют неполным. При этом контур имеет три точки соединений с внешней цепью и такие схемы LC- генераторов называют трехточечными.



$$\underline{I}_{\text{вх}} = \frac{\underline{U}_{\text{вых}}}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_3},$$

Напряжение обратной связи:

$$\underline{U}_{\text{ос}} = \underline{U}_{\text{вх}} = \frac{\underline{U}_{\text{вых}} \cdot \underline{Z}_1}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_3} = \frac{\underline{U}_{\text{вых}}}{\underline{K}}$$

Условие генерации:

$$\underline{U}_{\text{вых}} \left(1 - \frac{\underline{K} \cdot \underline{Z}_1}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_3} \right) = 0$$

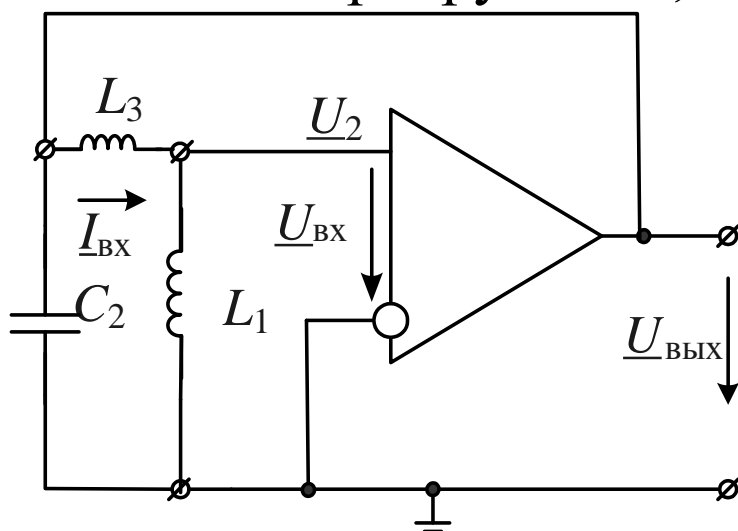
Коэффициент обратной связи:

$$\underline{\beta}(j\omega) = \frac{\underline{U}_{OC}}{\underline{U}_{вых}} = \frac{\underline{U}_{вх}}{\underline{U}_{вых}} = \frac{\underline{Z}_1}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_3} = \frac{jx_1}{jx_1 + jx_3}$$

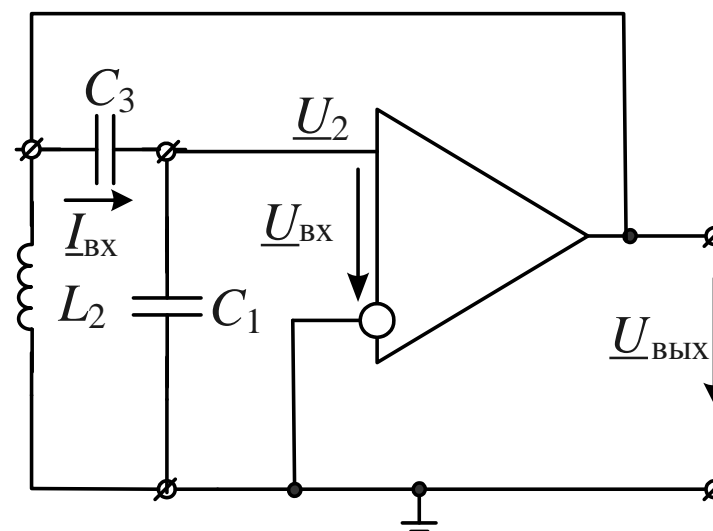
Условие резонанса:

$$x_1 + x_2 + x_3 = 0$$

Так как ОУ неинвертирующий, X_1 и X_3 должны быть одного знака.



Индуктивная трехточка



Емкостная трехточка

LC- генератор Хартли (Хоровиц и Хилл. Искусство схемотехники)

