

Практическое занятие 8

Модуляция и демодуляция электрических сигналов

Модуляцией называют управление параметрами несущего электрического сигнала в соответствии с передаваемым информационным сигналом.

Несущий гармонический сигнал:

$$u(t) = U_m \cos(\omega_0 t + \varphi_0) = U_m \cos \psi(t).$$

Информационный сигнал:

$$a(t) = U_{m\Omega} \cos \Omega t,$$

причем: $\Omega \ll \omega_0$.

Управляемые параметры несущего сигнала:

Амплитудная модуляция:

$$U_m(t) = U_m + a(t) = U_m + U_{m\Omega} \cos \Omega t ;$$

Частотная модуляция: $\omega(t) = \omega_0 + \Delta\omega \cos \Omega t = \omega_0 + K_{чм} a(t),$

$\Delta\omega$ -девиация частоты, $K_{чм}$ - коэффициент частотной модуляции;

Фазовая модуляция:

$\psi(t) = \omega_0 t + \varphi_0 + K_{\phi m} a(t)$, $K_{\phi m}$ - коэффициент фазовой модуляции.

В устройствах связи, управления и автоматики применяют сигналы с импульсной модуляцией:

АИМ- амплитудно-импульсная модуляция:

ШИМ – широтно-импульсная модуляция;

ЧИМ – частотно-импульсная модуляция;

КИМ – кодово- импульсная модуляция и т.д.

Амплитудные модуляторы и демодуляторы

Спектр АМ - сигнала

$$u(t) = (U_m + U_{m\Omega} \cos \Omega t)_m \cos(\omega_0 t + \varphi_0) = U_m (1 + m \cos \Omega t) \cos(\omega_0 t + \varphi_0),$$

U_m - амплитуда сигнала в отсутствии модуляции;

ω_0 - несущая частота;

$$m = \frac{U_{m\Omega}}{U_m} \leq 1 - \text{коэффициент модуляции};$$

Ω - частота модуляции.

По формулам произведения косинусов преобразуем АМ-сигнал:

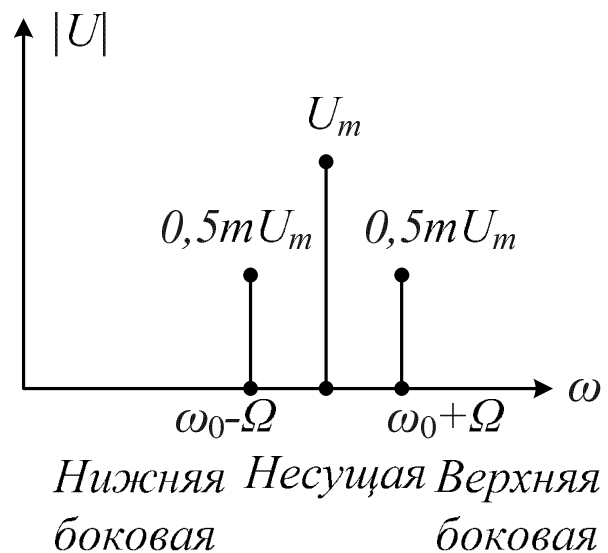
$$u(t) = U_m \cos(\omega_0 t + \varphi_0) + 0,5mU_m \cos((\omega_0 + \Omega)t + \varphi_0) + 0,5mU_m \cos((\omega_0 - \Omega)t + \varphi_0).$$

АМ-сигнал содержит три гармоники:

$U_m \cos(\omega_0 t + \varphi_0)$ - несущее колебание;

$0,5mU_m \cos((\omega_0 + \Omega)t)$ - верхнее боковое колебание;

$0,5mU_m \cos((\omega_0 - \Omega)t + \varphi_0)$ - нижнее боковое колебание.



Амплитудный спектр АМ - сигнала
 Ширина спектра $\Pi = 2\Omega$.

Амплитудный модулятор на полевом транзисторе

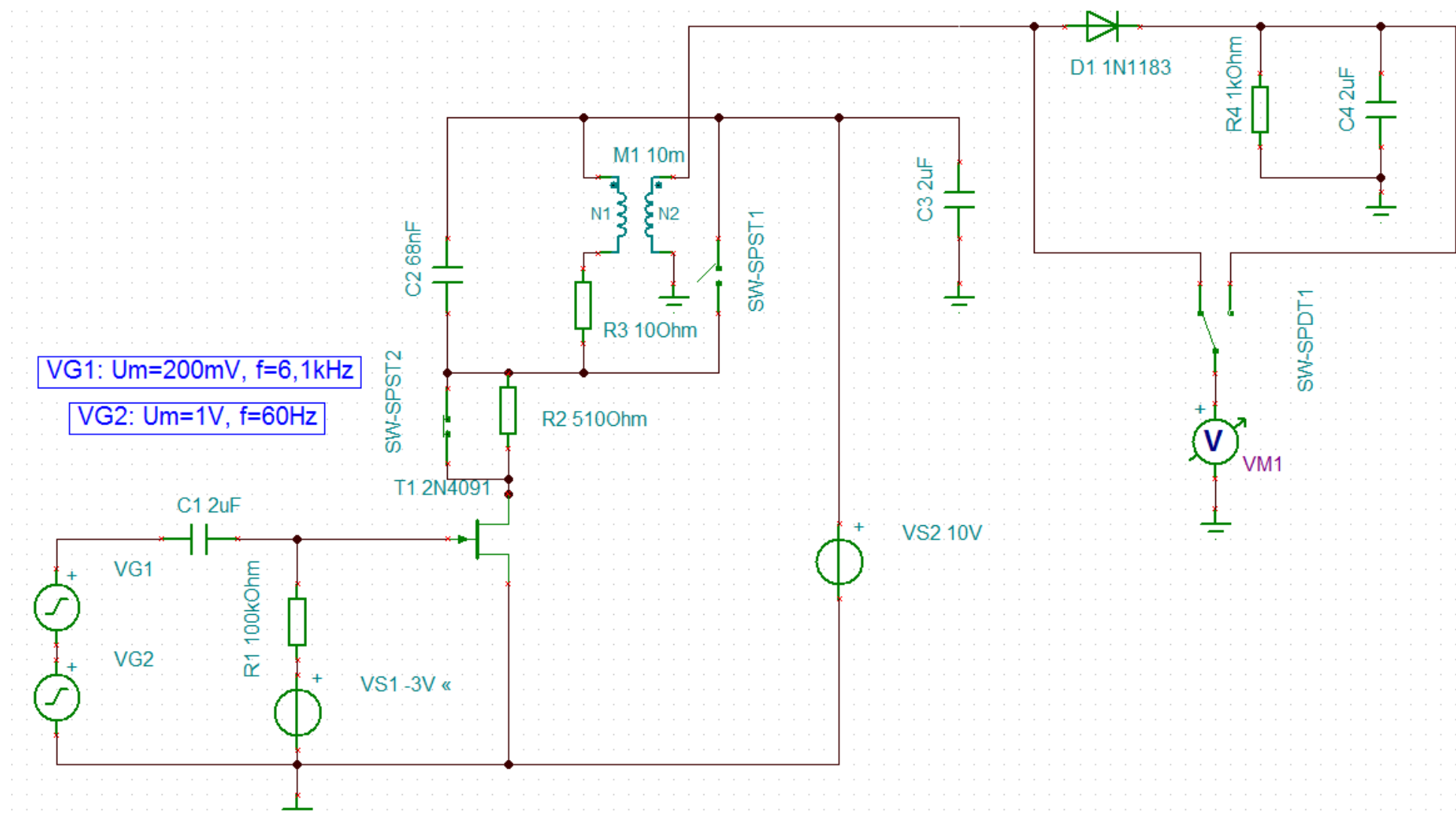


Рис.8.1. Амплитудный модулятор и детектор

Передаточная характеристика полевого транзистора:

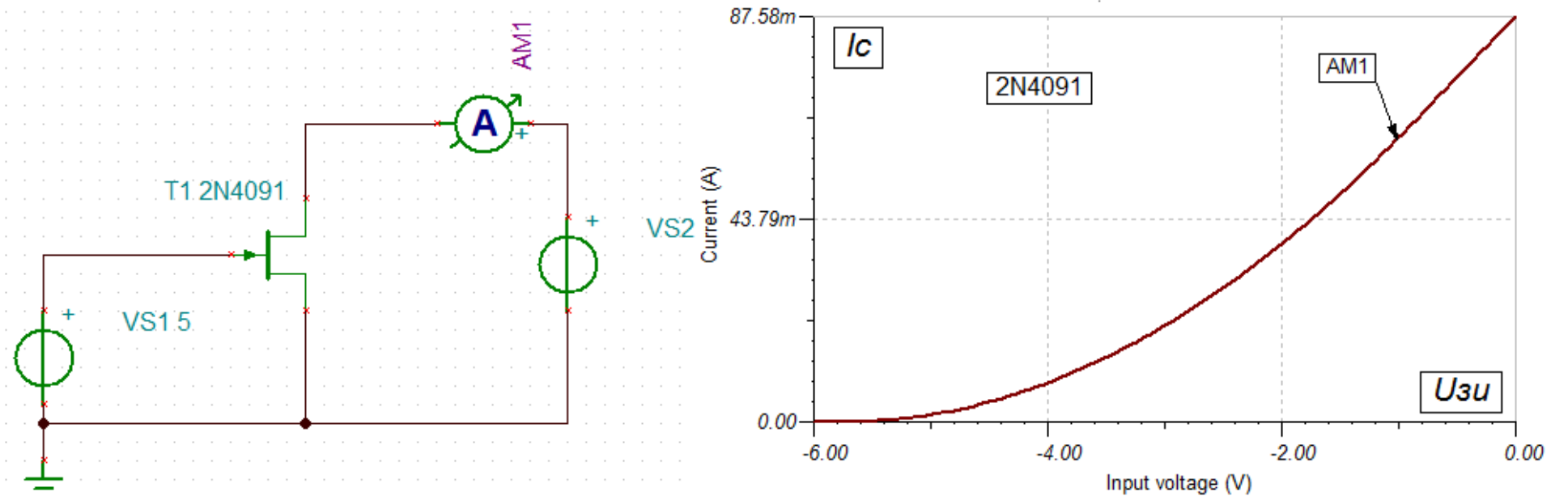


Рис.8.2

Аппроксимация ВАХ: $i(u) = a_1(u - u_{nop}) + a_2(u - u_{nop})^2$.

На вход модулятора подаем сумму:

$$u(t) = U_m \cos \omega_0 t + U_{m\Omega} \cos \Omega t.$$

Резонансный контур настроен на несущую частоту.

