

## Лекция 8

### Электронные системы связи

Средства электросвязи - это средства передачи, приема и обработки информации между двумя и более пользователями с использованием электрических сигналов.

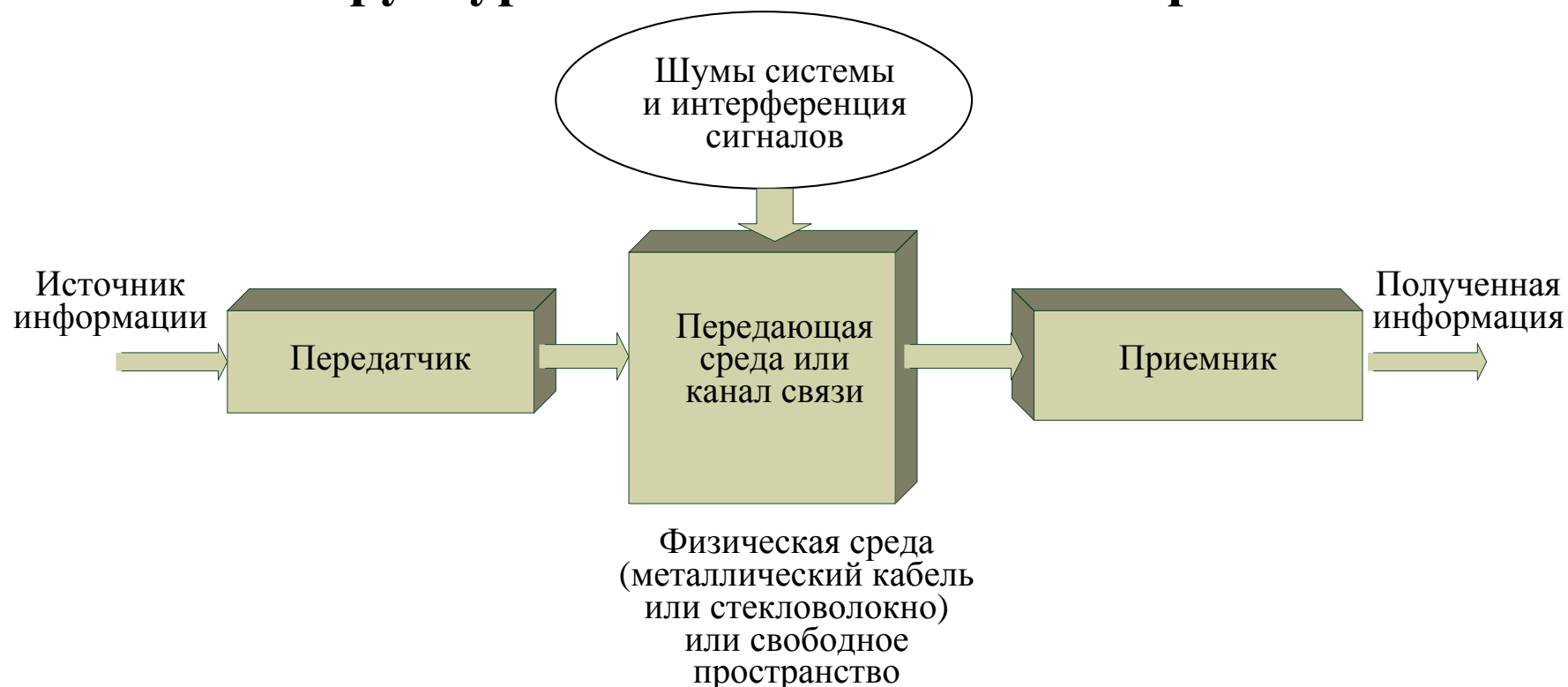
Исходная информация может быть в аналоговой форме (человеческая речь, музыка) или в цифровой форме в виде двоично-кодированных чисел или алфавитно-цифровых кодов.

***Аналоговые сигналы*** это зависящие от времени напряжения и токи, которые непрерывно изменяются, например, по закону синуса или косинуса.

***Цифровые сигналы*** это напряжения или токи, которые изменяются дискретными шагами или уровнями. Двоичный сигнал, который принимает только два значения, самая простая форма цифрового сигнала.

Выдающиеся ученые Генрих Герц, Александр Степанович Попов, маркиз Гулельмо Маркони провели первые опыты в период с 1887 по 1895 год.

## Структурная схема системы электросвязи



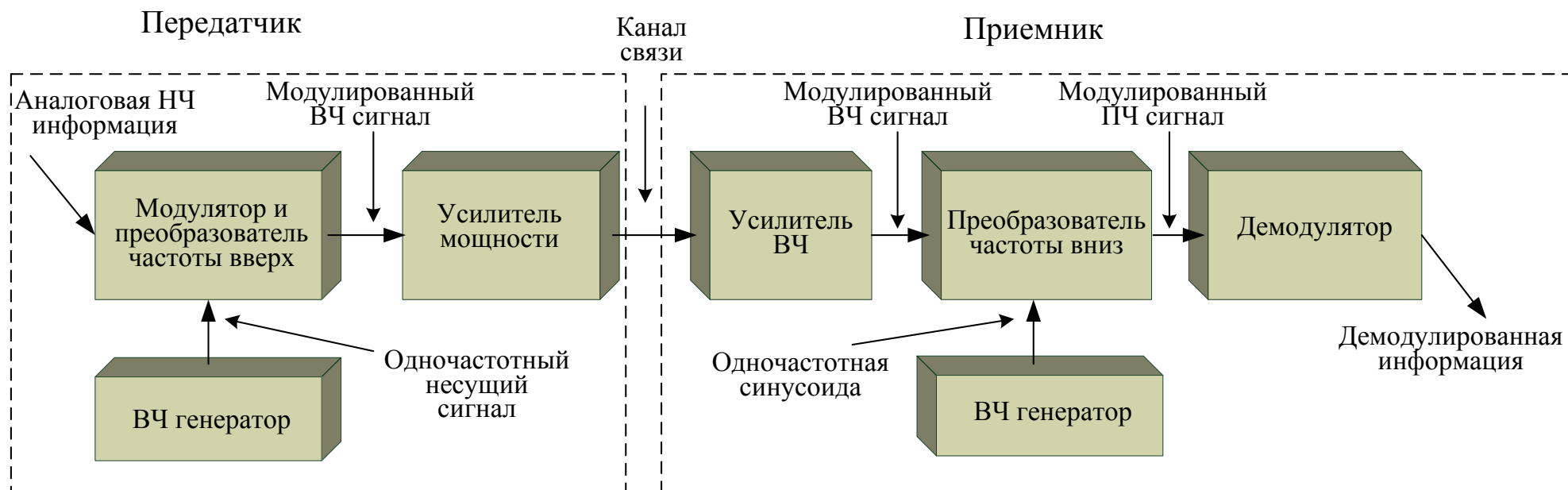
Передатчик состоит из одного или нескольких электронных устройств, которые преобразуют первичную информацию в форму более пригодную для передачи в конкретной передающей среде.

Сложная среда: радиорелейная, спутниковая или оптоволоконная линия связи.