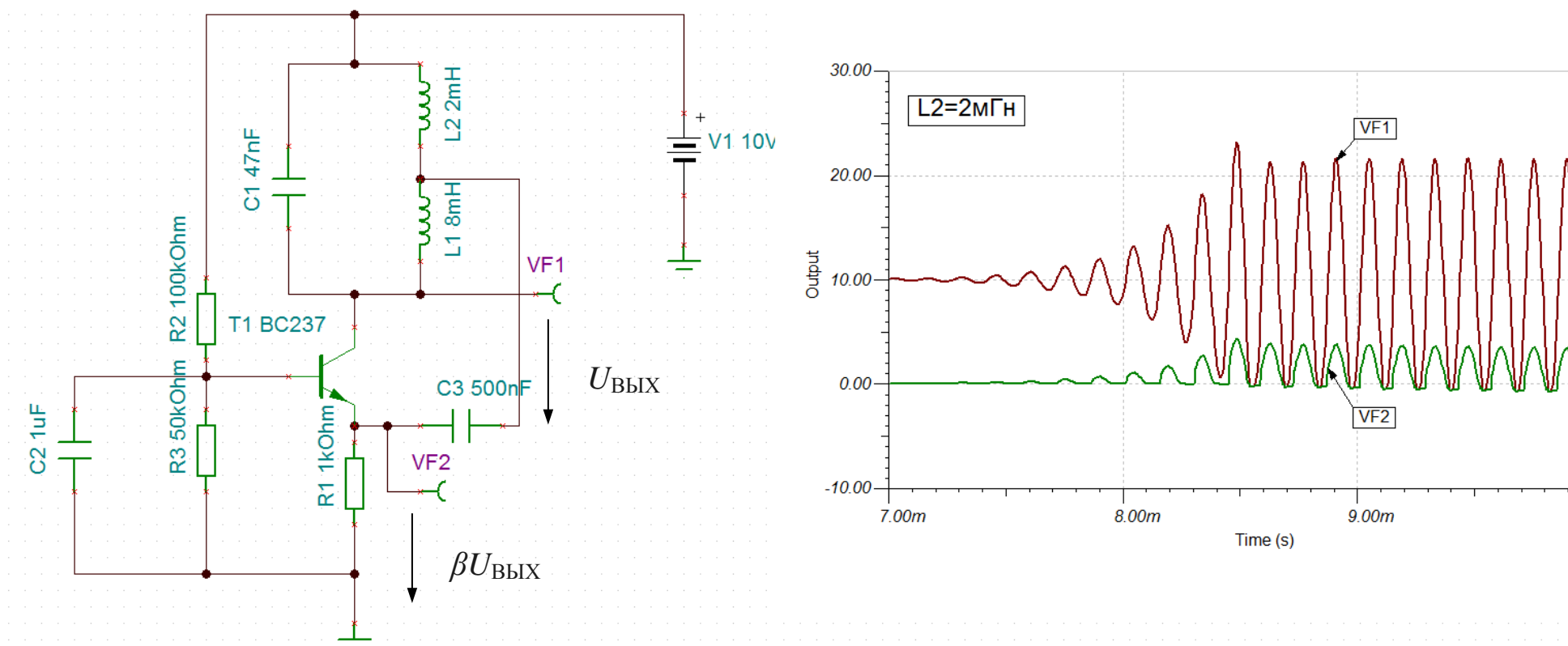