На резонансном контуре будут выделяться составляющие, попадающие в полосу пропускания:

$$u_{\kappa}(t) \approx R_{рез} [a_1 U_m \cos \omega_0 t + a_2 U_m U_{m\Omega} \cos(\omega_0 - \Omega)t + a_2 U_m U_{m\Omega} \cos(\omega_0 + \Omega)t],$$

$R_{рез}$ - резонансное сопротивление контура.

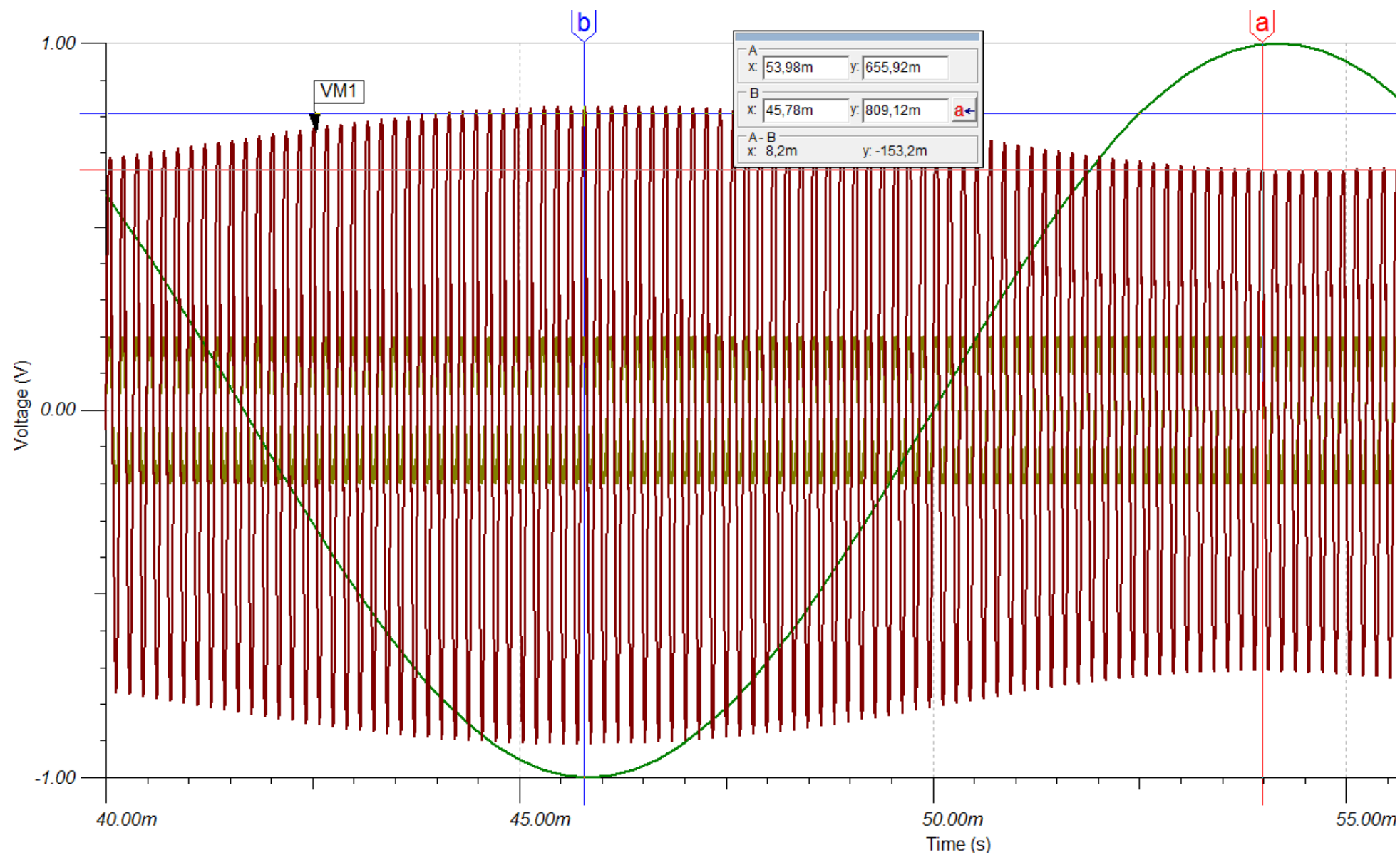


Рис.8.3

$$U_m = \frac{809 + 656}{2} = 732 \text{ мВ}, mU_m = \frac{809 - 656}{2} = 76,5 \text{ мВ}.$$

$$m = \frac{76,5}{732} = 0,104.$$

Амплитудный демодулятор (детектор)

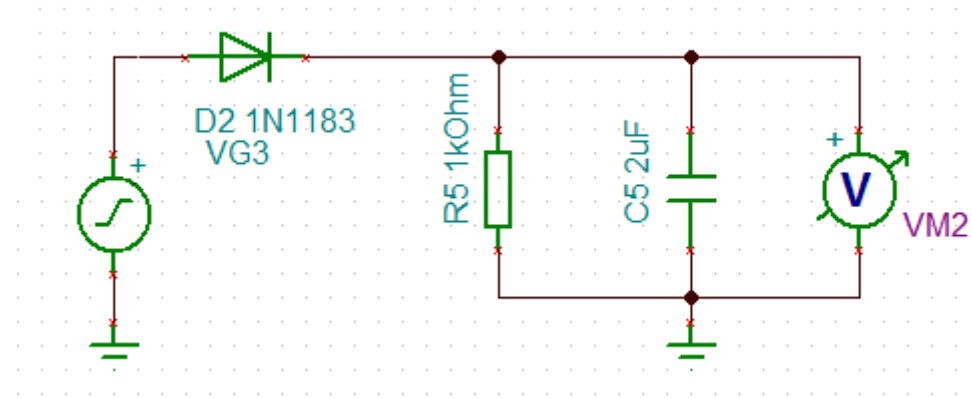


Рис.8.4

Выбор фильтра:

$$\frac{1}{\omega_0 C_\Phi} \ll R_n \ll \frac{1}{\Omega C_\Phi};$$

$$\frac{1}{2\pi \cdot 6 \cdot 10^3 \cdot 2 \cdot 10^{-6}} \ll R_H \ll \frac{1}{2\pi \cdot 60 \cdot 2 \cdot 10^{-6}};$$

$$13,2 \text{ Ом} \ll R_H \ll 1,32 \text{ кОм}.$$

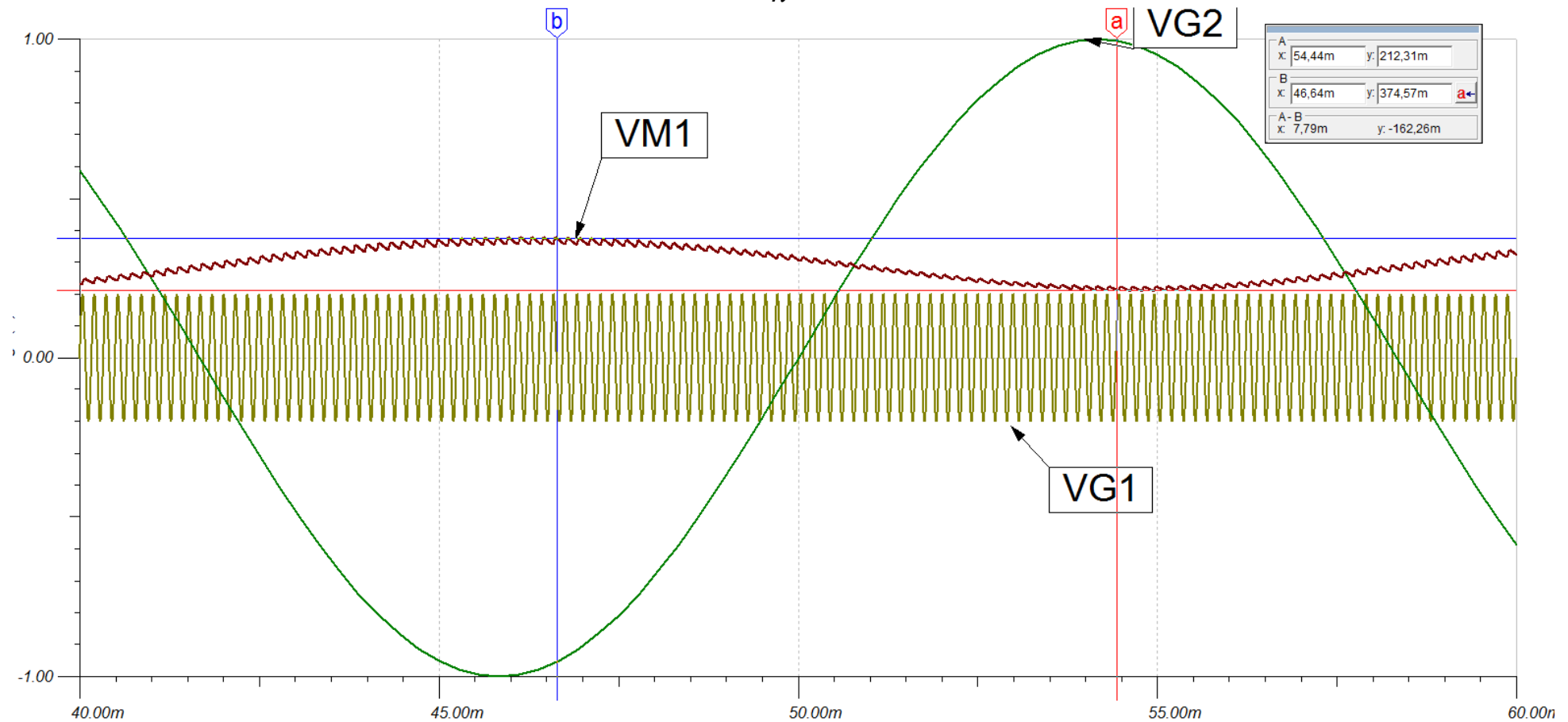


Рис.8.5. Амплитуда НЧ сигнала 80 мВ.

Частотные модуляторы и демодуляторы

При частотной модуляции сообщение изменяет частоту несущей:

$$\omega(t) = \omega_0 + K_{чм} U_{m\Omega} \cos \Omega t = \omega_0 + \Delta\omega \cos \Omega t,$$

$K_{чм}$ - коэффициент частотной модуляции;

$\Delta\omega = K_{чм} U_{m\Omega}$ - девиация частоты.