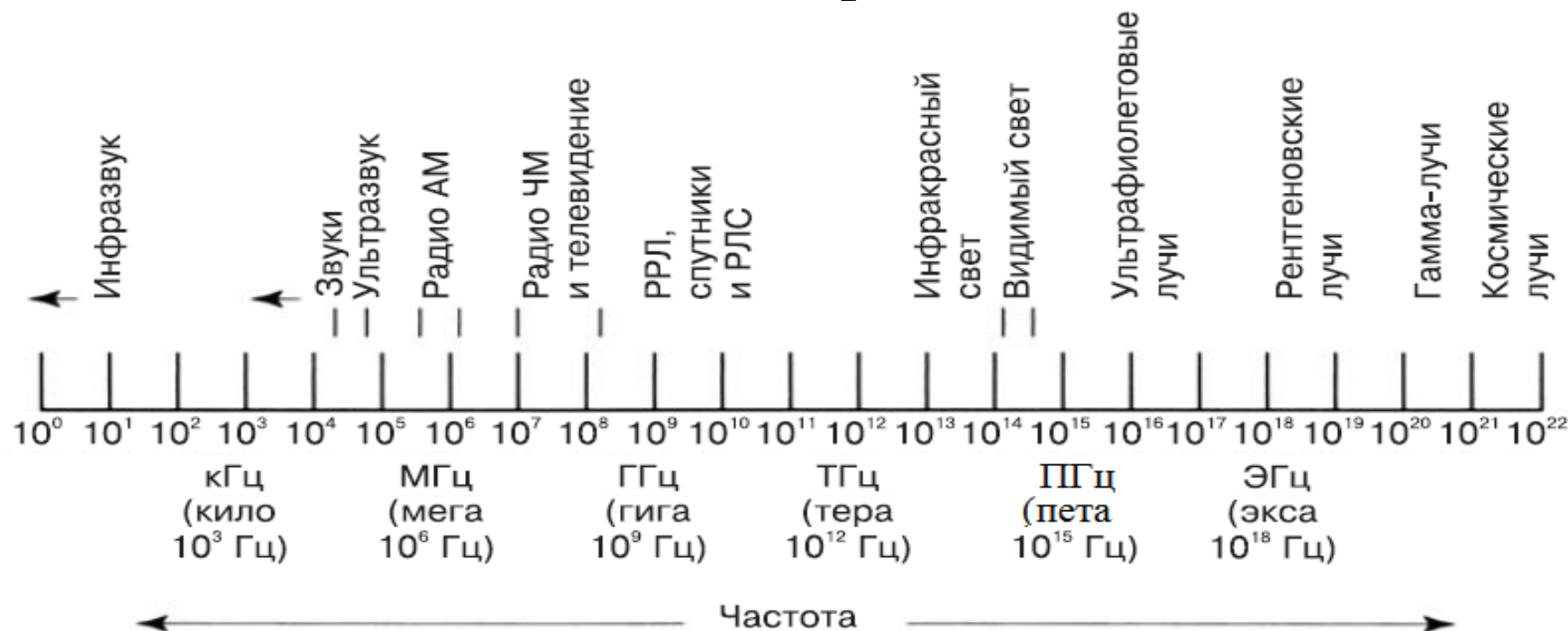
Шумы системы это любые нежелательные электрические сигналы, которые оказывают мешающее воздействие на информационный сигнал во время передачи и преобразований.

Приемник это совокупность электронных устройств, предназначенных для приема переданных сигналов из передающей среды и последующего преобразования их обратно к первоначальной форме.

## Упрощенная структурная схема аналоговой системы связи



## Частоты передачи



Радиостанции с амплитудной модуляцией работают в диапазоне от

$$30 \text{ кГц до } 30 \text{ МГц (длина волны } \lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ м/с}}{f \text{ Гц}} \text{ от } 10000 \text{ м до } 10 \text{ м}).$$

Станции ультракоротких волн (УКВ) занимают диапазон от 30 МГц до 300 МГц (длина волны до 1 м).

## Уровни мощности, усиления и потерь

В электросвязи отношение мощностей, а также отношение токов и напряжений измеряют в децибелах. Децибел (дБ) – логарифмическая величина, используемая для выражения отношения двух величин.

Коэффициент усиления по мощности:  $K_{P(\text{дБ})} = 10 \lg \left( \frac{P_{\text{вых}}}{P_{\text{вх}}} \right)$ .

Усиление по напряжению:  $K_{U(\text{дБ})} = 20 \lg \left( \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} \right)$ .

Единица измерения дБм используется для определения отношения уровня мощности относительно установленного эталонного значения, равного 1мВт.

Уровень мощности в дБм:  $p = 10 \lg \frac{P}{0,001 \text{ Вт}}, \text{ дБм.}$

Если  $P_{\text{вых}} = 1 \text{ Вт}$ :  $p = 10 \lg \frac{1 \text{ Вт}}{0,001 \text{ Вт}} = 10 \lg 1000 = 30 \text{ дБм}$

## Шумы в системах связи

Электрический шум определяется как любая электрическая энергия, которая попадает в пределы полосы пропускания системы связи.

Шумы разделяют на две категории:

коррелированный шум, связанный с присутствием сигнала;

некоррелированный шум, который присутствует все время, независимо от того, есть сигнал или нет.

Некоррелированный шум делят на две категории: внешний и внутренний.

*К внешним шумам* относятся атмосферные помехи, внеземной шум, радиоизлучение солнца, космические шумы, искусственные шумы от электроустройств, искусственный помех, радиоподавления (РЭБ).

*Внутренние шумы* — это помехи, возникающие в пределах устройства или схемы: дробовый шум, обусловленный движением носителей зарядов (электронов и дырок), шум переноса, возникающий при прохождении зарядов от входа к выходу устройства (например, от

эмиттера к коллектору), тепловой шум, связанный с быстрым и случайным перемещением электронов в проводнике под действием теплового возмущения.

Мощность теплового белого шума выражается в виде:

$$N = kTB, \quad (6.4)$$

где  $N$ - мощность шума, Вт;  $B$  – ширина полосы пропускания;  $k$ -постоянная Больцмана, равная  $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж} / ^\circ\text{K}$ ,  $T$ -абсолютная температура ( $T = ^\circ\text{C} + 273^\circ$ ).

Мощность шума, выраженная в дБм, равна:

$$N_{(\text{дБм})} = 10 \lg \frac{kTB}{0,001}.$$

Случайные шумы имеют постоянную плотность мощности и не зависят от частоты. Тепловой шум непрерывно и равномерно распределен по всему частотному диапазону, аддитивен и присутствует во всех электронных устройствах.

Среднеквадратическое напряжение шума  $\bar{E}_{ш}^2 = 4kTR\Delta f$ , где

$\Delta f = B$ - полоса пропускания устройства.

Важно характеристикой систем связи является отношение сигнал/шум:  $\frac{S}{N} = \frac{P_s}{P_N}$ , где  $P_s$ - мощность сигнала в ваттах,  $P_N$ - мощность шума в ваттах.

Отношение сигнал/шум часто выражают в децибеллах:

$$A = 10 \lg \left( \frac{P_s}{P_N} \right)_{\text{дБ}}$$

## 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:***

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

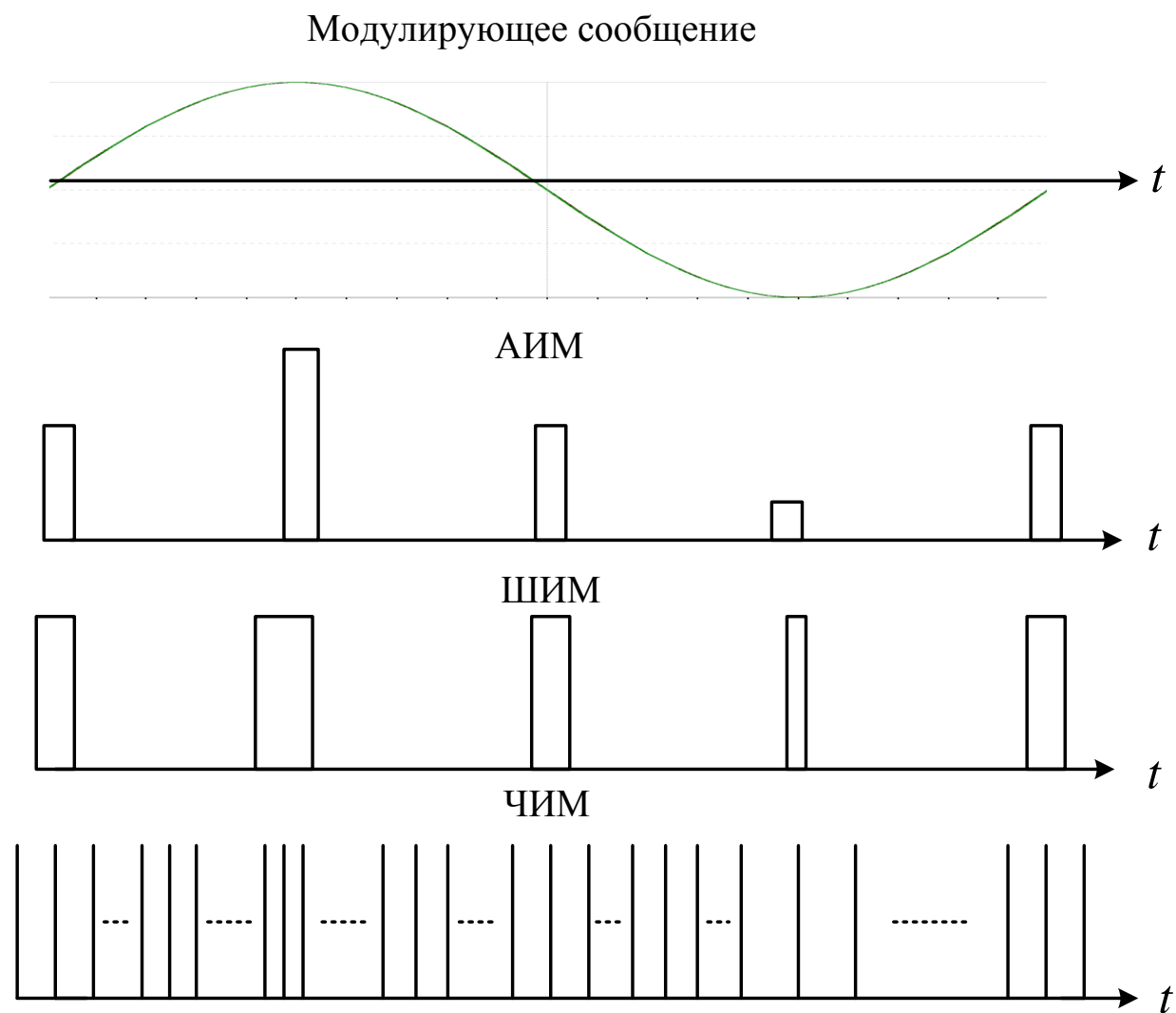
В устройствах связи, управления и автоматики применяют сигналы с импульсной модуляцией:

АИМ- амплитудно-импульсная модуляция:

ШИМ – широтно-импульсная модуляция;

ЧИМ – частотно-импульсная модуляция;

КИМ – кодово- импульсная модуляция и т.д.