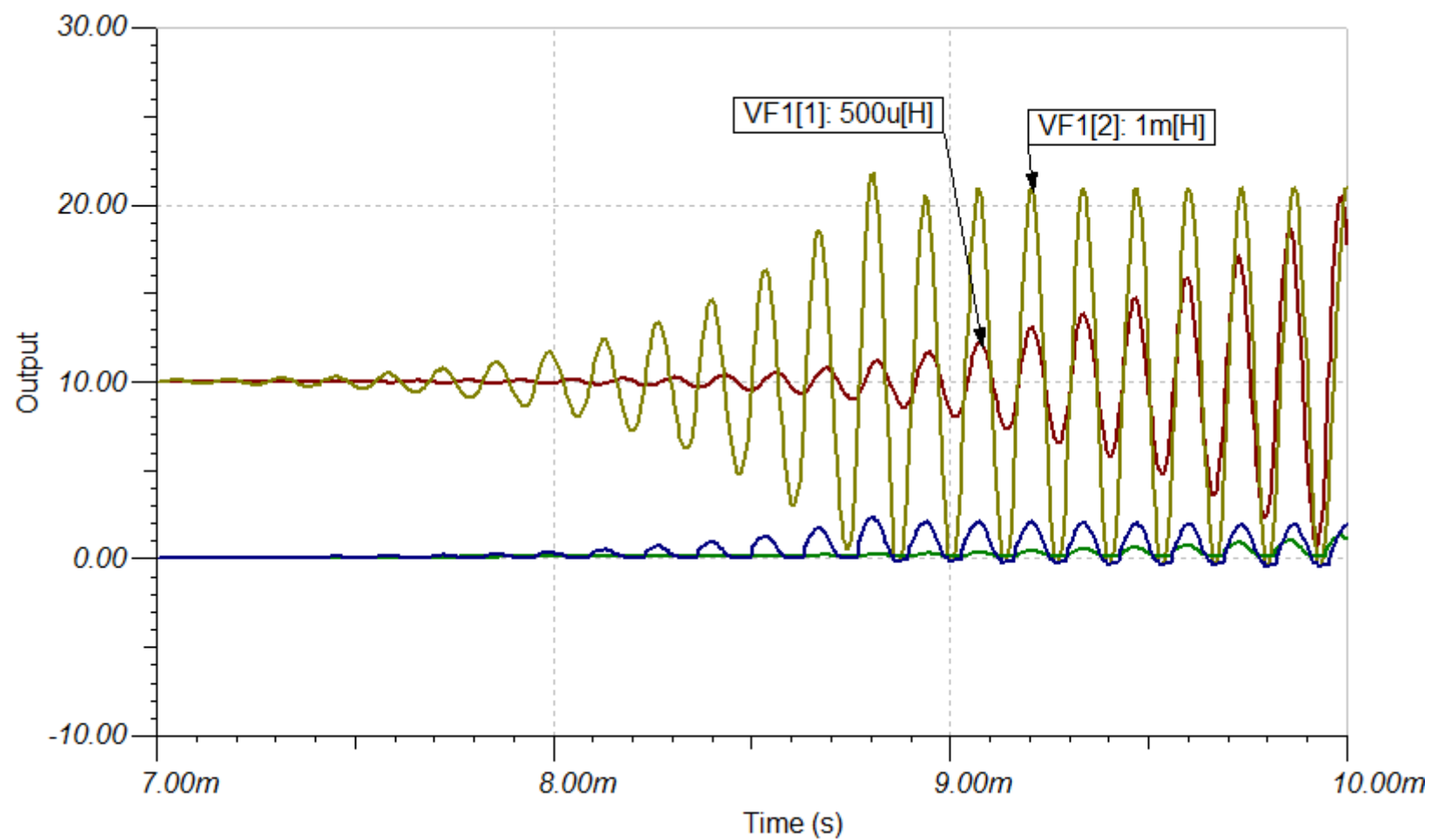