Мгновенная фаза меняется по закону:

$$\Psi(t) = \int \omega(t) dt = \int (\omega_0 + \Delta\omega \cos \Omega t) dt = \omega_0 t + \frac{\Delta\omega}{\Omega} \sin \Omega t.$$

ЧМ сигнал:

$$u_{чм}(t) = U_m \cos \Psi(t) = U_m \cos(\omega_0 t + \frac{\Delta\omega}{\Omega} \sin \Omega t) = U_m \cos(\omega_0 t + m \sin \Omega t),$$

m - индекс модуляции.

При фазовой модуляции сообщение изменяет начальную фазу несущей:

$$\varphi(t) = \varphi_0 + K_{\phi m} a(t),$$

$K_{\phi m}$ - коэффициент фазовой модуляции.

Мгновенная фаза: $\psi(t) = \omega_0 t + \varphi_0 + K_{\phi m} a(t)$.

ФМ сигнал: $u_{\phi M}(t) = U_m \cos \Psi(t) = U_m \cos(\omega_0 t + \varphi_0 + K_{\phi m} a(t))$.

Для гармонического сообщения мгновенная фаза:

$$\Psi(t) = \omega_0 t + \varphi_0 + K_{\phi m} U_{m\Omega} \cos \Omega t = \omega_0 t + \varphi_0 + m_{\phi M} \cos \Omega t;$$

$m_{\phi M} = K_{\phi m} U_{m\Omega}$ - индекс фазовой модуляции.

Мгновенная частота:

$$\omega = \frac{d\Psi}{dt} = \omega_0 - m_{\phi M} \Omega \sin \Omega t = \omega_0 - \Delta \omega_{\phi M} \sin \Omega t;$$

$\Delta \omega_{\phi M}$ - девиация частоты при фазовой модуляции.

ФМ сигнал: $u_{\phi M}(t) = U_m \cos(\omega_0 t + m_{\phi M} \cos \Omega t)$ - по форме аналогичен ЧМ-сигналу.

Выводы:

1. У ЧМ-сигнала девиация частоты $\Delta\omega = K_{\text{чм}} U_{m\Omega}$ и не зависит от частоты Ω . Индекс модуляции: $m = \frac{\Delta\omega}{\Omega}$.

2. У ФМ- сигнала девиация частоты $\Delta\omega_{\text{ФМ}} = K_{\text{фм}} U_{m\Omega} \Omega$, а индекс модуляции $m_{\text{ФМ}} = K_{\text{фм}} U_{m\Omega}$ не зависит от частоты.

Спектр ЧМ - сигнала

$$u_{\text{ЧМ}}(t) = U_m \cos(\omega_0 t + m \sin \Omega t) = U_m \cos \omega_0 t \cdot \cos(m \sin \Omega t) - U_m \sin \omega_0 t \cdot \sin(m \sin \Omega t).$$

При малом индексе модуляции ($m \ll 1$):

$$\begin{aligned} u_{\text{ЧМ}}(t) &\approx U_m \cos \omega_0 t - U_m \sin \omega_0 t \cdot m \sin \Omega t = \\ &= U_m \cos \omega_0 t - \frac{m U_m}{2} [\cos(\omega_0 - \Omega)t - \cos(\omega_0 + \Omega)t]. \end{aligned}$$

Спектр такой же, как при АМ.

При больших индексах модуляции ($m > 1$):

$$u_{\text{ЧМ}}(t) = U_m J_0(m) \cos \omega_0 t + \sum_{n=1}^{\infty} U_m J_n(m) \cos(\omega_0 + n\Omega)t +$$

$$+ \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n U_m J_n(m) \cos(\omega_0 - n\Omega)t,$$

$J_n(m)$ - функция Бесселя первого рода n -го порядка;

$$J_{-n}(m) = (-1)^n J_n(m).$$

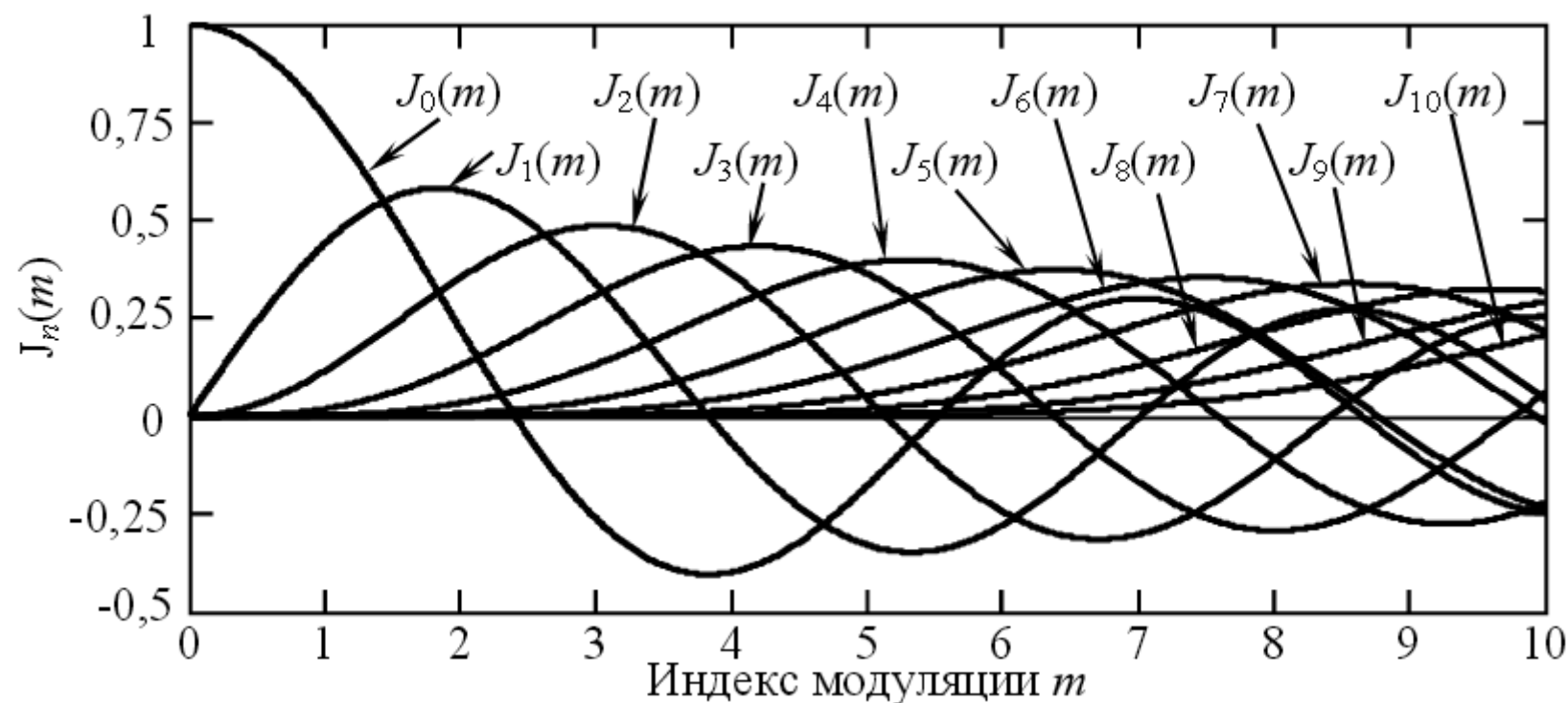


Рис.8.6. Графики функций Бесселя.