## Виды импульсной модуляции

## 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;

$\omega_0$  - несущая частота;

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

$\Omega$  - частота модуляции.

По формулам произведения косинусов преобразуем АМ-сигнал:

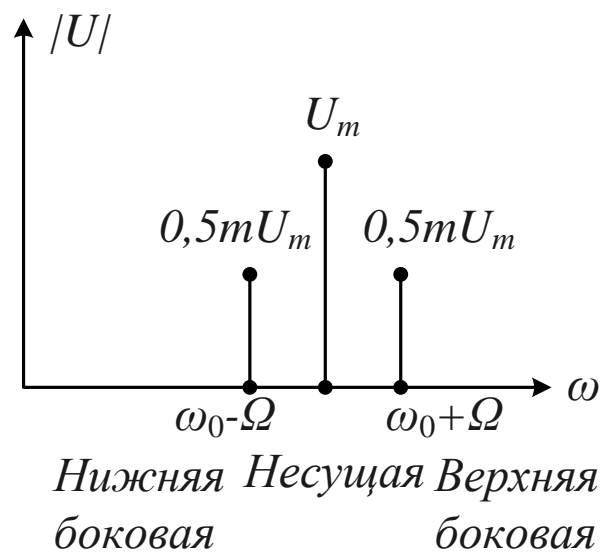
$$u(t) = U_m \cos(\omega_0 t + \varphi_0) + 0,5mU_m \cos((\omega_0 + \Omega)t + \varphi_0) + 0,5mU_m \cos((\omega_0 - \Omega)t + \varphi_0).$$

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

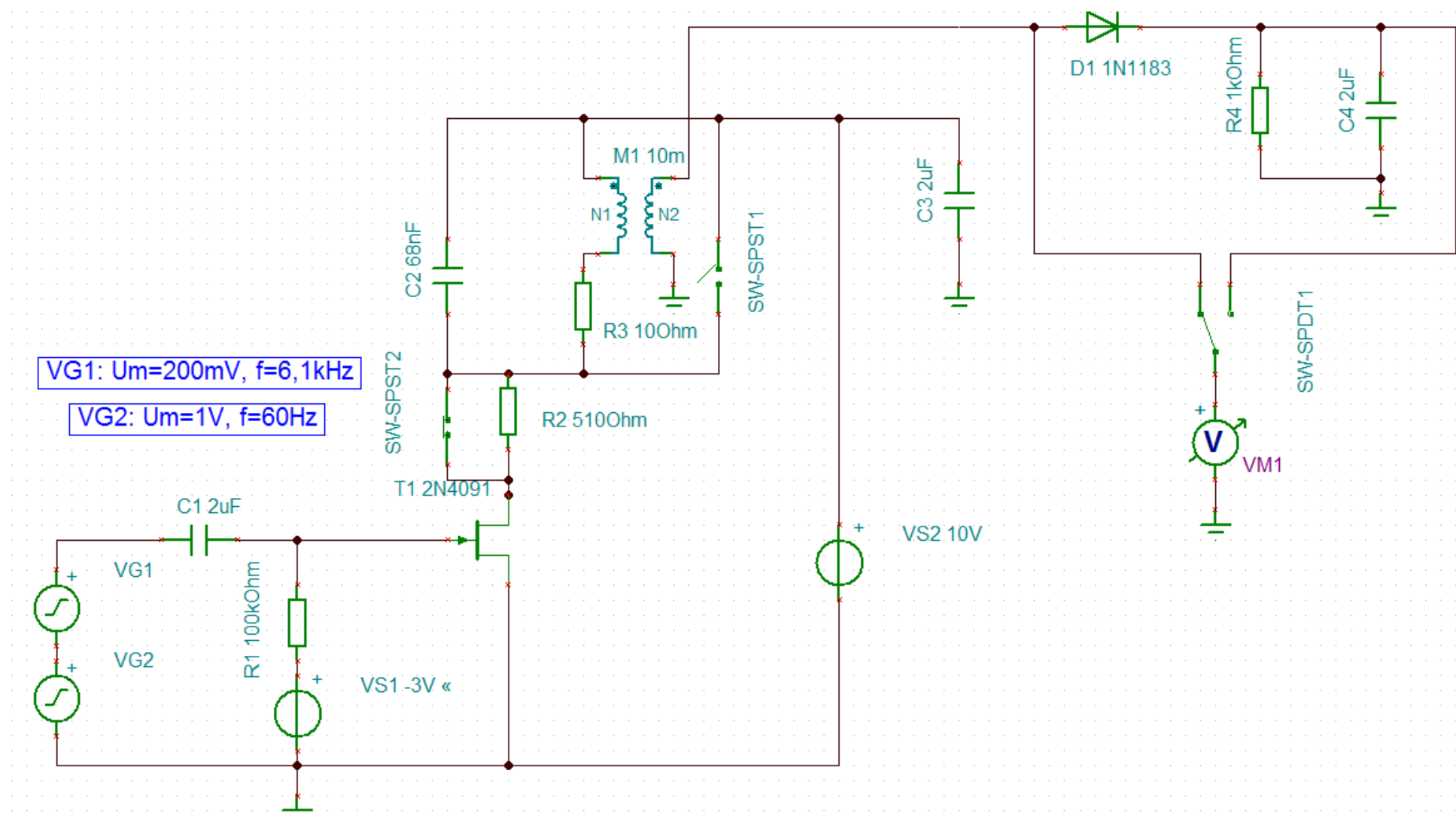


Рис.8.1

## Передаточная характеристика полевого транзистора:

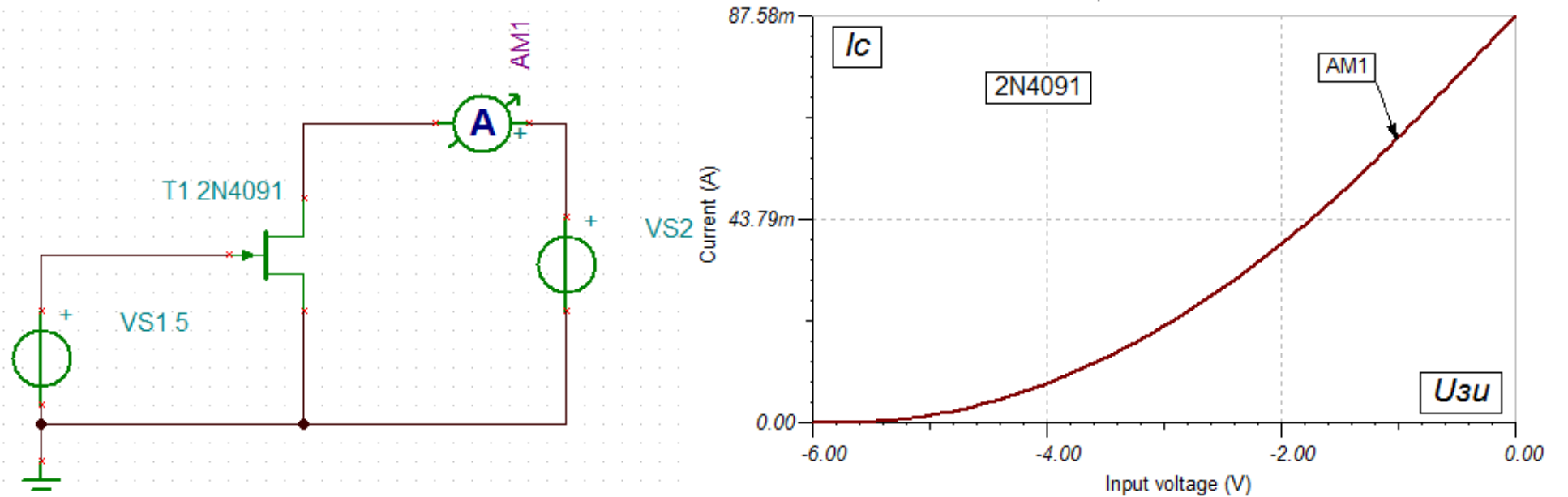


Рис.8.2

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

На вход модулятора подаем сумму:

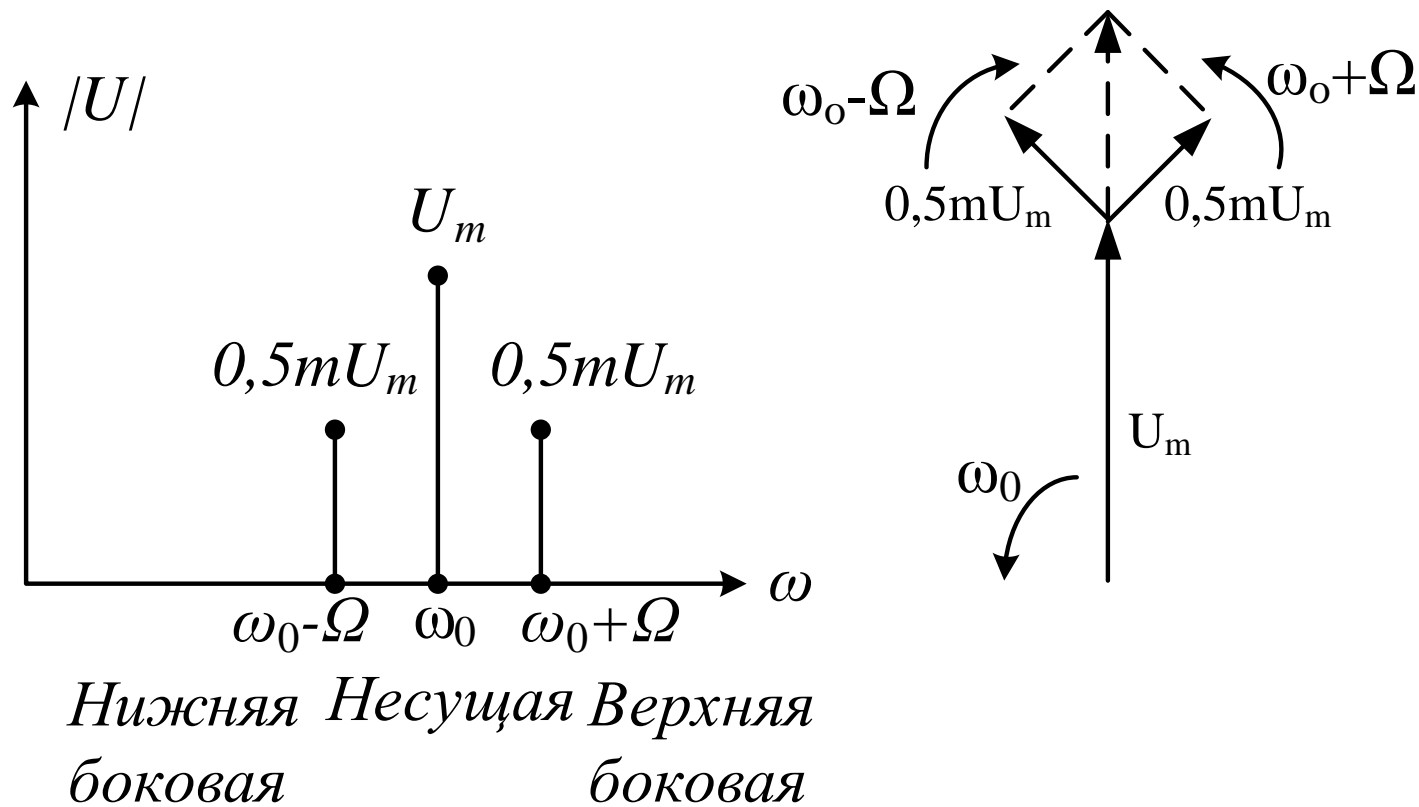
$$u(t) = U_m \cos \omega_0 t + U_{m\Omega} \cos \Omega t.$$

Резонансный контур настроен на несущую частоту.

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

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

$R_{\text{рез}}$  - резонансное сопротивление контура.



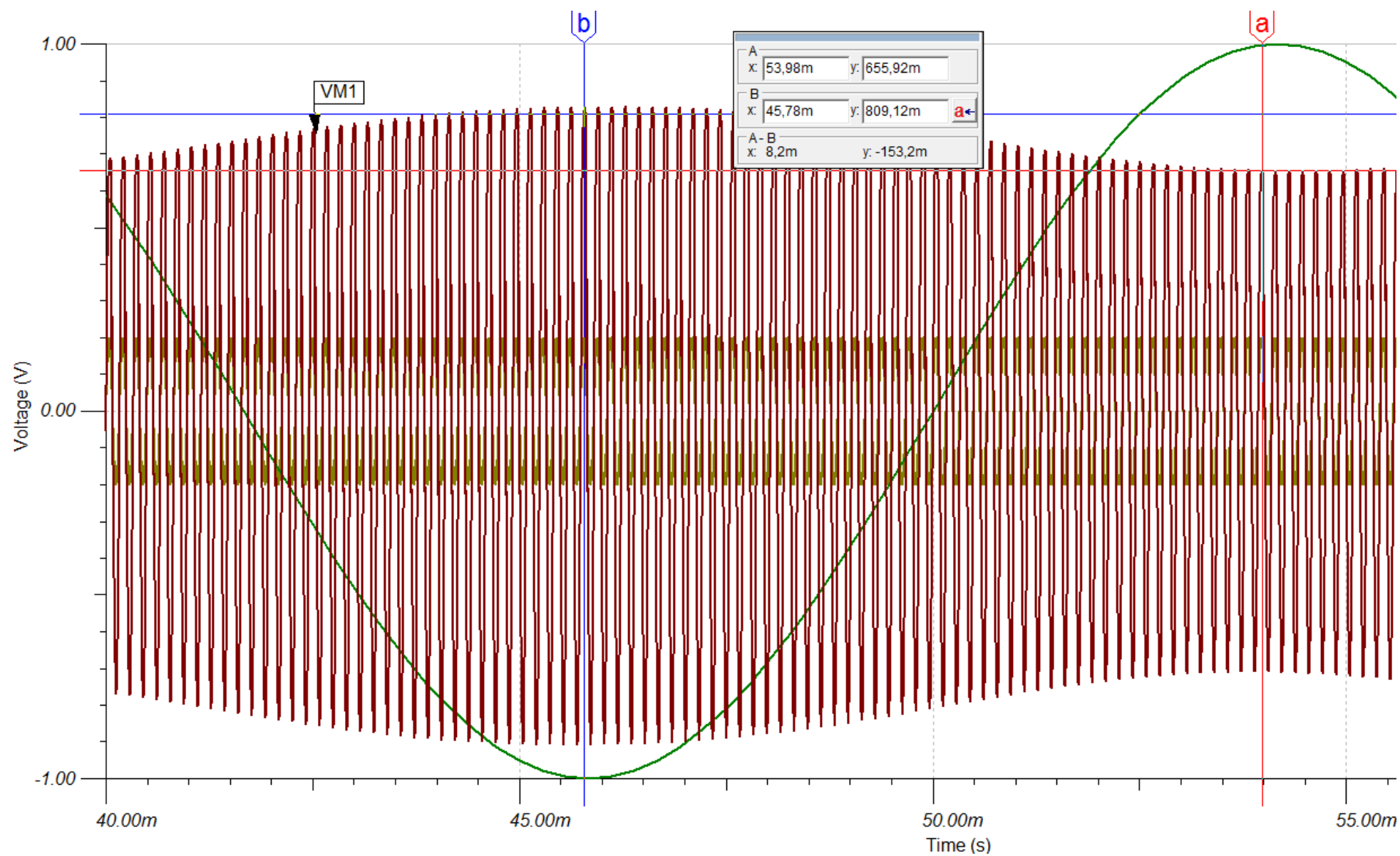


Рис.8.3

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

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

Амплитудный демодулятор (детектор)