Рис.5.13

Транзистор в схеме ОБ, не инвертирует сигнал ПОС $\underline{\beta} \cdot \underline{U}_{\text{вых}}$.

Влияние связи L_2



LC-генератор на ОУ

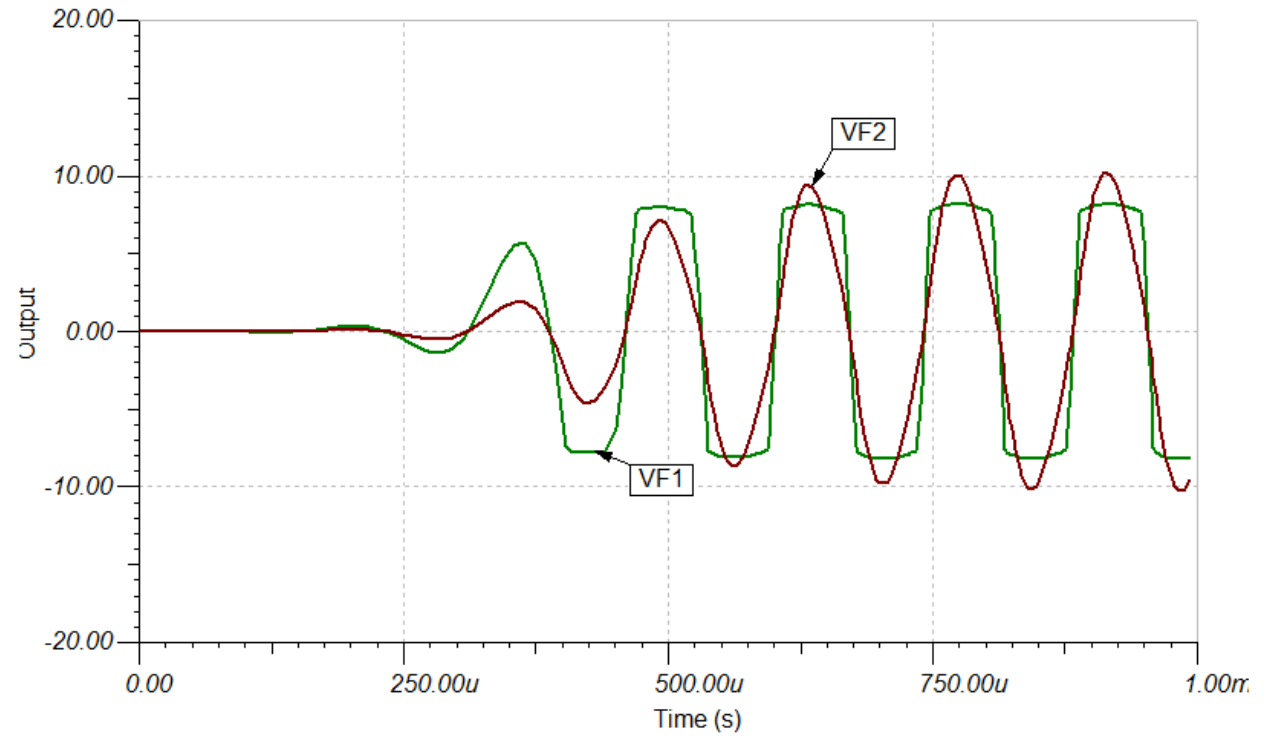
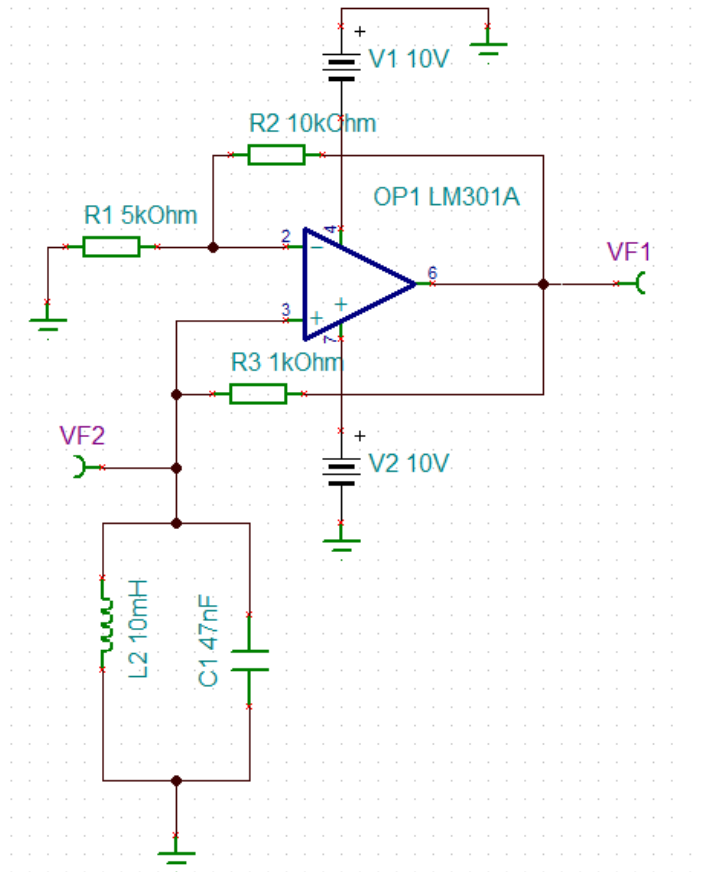
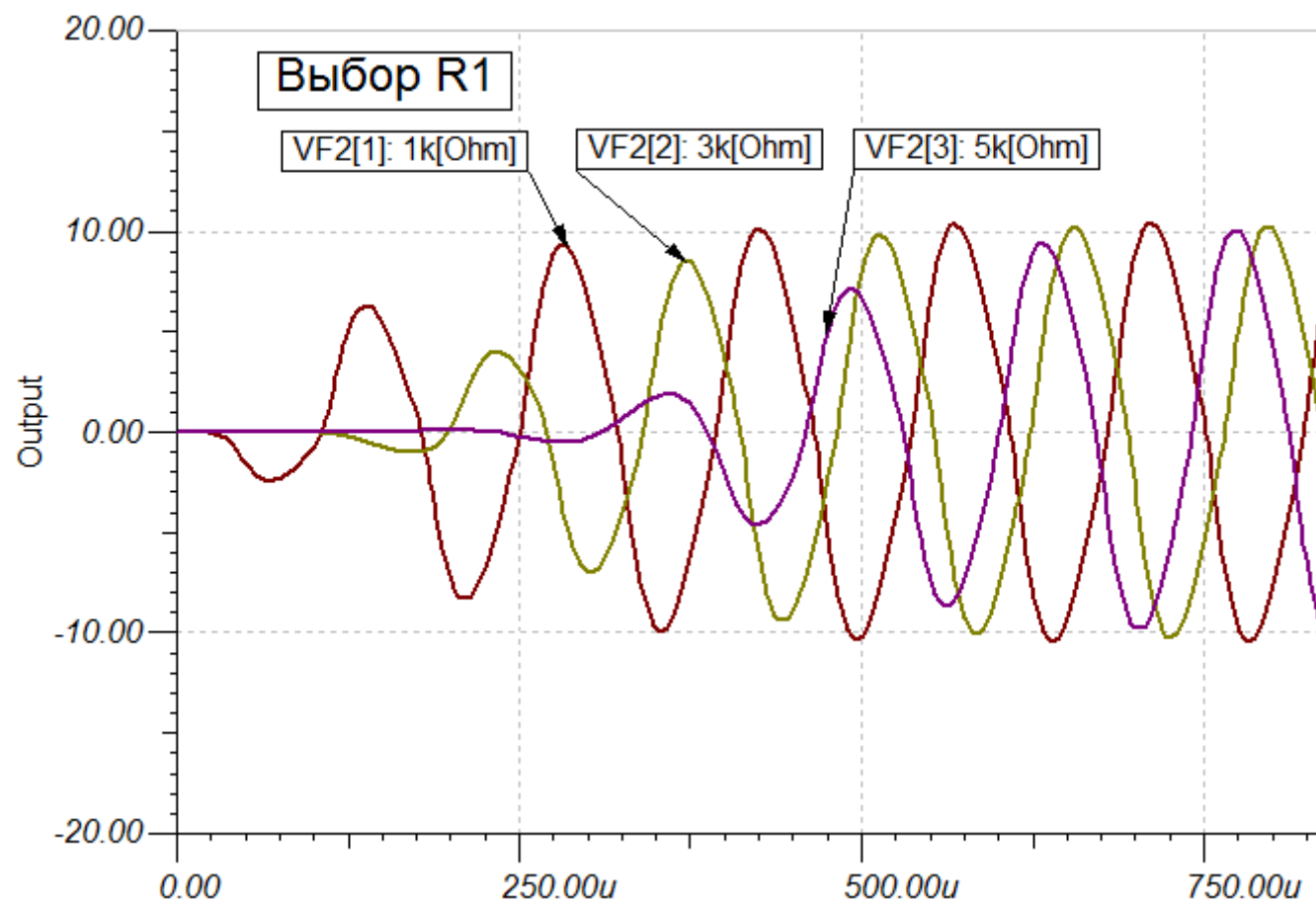