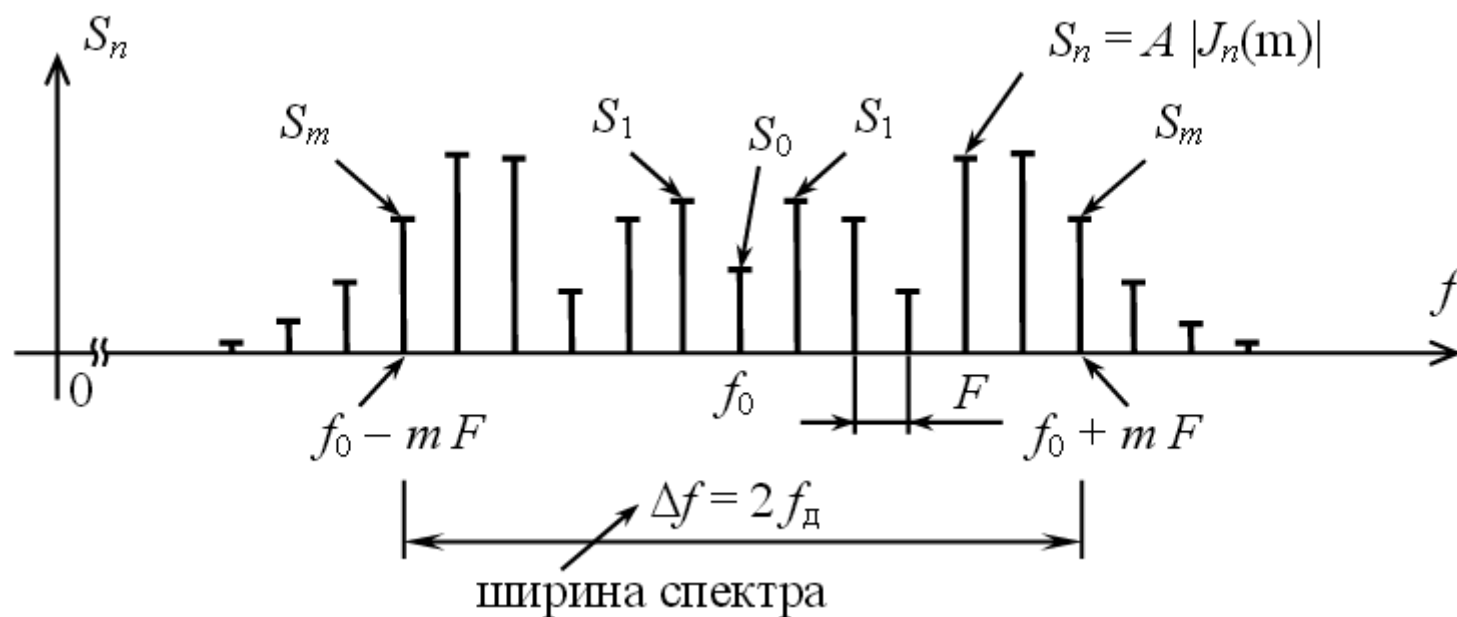


Рис.8.7. Односторонний амплитудный спектр ЧМ - радиосигнала

Частотный модулятор на варикапе

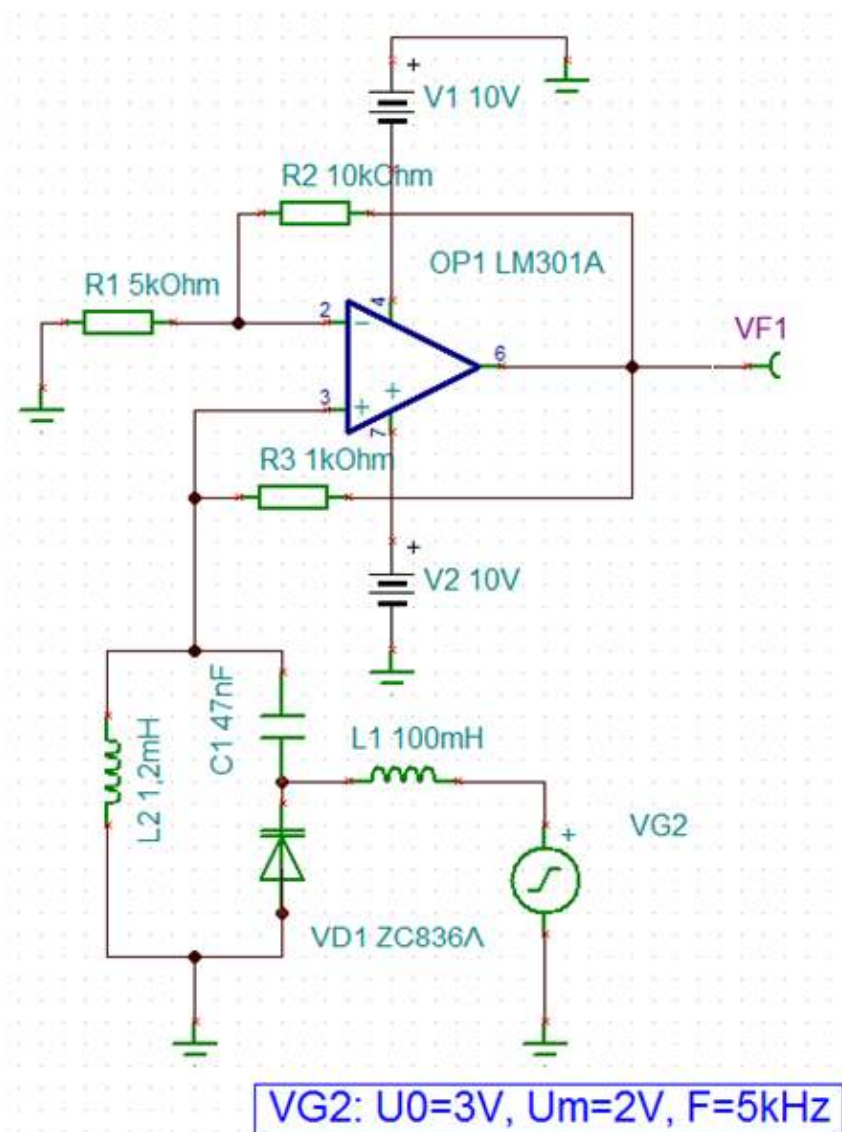


Рис.8.8

Варикап – полупроводниковый диод, у которого барьерная емкость p - n перехода изменяется управляющим напряжением.

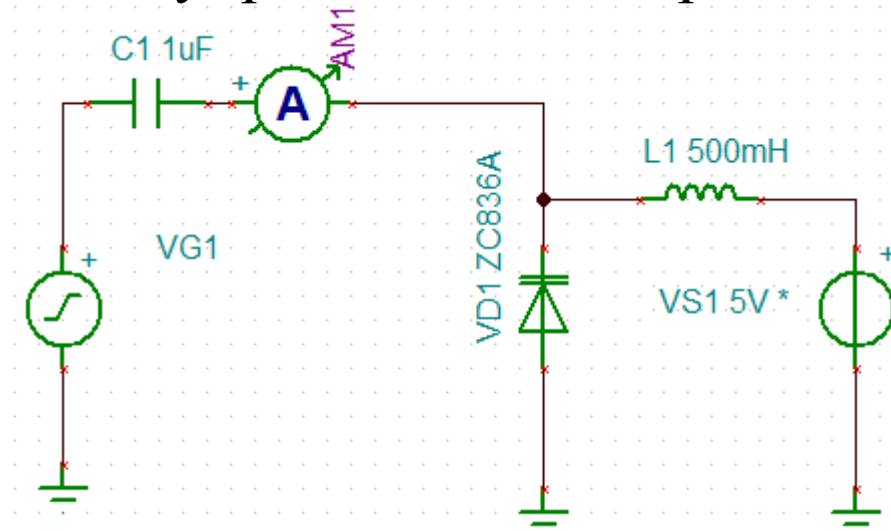


Рис.8.9. Измерение емкости варикапа

Начальная емкость варикапа
1ZC836A равна 185 пФ.

$$I_m = U_m \omega C.$$

Установим:

$$U_m = 0,1B, f = 15,915 \cdot 10^6 \text{ Гц} \quad C = \frac{I_m}{U_m 2\pi \cdot f} =$$

$$= \frac{I_m}{0,1 \cdot 2\pi \cdot 15,915 \cdot 10^6} = I_m(A) \cdot 10^{-7}(\Phi).$$

Изменяем напряжение VS1 от 0 до 10В и определяем ток.

При $U=0$ максимальный ток $I_m = 1,85mA$. $C = 185 pF$ - соответствует данным варикапа.

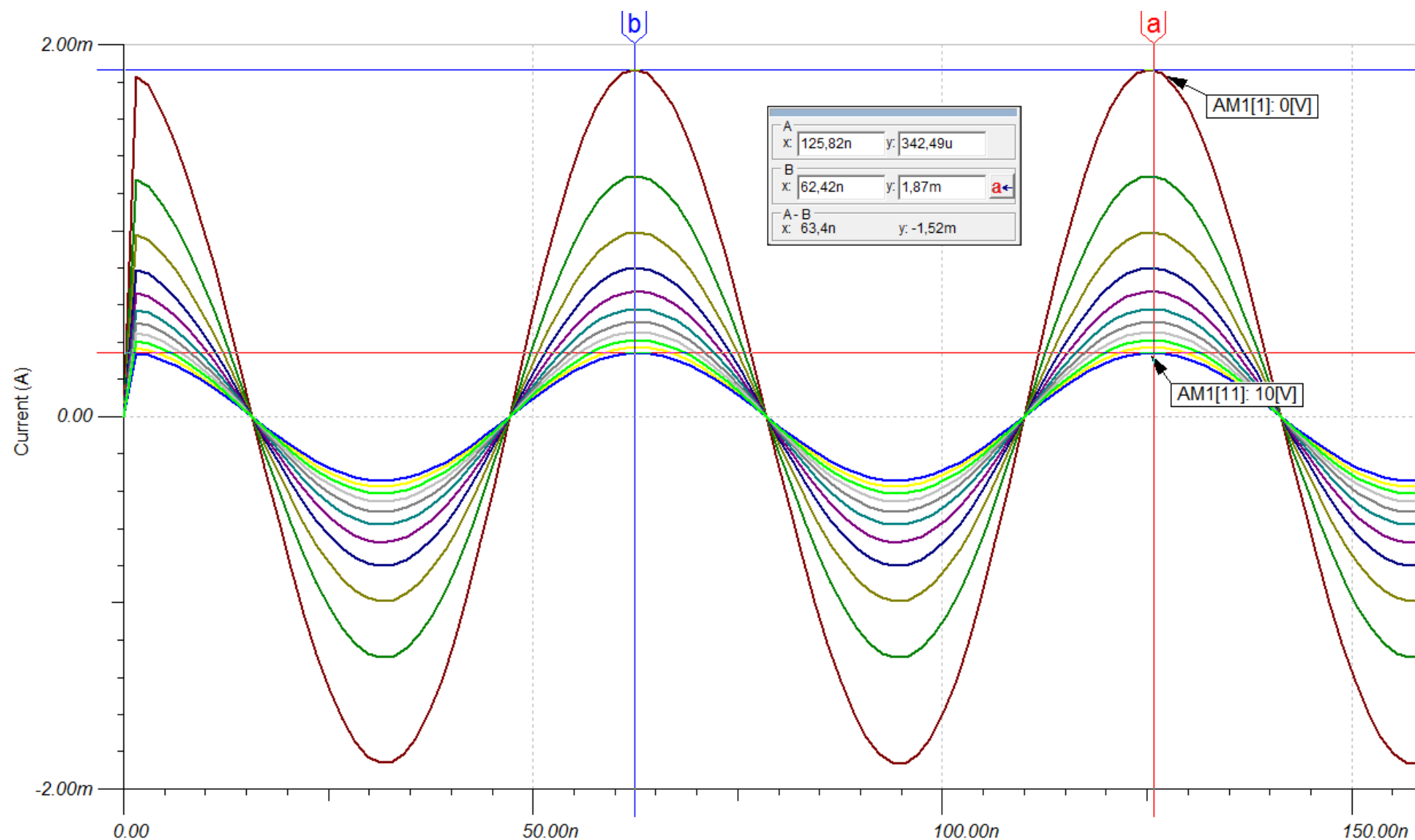
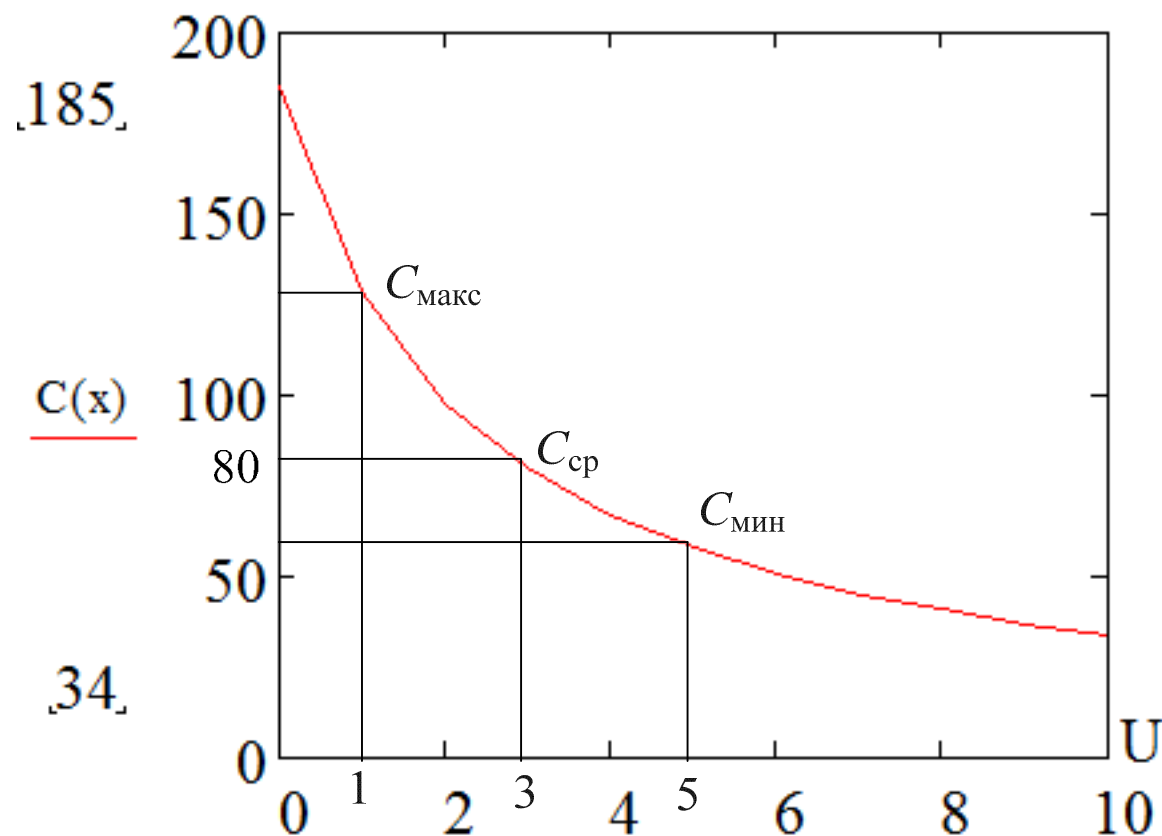