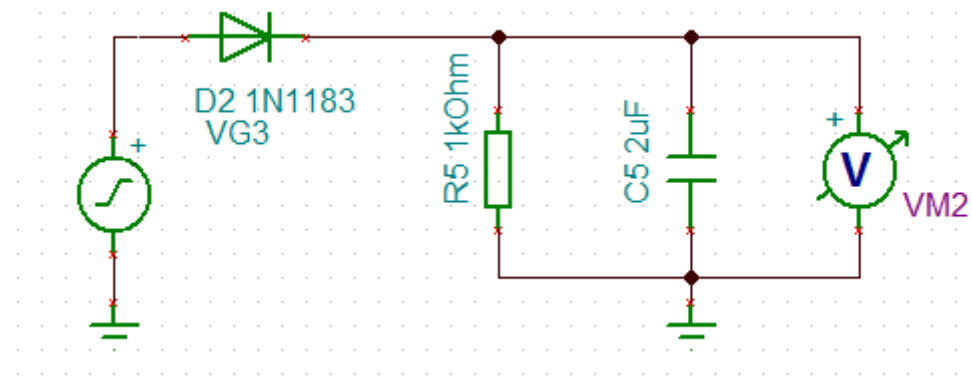


Рис.8.4

Выбор фильтра:

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

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

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

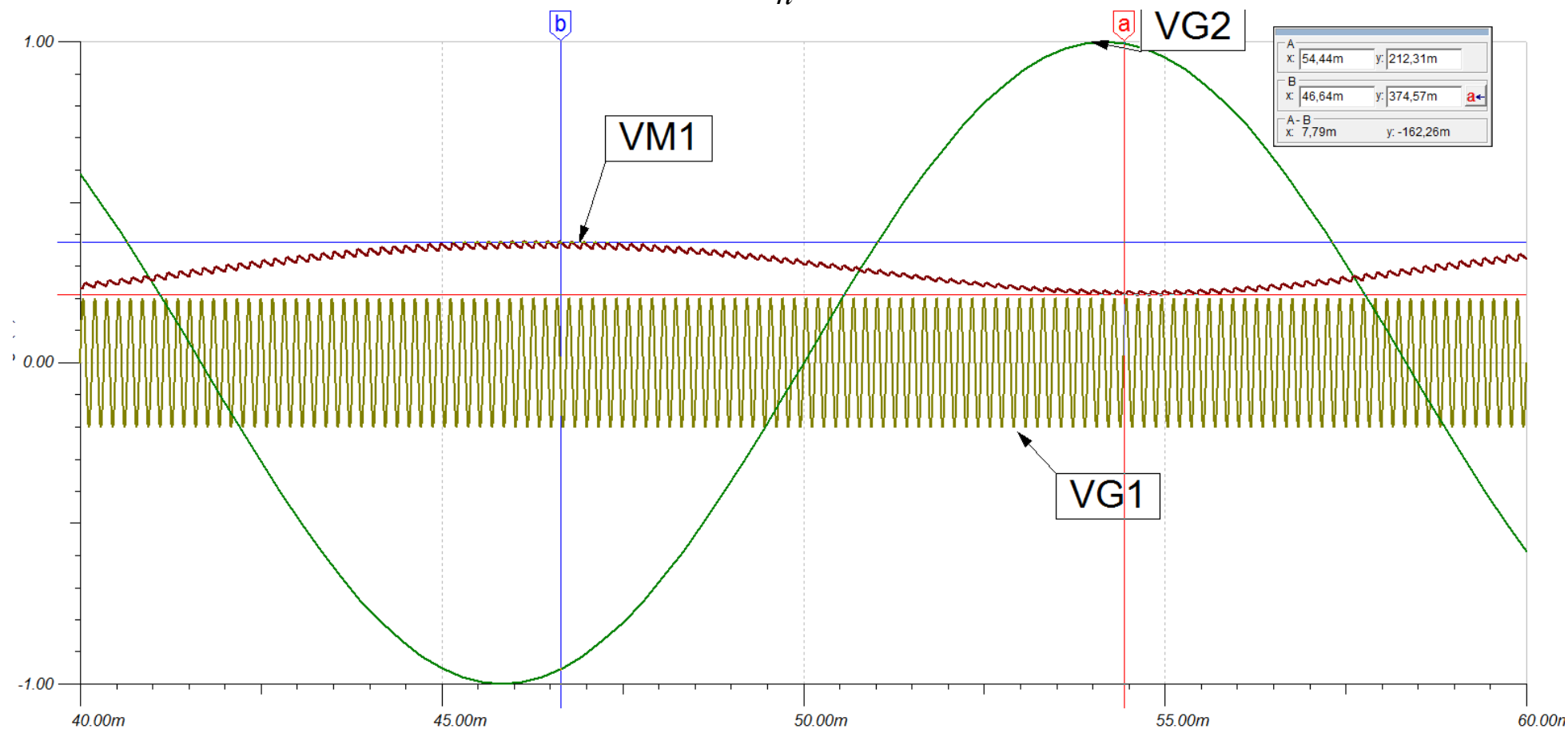


Рис.8.5. Амплитуда НЧ сигнала 80 мВ.

## 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:

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

$m$  - 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  $\Omega$ . 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;

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

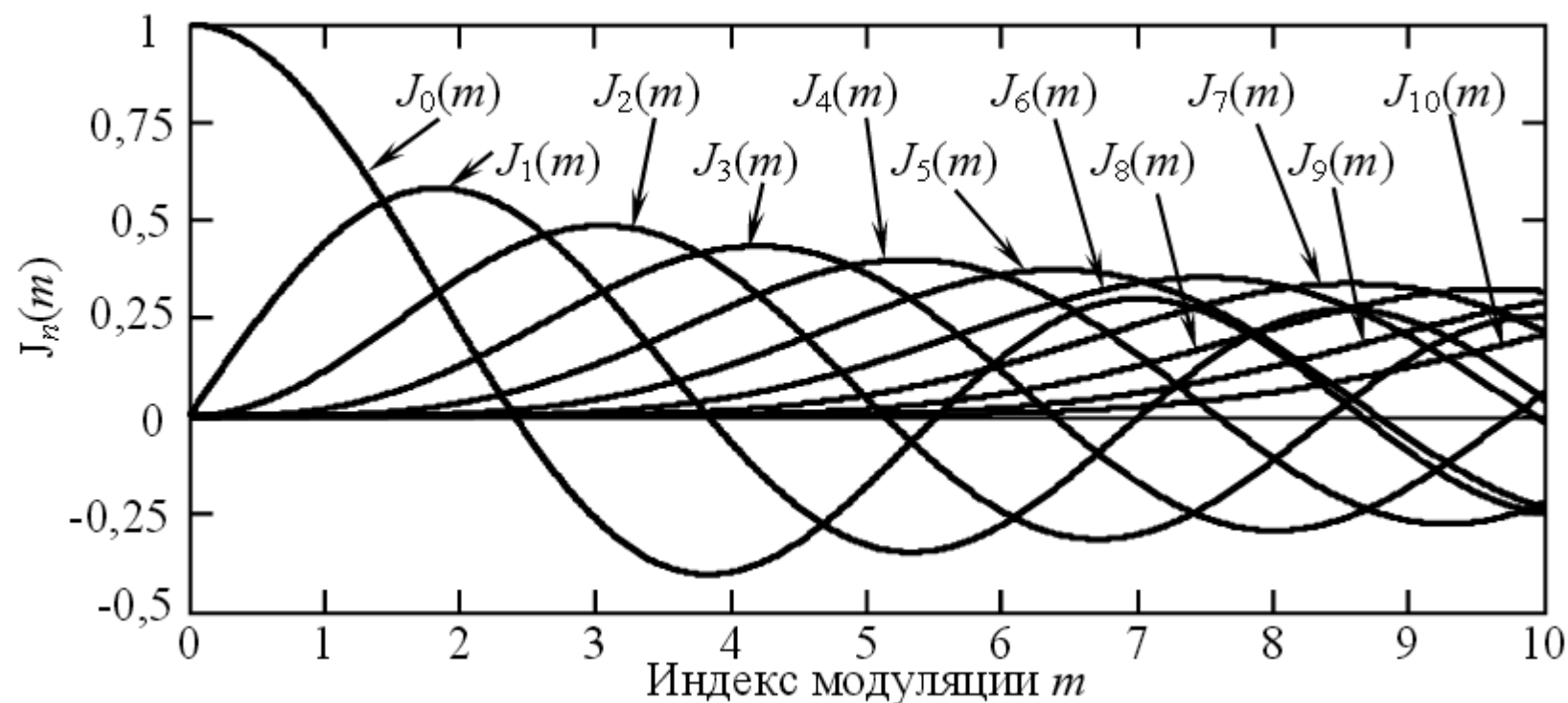


Рис.8.6. Графики функций Бесселя.