Рис.5.15

Рекомендуется: $\frac{R_2}{R_1} = 10$



Генератор Вина

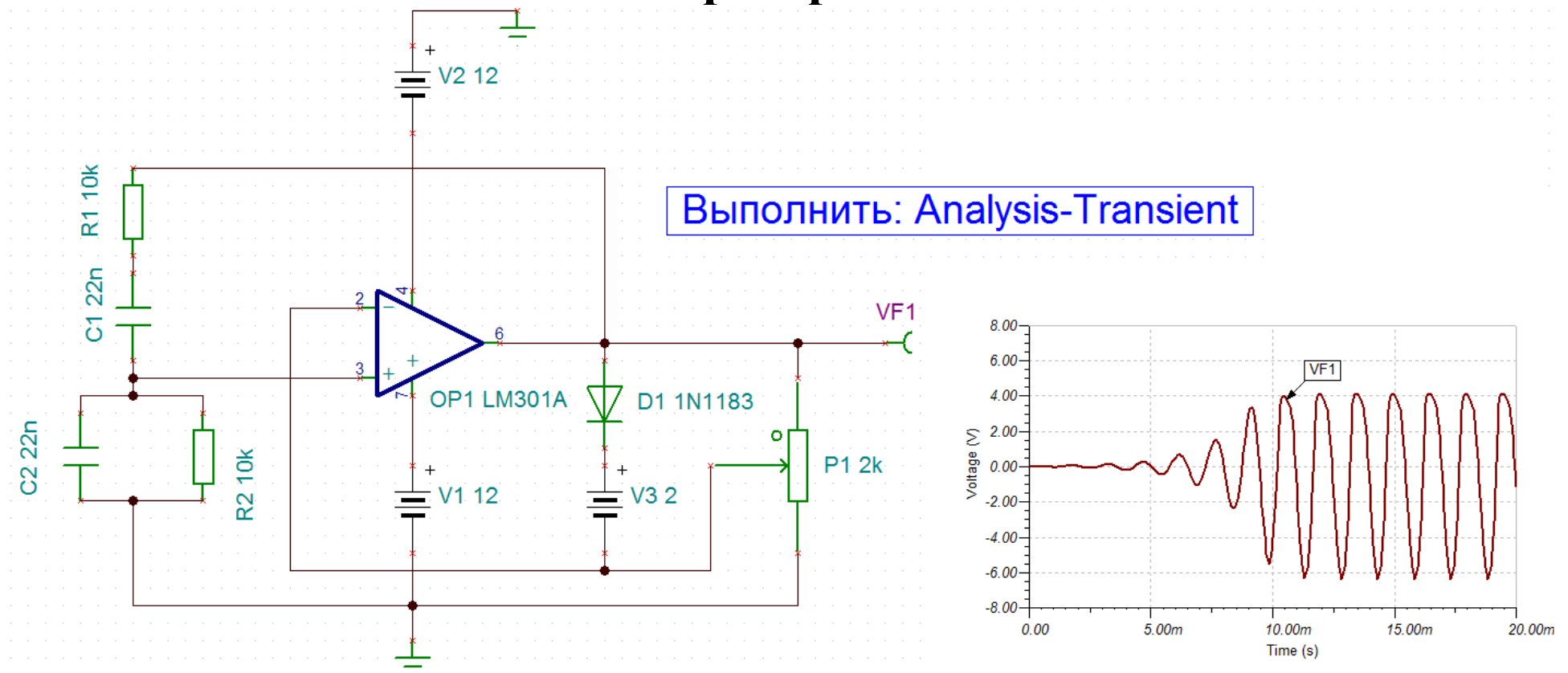


Рис.5.17

В генераторе Вина при равных сопротивлениях $R_1 = R_2$ и емкостях

$C_1=C_2$ на квазирезонансной частоте $f_k = \frac{1}{2\pi RC}$ фазовый сдвиг в цепи обратной связи равен нулю, а петлевой коэффициент передачи $\beta=1/3$.

Для самовозбуждения коэффициент усиления усилителя K должен быть больше 3. Это достигается регулировкой потенциометра $P1$. Дiod и источник напряжения E_2 требуются для стабилизации режима генерации.