Рис.8.10. Графики тока в варикапе
По измеренным табличным значениям строим график $C(U)$:



Среднее значение емкости:
 $C_{\text{ср}} \approx 80 \text{ pF}.$

Рис. 8.11. Зависимость емкости варикапа от напряжения

В генераторе VG2 частотного модулятора установим постоянный уровень

$$U_0 = 3B, U_m = 2B, f = 5 \text{ кГц}.$$

Информационный сигнал: $a(t) = U_{m\Omega} \cos \Omega t = 2 \cos 2\pi \cdot 5 \cdot 10^3 t$

Измерим периоды ЧМ-колебания.

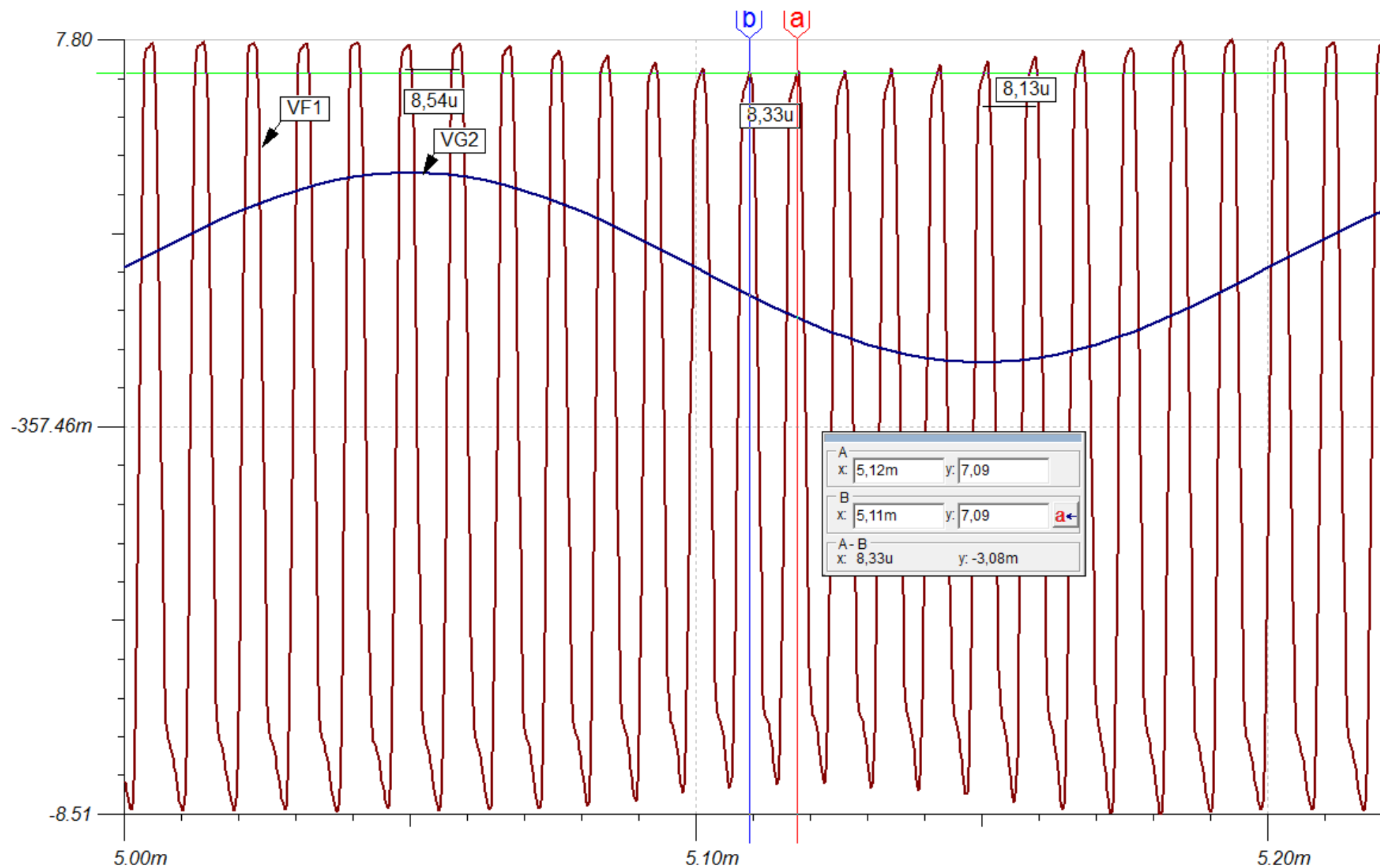


Рис.8.12. Частотно-модулированный сигнал

$$T_{cp} = 8,33 \text{ мкс}, f_{cp} = 120 \text{ кГц}, T_{мин} = 8,13 \text{ мкс}, f_{макс} = 123 \text{ кГц},$$

$$T_{макс} = 8,54 \text{ мкс}, f_{мин} = 117 \text{ кГц}.$$

Девияция частоты $\Delta f = 3 \text{ кГц}$.