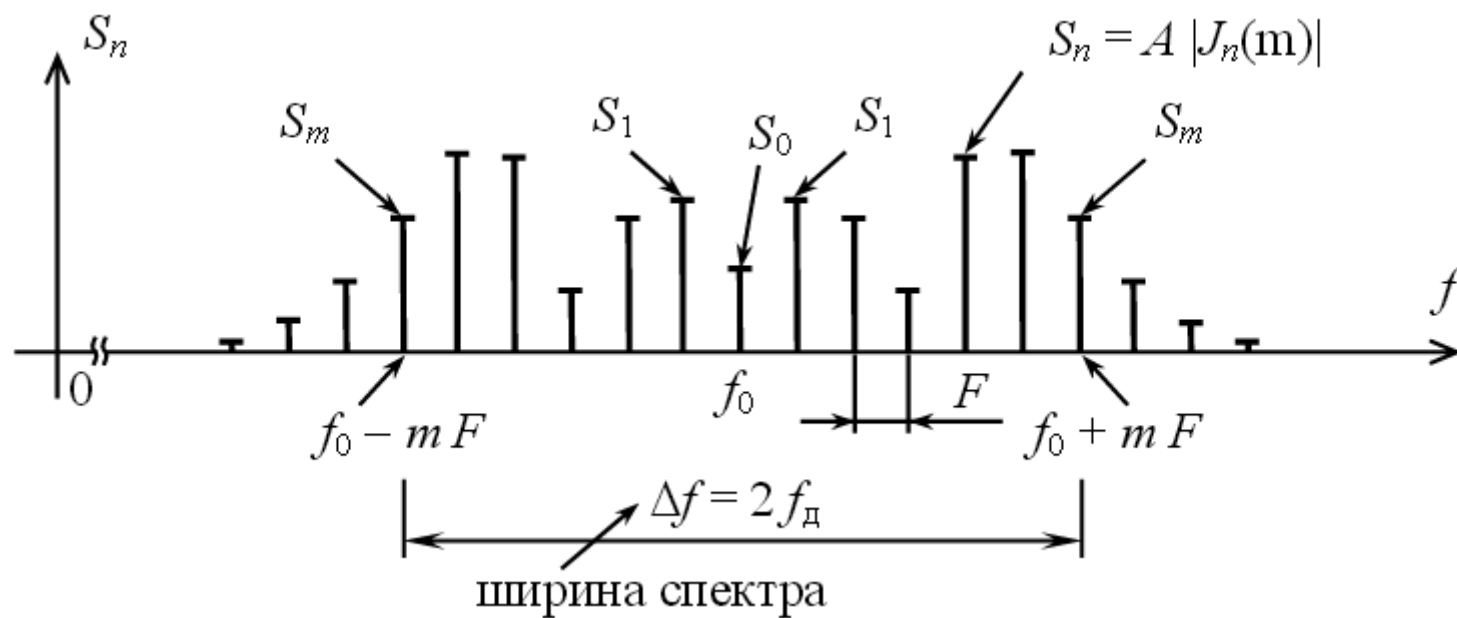


Рис.8.7. Односторонний амплитудный спектр ЧМ - радиосигнала

## Частотный модулятор на варикапе

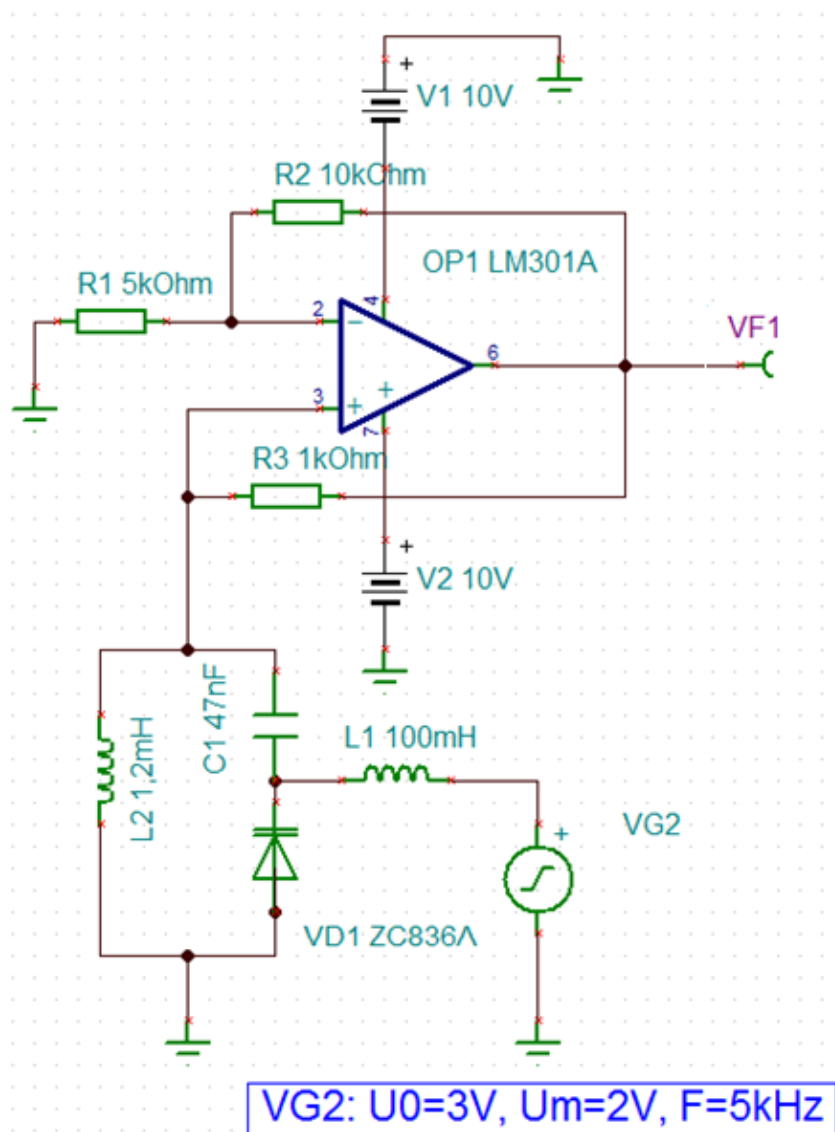


Рис.8.8

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

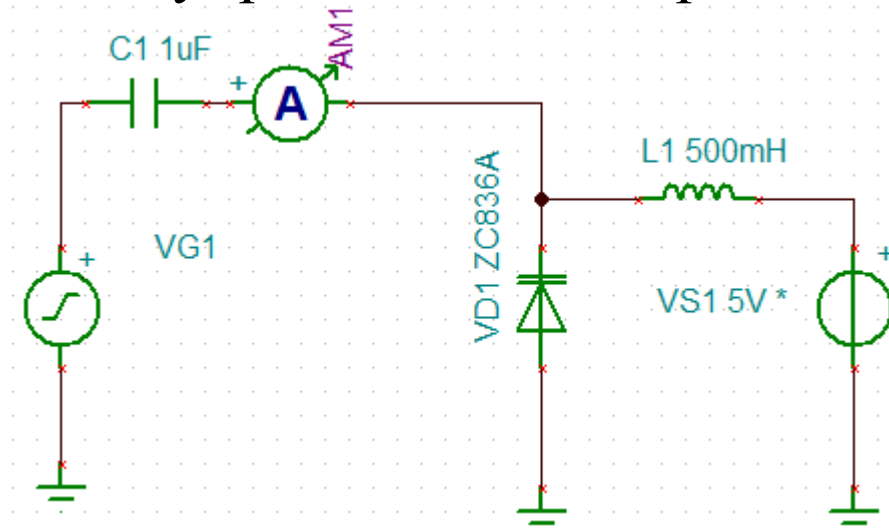


Рис.8.9. Измерение емкости варикапа

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.