Мультивибратор на ОУ

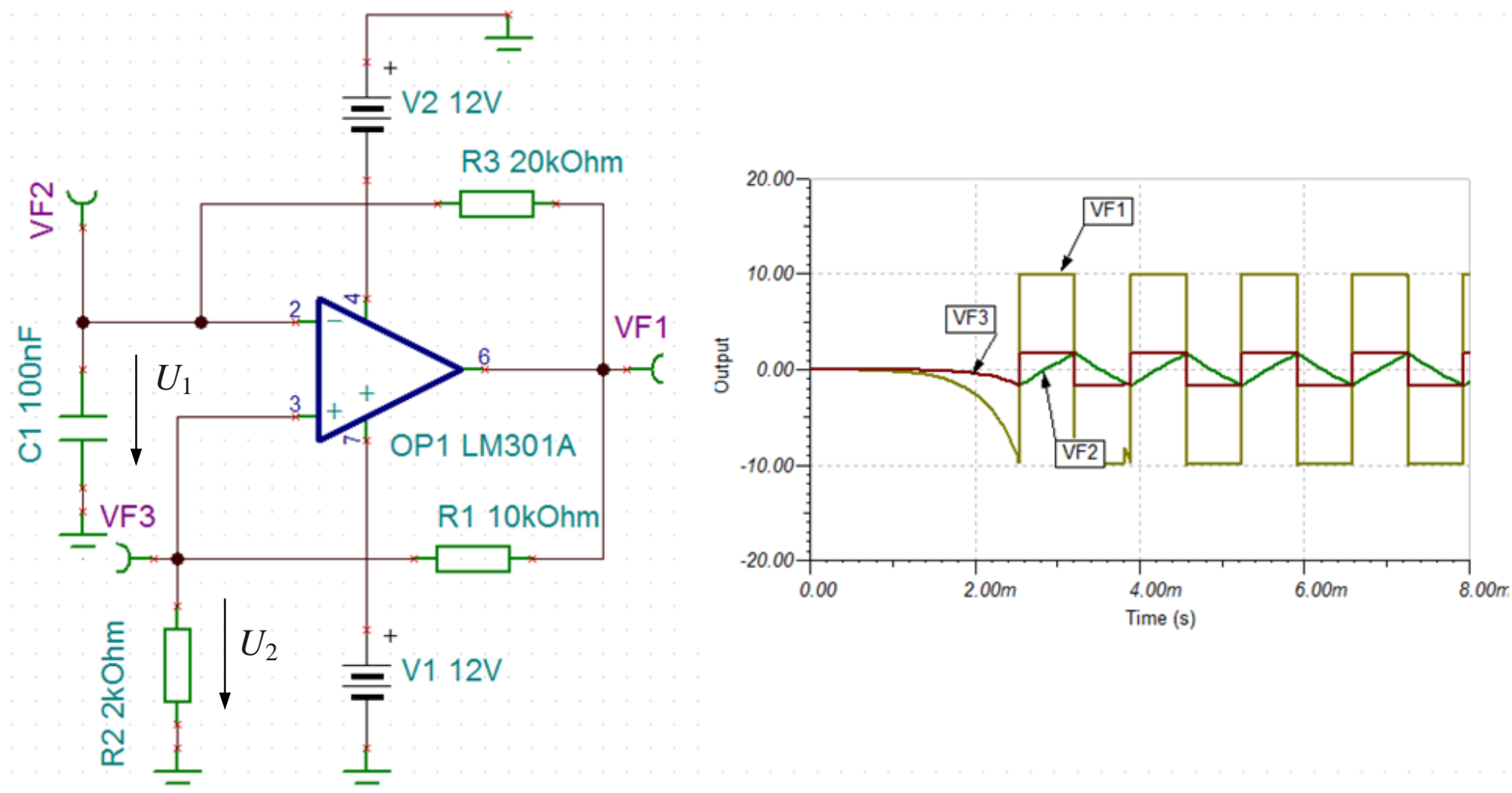


Рис.5.18

Делитель R_2 - R_1 создает положительную ОС, которая переводит ОУ в триггерный режим.

Порог переключения $|U_{пор}| = \left| \frac{U_{max} R_2}{R_1 + R_2} \right|$. Когда напряжение U_1 сравнивается с порогом, $U_{вых}$ меняет знак и начинается перезаряд емкости C_1 .

Период импульсов: $T = 2R_3 C_1 \ln(1 + 2 \frac{R_2}{R_1})$.

Стабилизация частоты генераторов

Относительная нестабильность частоты

$$\frac{\Delta f}{f_p}.$$

Для RC-генераторов относительная нестабильность составляет 0,1%. Для LC-генераторов: 0,01%.

Параметрическая стабилизация (термостатирование, монтаж и т.п.)

$$\frac{\Delta f}{f_p} = 10^{-4}$$

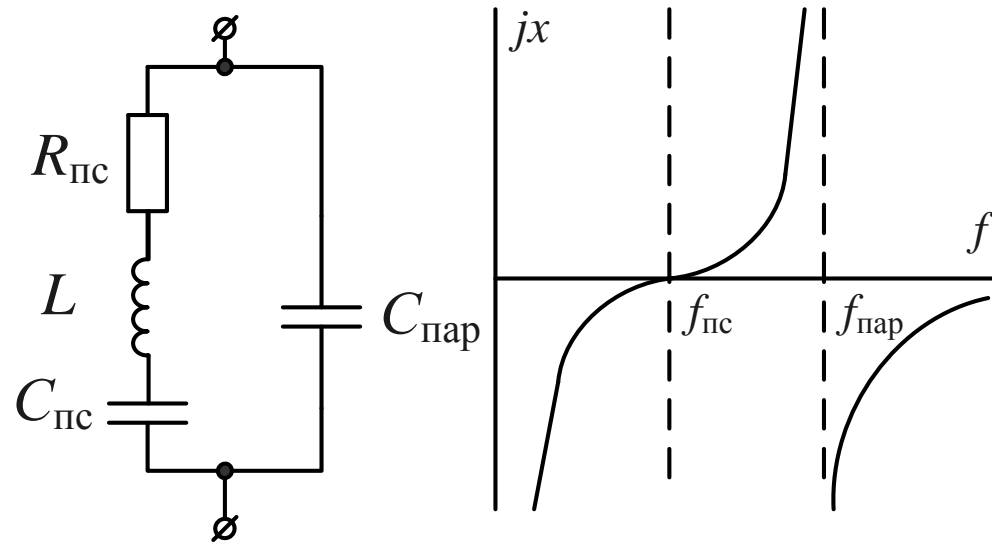
Кварцевая стабилизация частоты

В схемах генераторов вместо LC-контура применяют кварцевый резонатор, что позволяет снизить относительную нестабильность до 10^{-7} (на частоте 1 МГц отклонение частоты $\Delta f = 0,1 \text{ Гц}$).