Частотный детектор с одиночным контуром

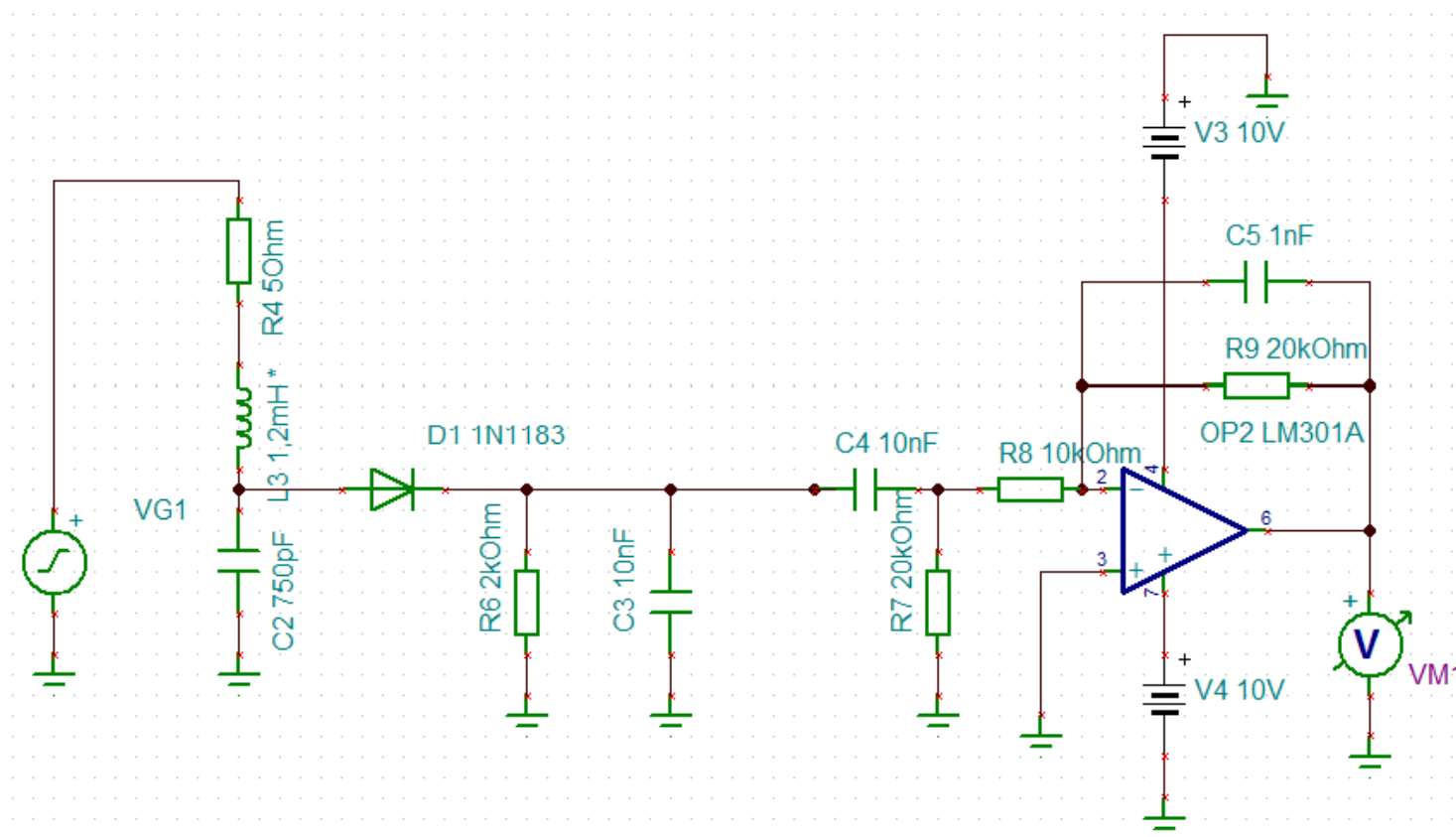


Рис.8.13. Частотный детектор на резонансном контуре

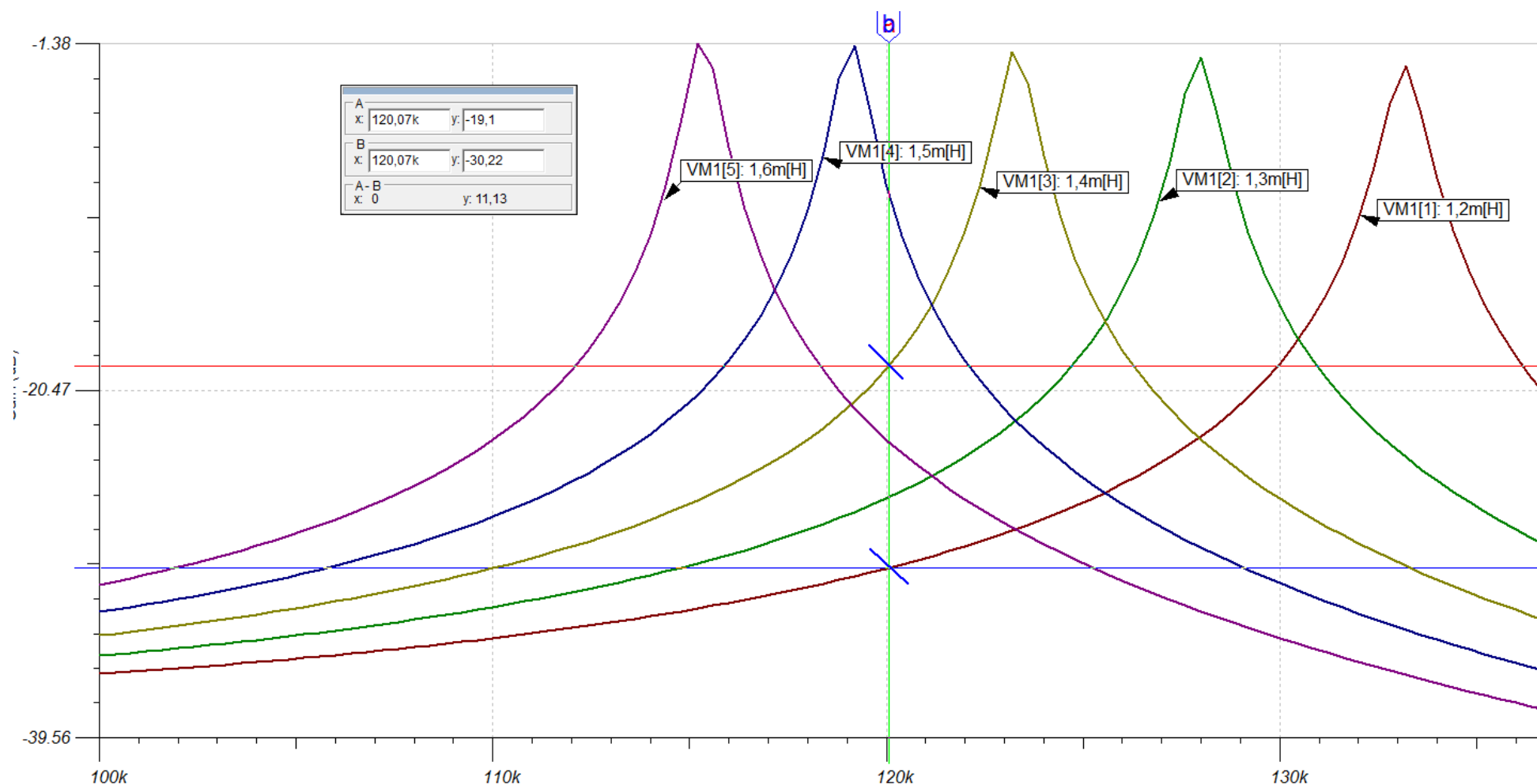


Рис.8.14. Выбор расстройки контура

Подключим частотный детектор к частотному модулятору. Проводим моделирование для $L_3 = 1,2$ мГн и 1,4 мГн.

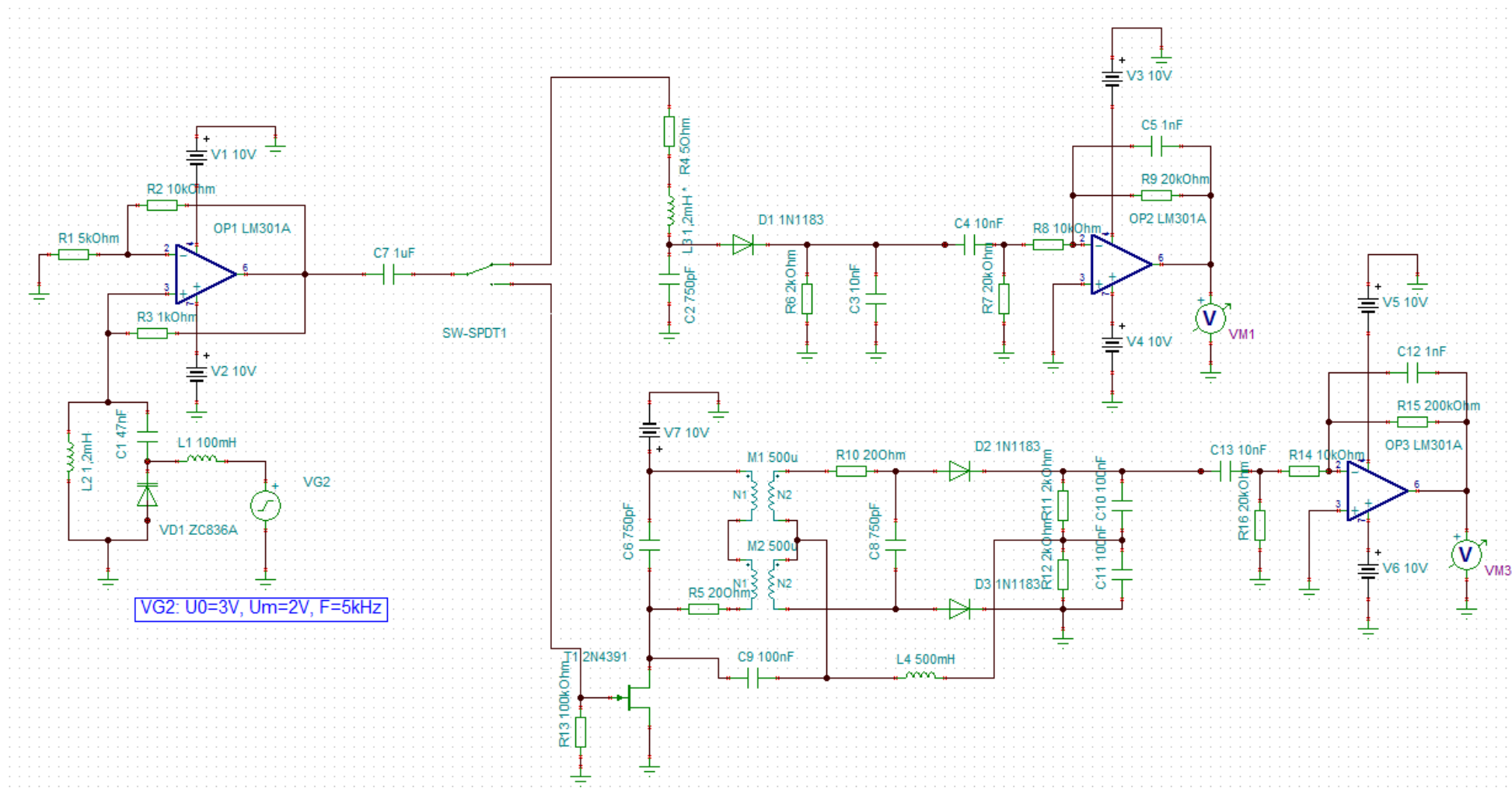


Рис.8.15. Частотный модулятор с частотными детекторами

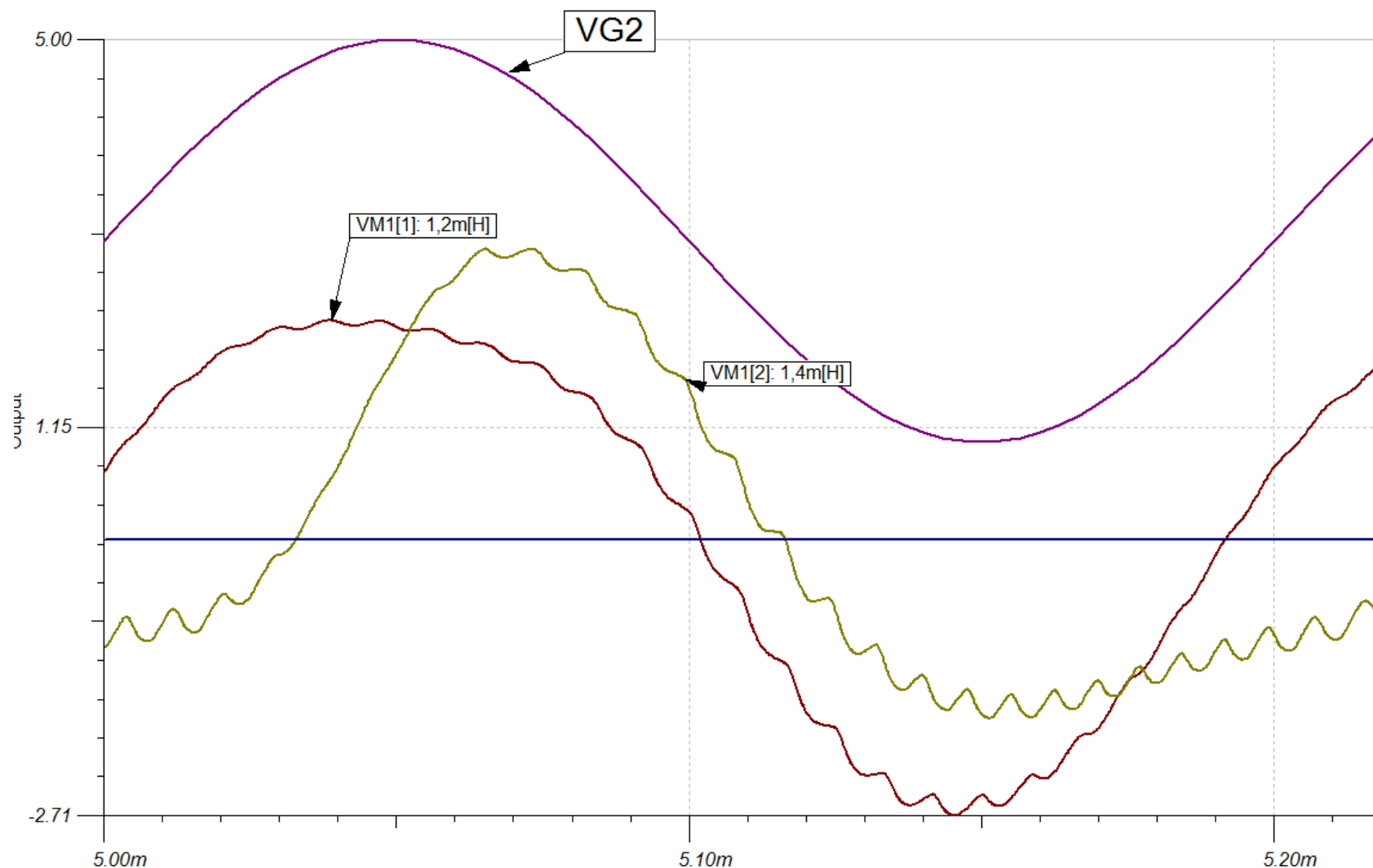


Рис.8.16. Информационный сигнал в одноконтурном частотном демодуляторе
Индуктивность $L_3 = 1,2$ мГн дает меньше искажений.