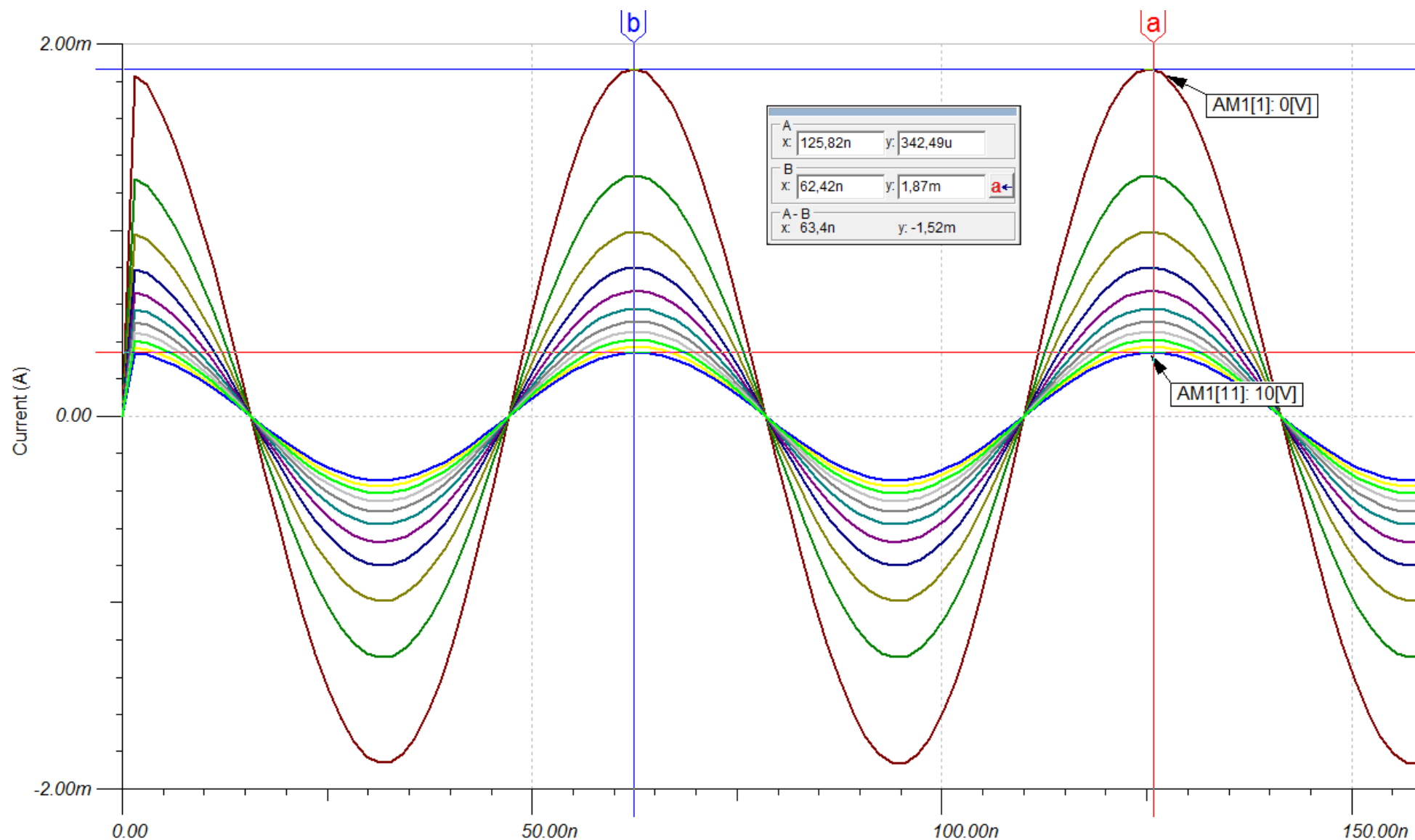
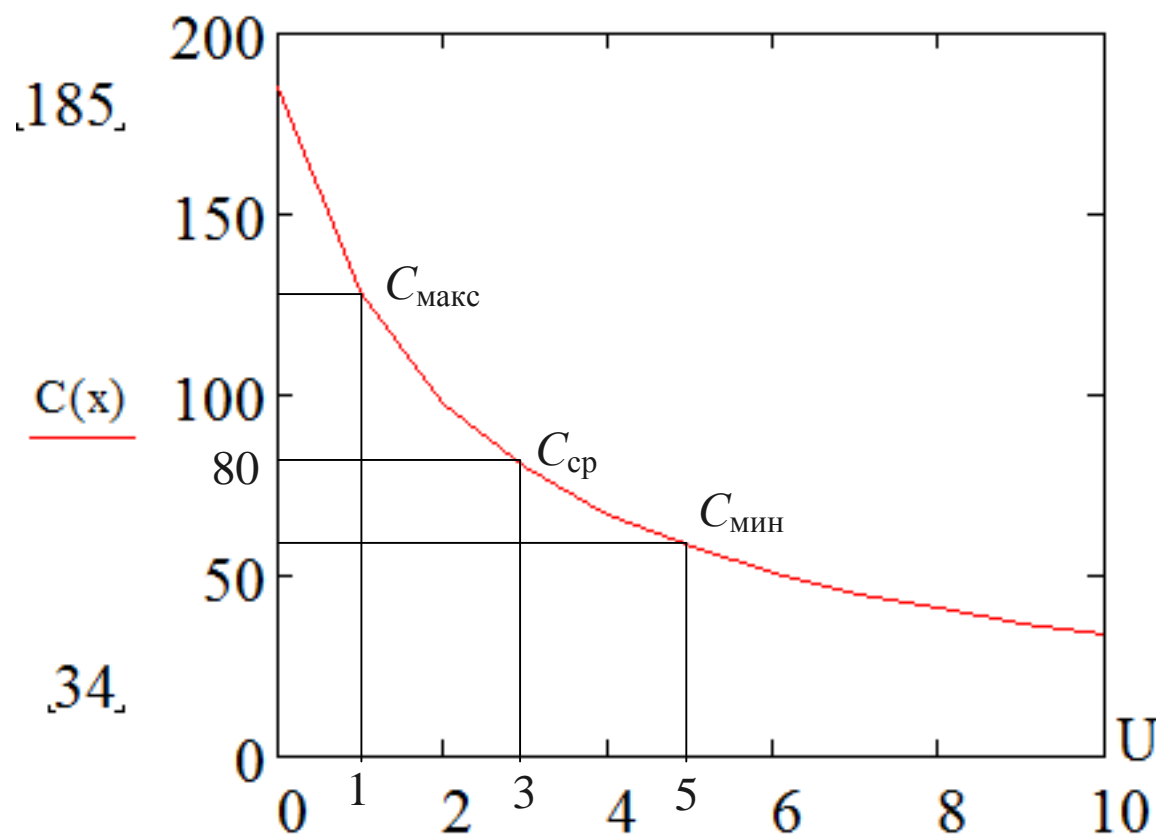


Рис.8.10. Графики тока в варикапе  
По измеренным табличным значениям строим график  $C(U)$ :



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.