Кварцевый резонатор (кратко кварц) представляет собой тонкую прямоугольную пластинку минерала кварца, грани которой опреде-

ленным образом ориентированы по отношению к осям кристалла. Кварц обладает прямым и обратным пьезоэлектрическим эффектом. Прямой эффект проявляется в том, что при сжатии или растяжении кварца на его противоположных гранях появляются электрические заряды.

Эквивалентная схема кварцевого резонатора



Резонансные частоты отличаются на 1%.
Добротность 10000.

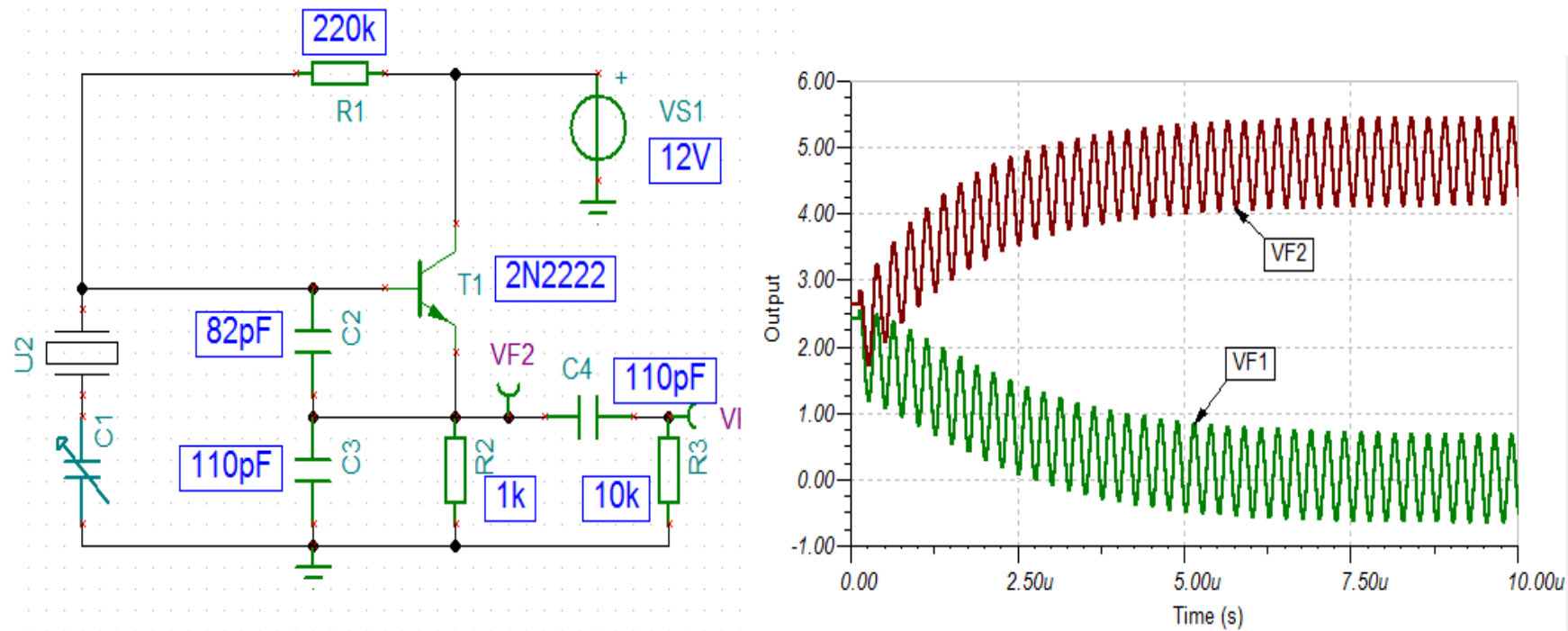


Рис.5.20. Модель кварцевого генератора