Если частота входного сигнала равна резонансной, напряжения \underline{U}_2 и \underline{U}_3 опережают \underline{U}_1 на 90° , $U_4 = U_5$ и $U_{вых} = 0$.

Если $f_{ex} \neq f_0$, происходит поворот вектора и на выходе будет напряжение.

В режиме *AC-AC Transfer Characteristic* получим передаточную характеристику двухконтурного частотного детектора.

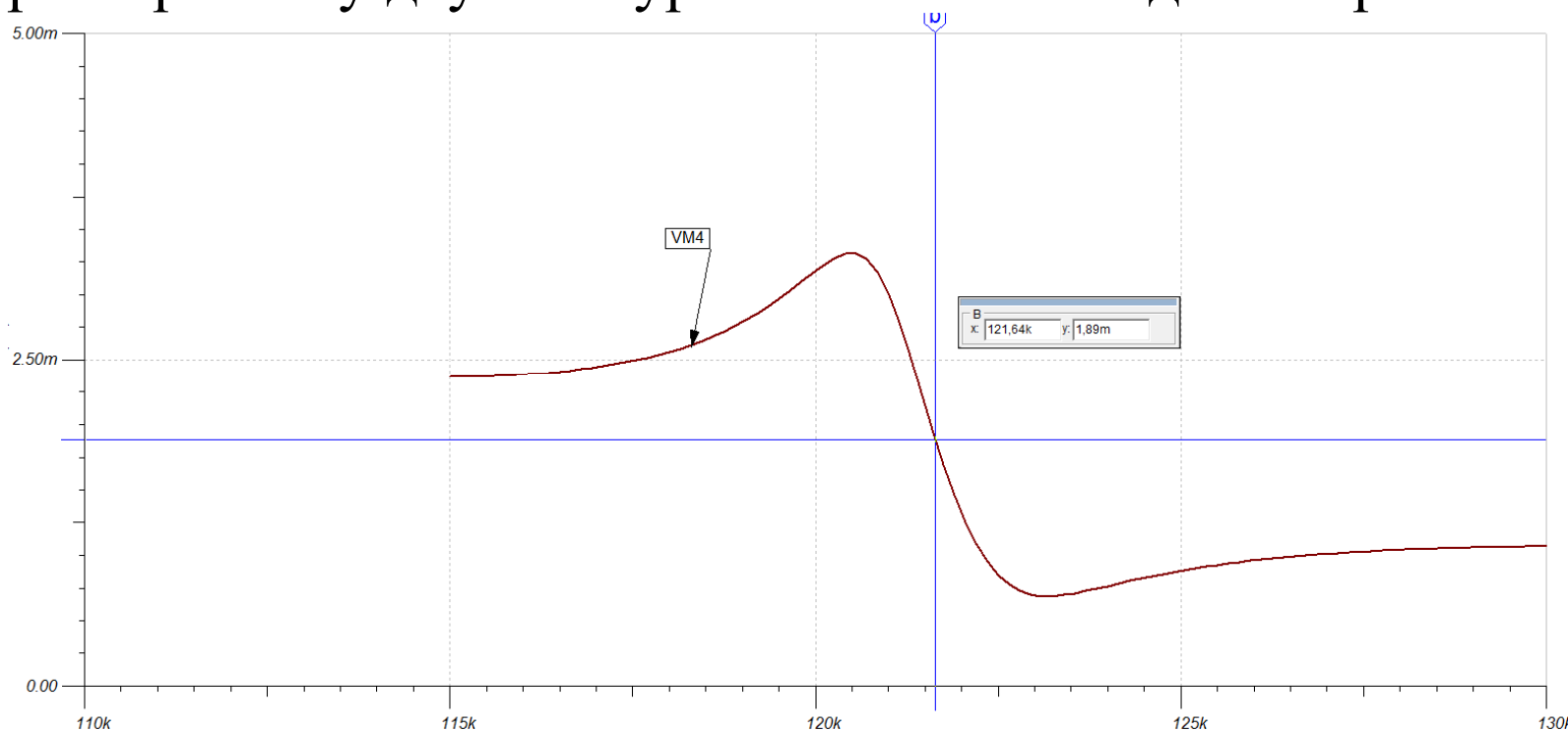


Рис.8.18. Передаточная характеристика двухконтурного ЧД

Получили резонансную частоту ЧД: $f_{ex} \neq f_0 = 121,64 \text{ кГц}$.
 Подключим ЧД к частотному модулятору.

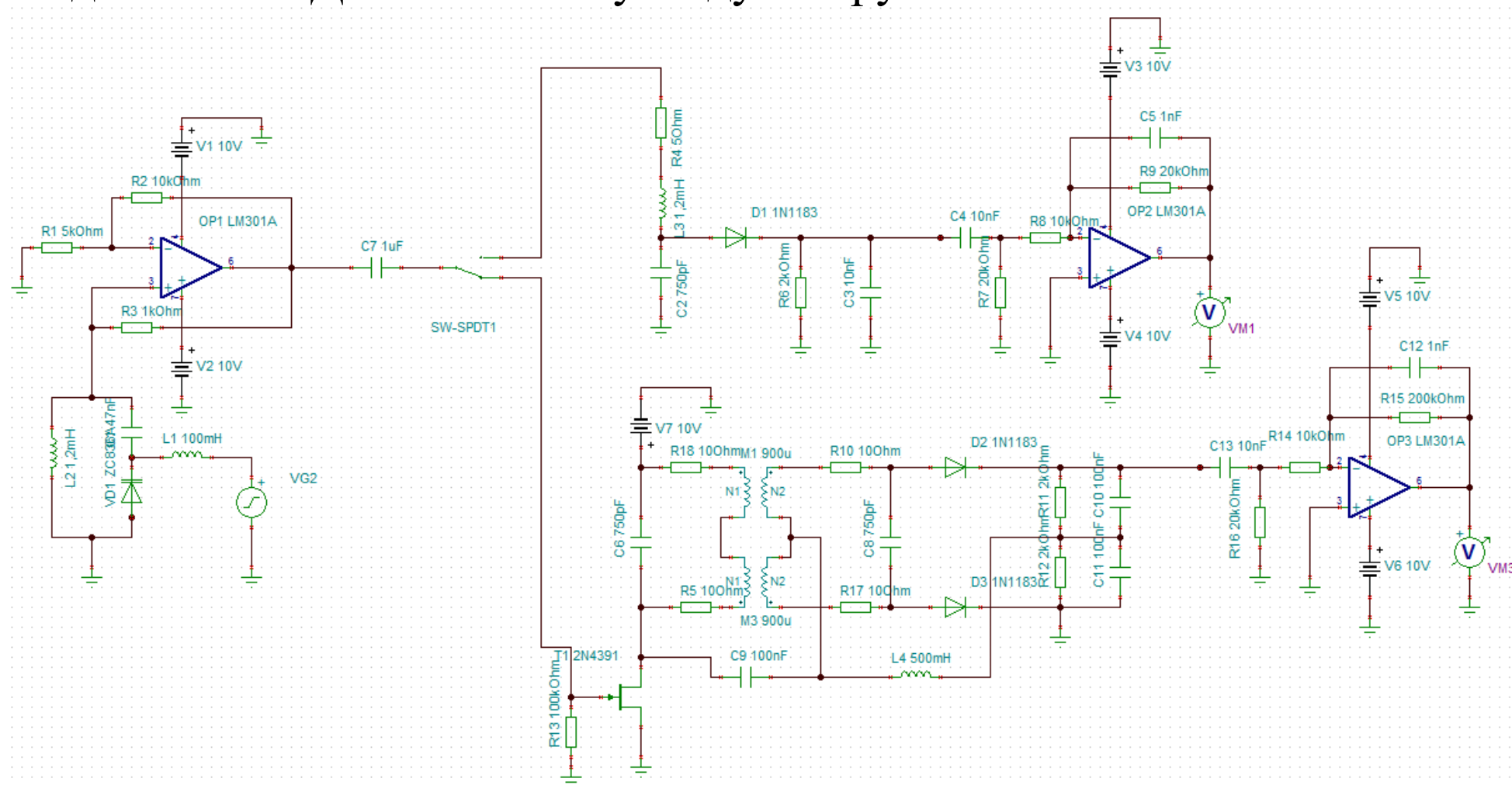


Рис.8.19. Частотный модулятор с частотными детекторами

Повторим измерение передаточной характеристики. Получим $f_{\text{ex}} \neq f_0 = 119,91 \text{ кГц}$.

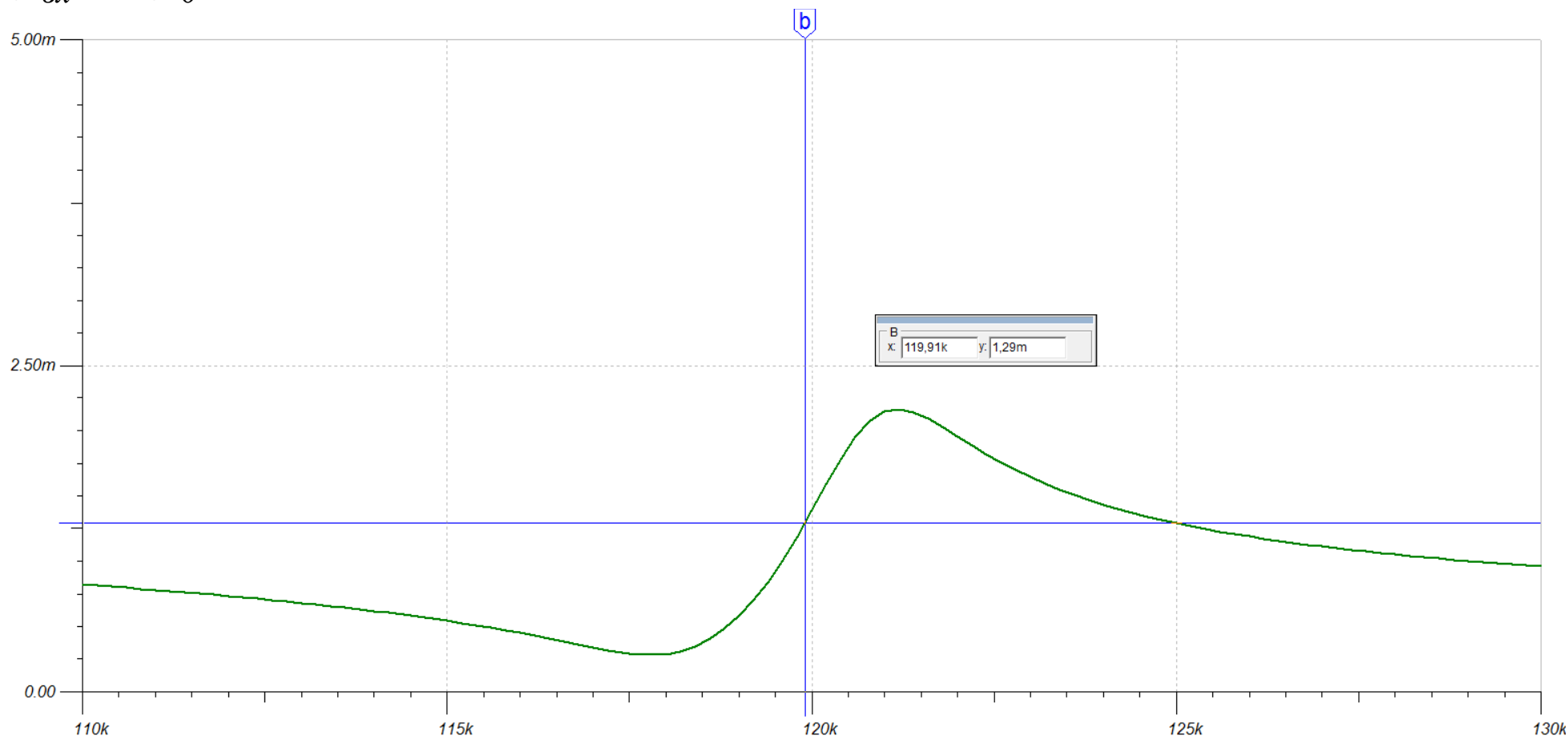


Рис.8.20. Передаточная характеристика частотного демодулятора
Этой центральной частоте соответствуют параметры частотного модулятора: $L_2 = 1,2 \text{ мН}$, $U_0 = 3 \text{ В}$, $U_m = 2 \text{ В}$, $f_M = 5 \text{ кГц}$.

В режиме *Transient* получим сигнал на выходе усилителя частотного детектора VM3:

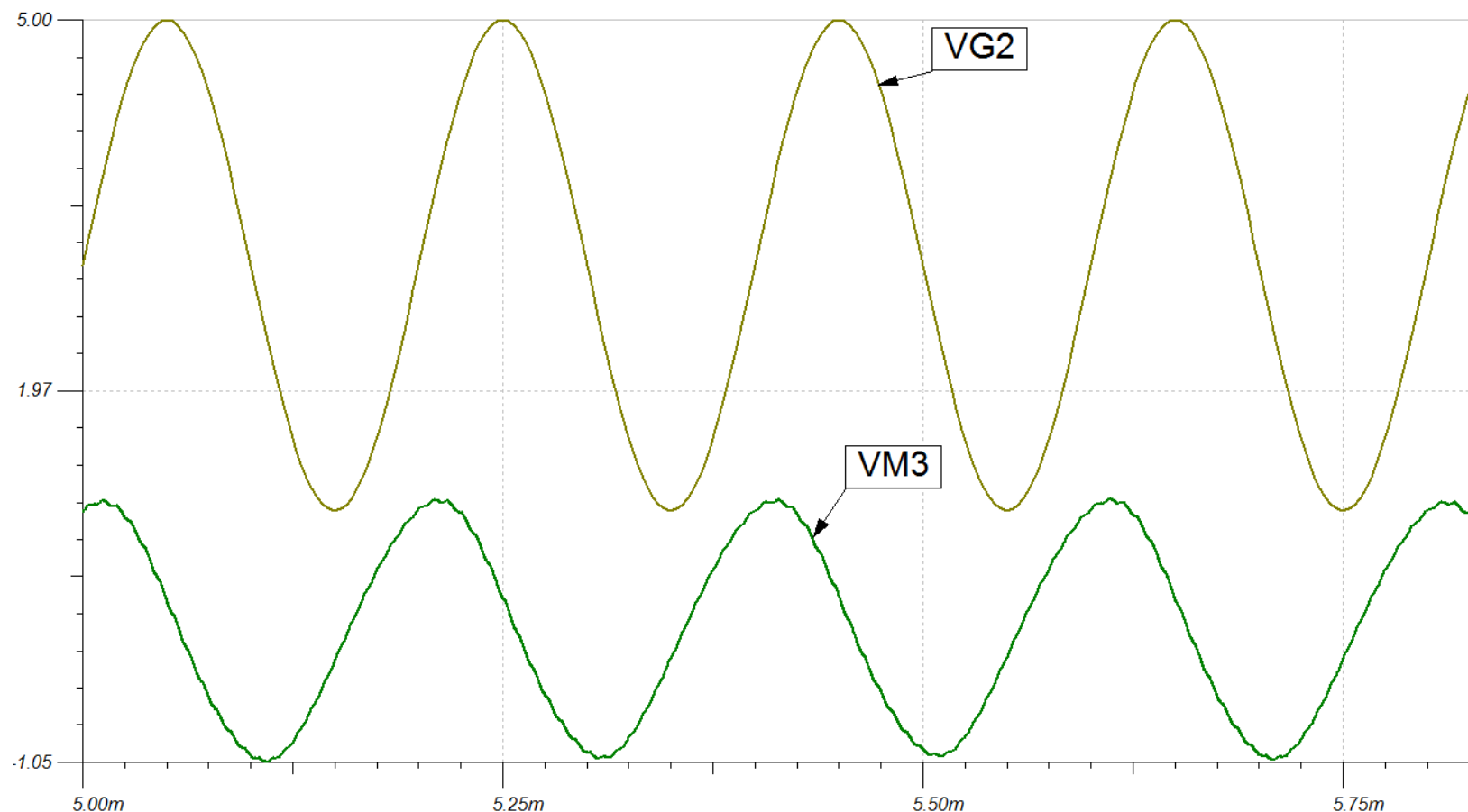


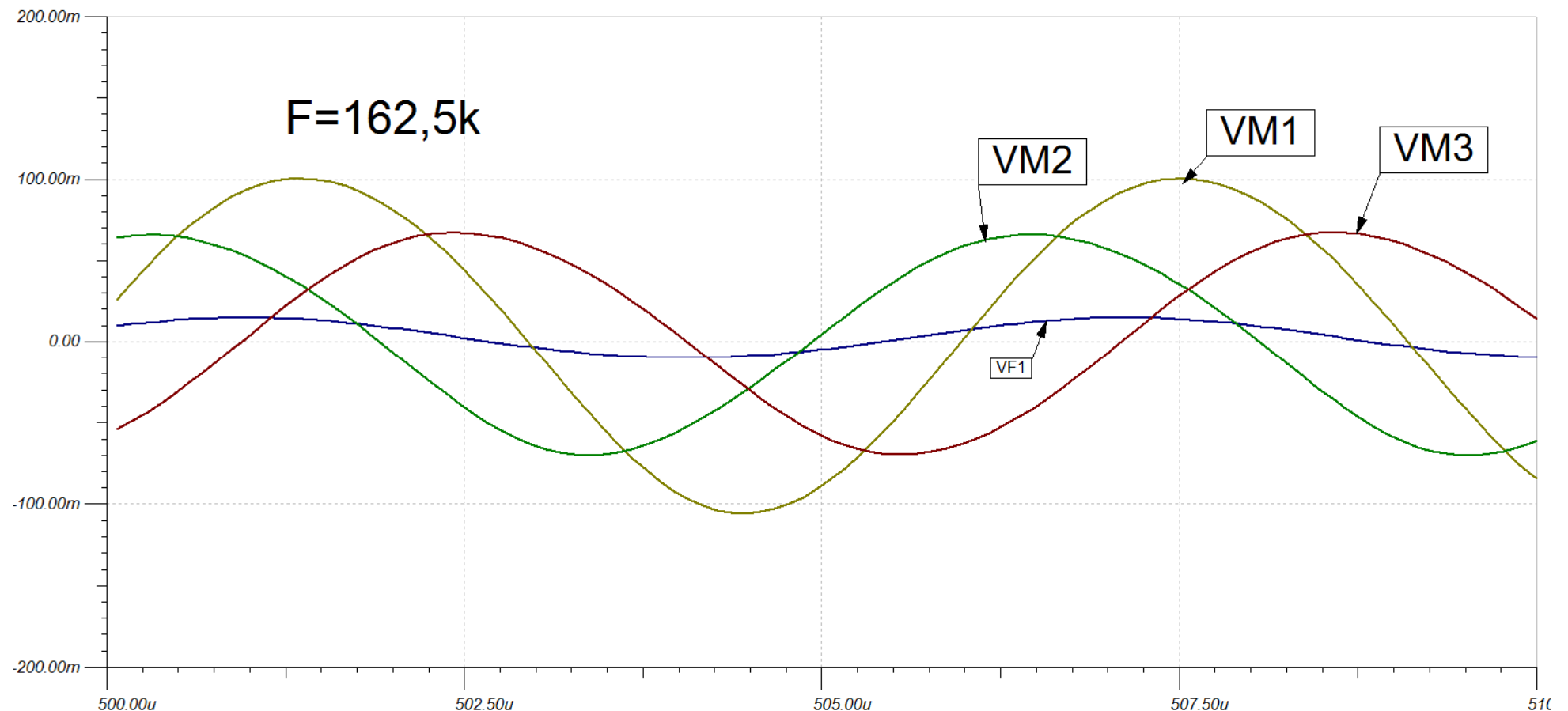
Рис.8.21. Информационный сигнал в двухконтурном частотном демодуляторе

Выводы:

1. Двухконтурный частотный детектор имеет высокую линейность передаточной характеристики.
2. Отсутствует выходное напряжение на частоте резонанса.

Приложения

Графики напряжений на катушках частотного детектора.



Векторные диаграммы, полученные в программе TINA-8