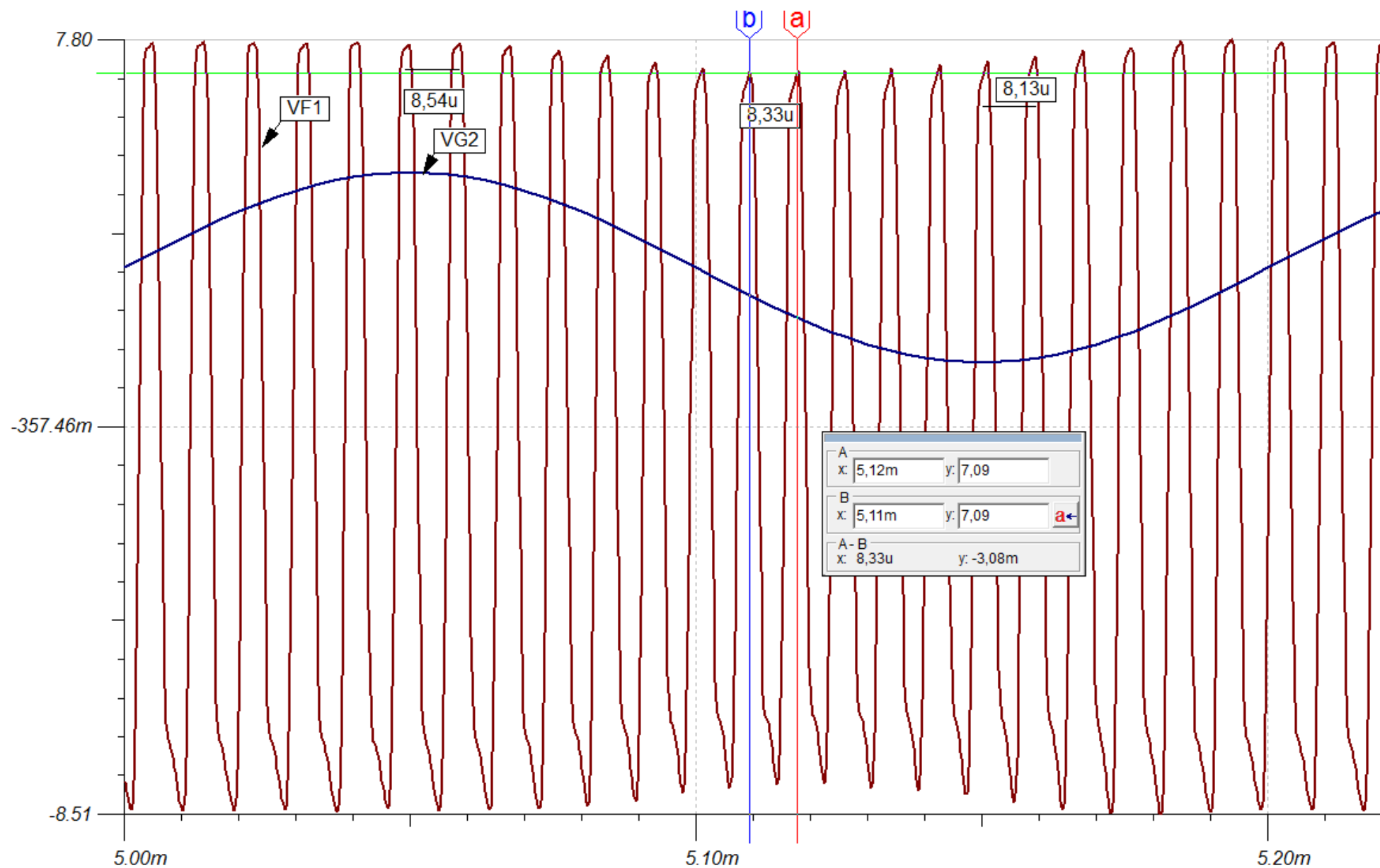


Рис.8.12. Частотно-модулированный сигнал

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

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

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

### Частотный детектор с одиночным контуром

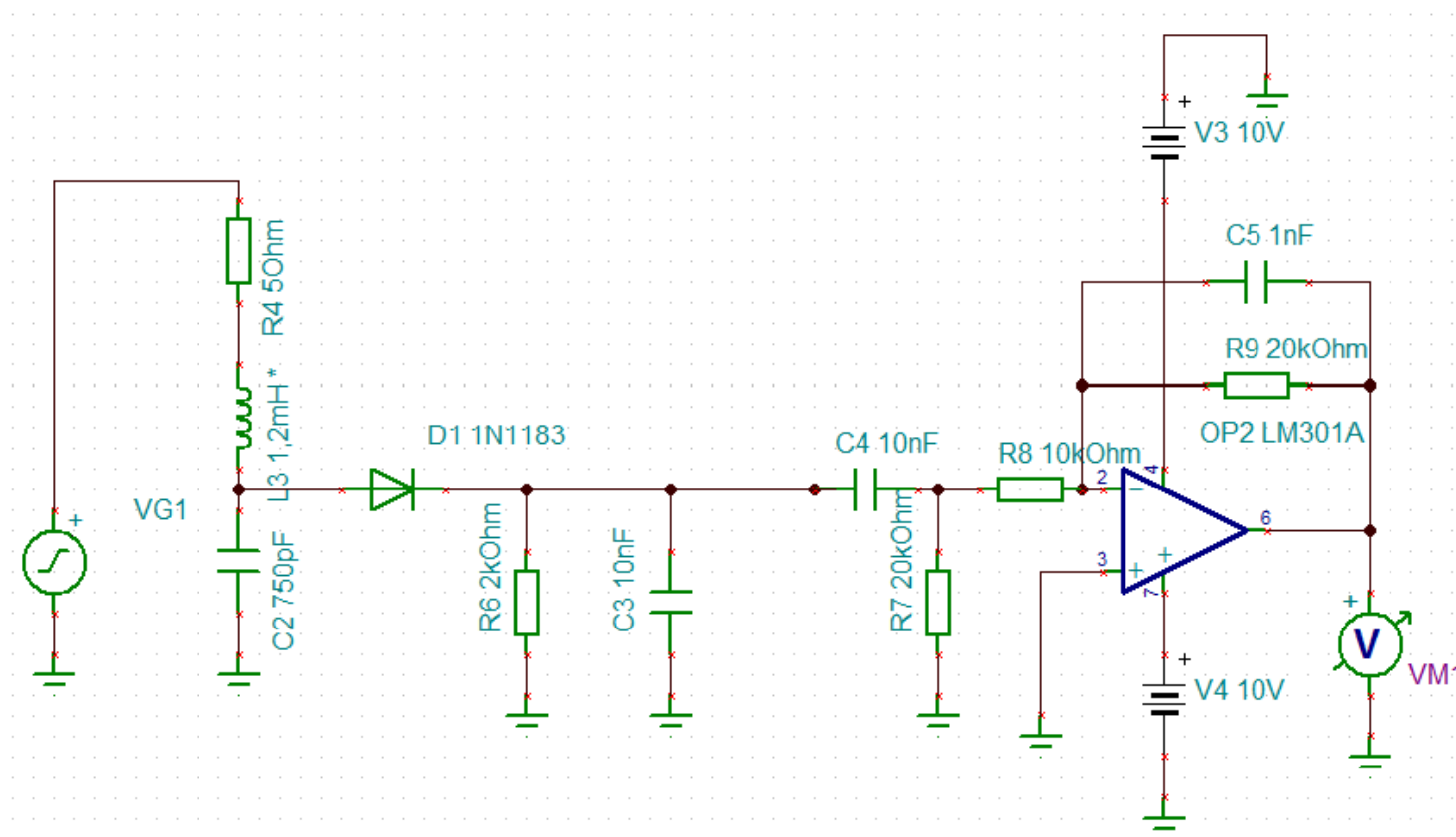


Рис.8.13. Частотный детектор на резонансном контуре

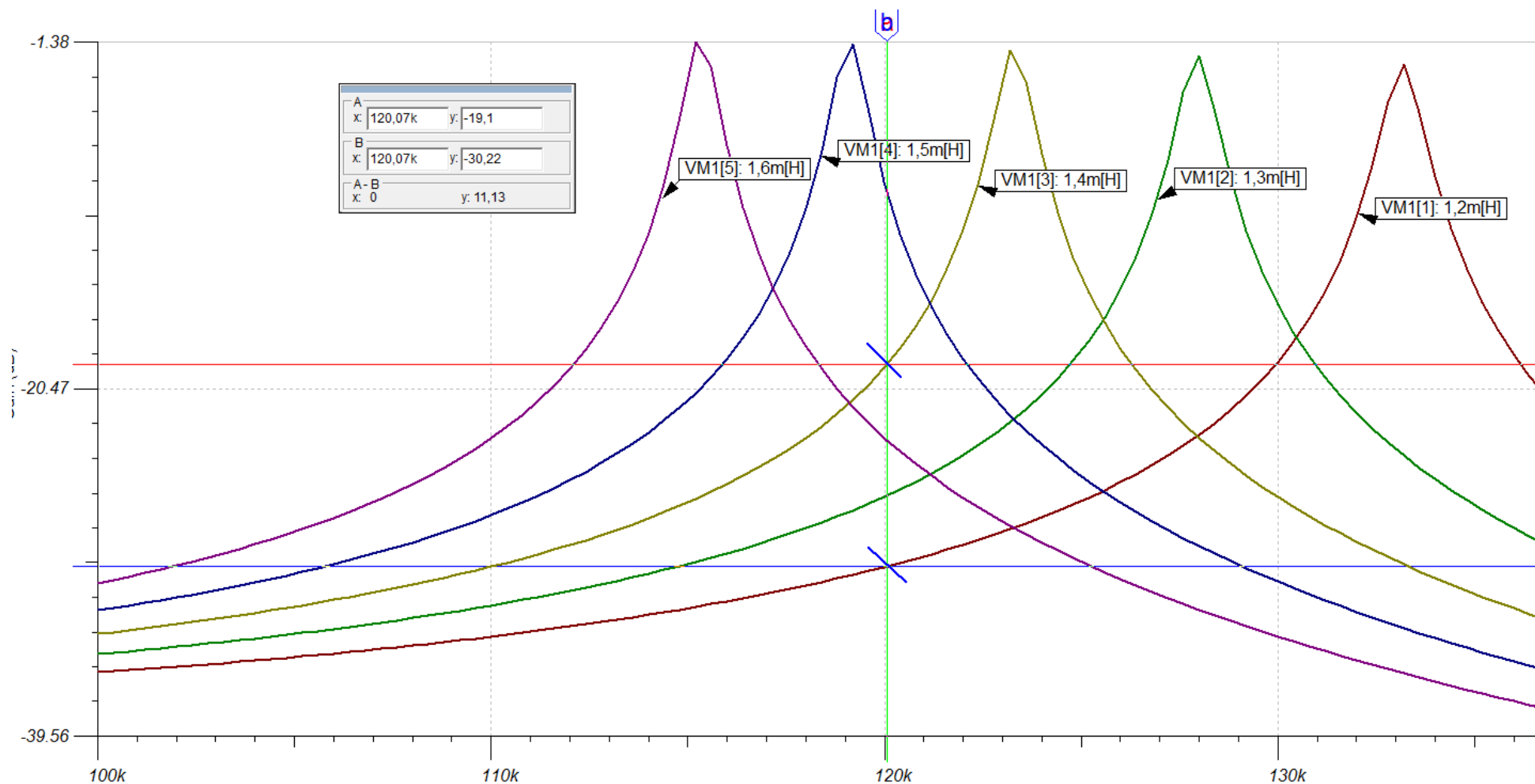


Рис.8.14. Выбор расстройки контура

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

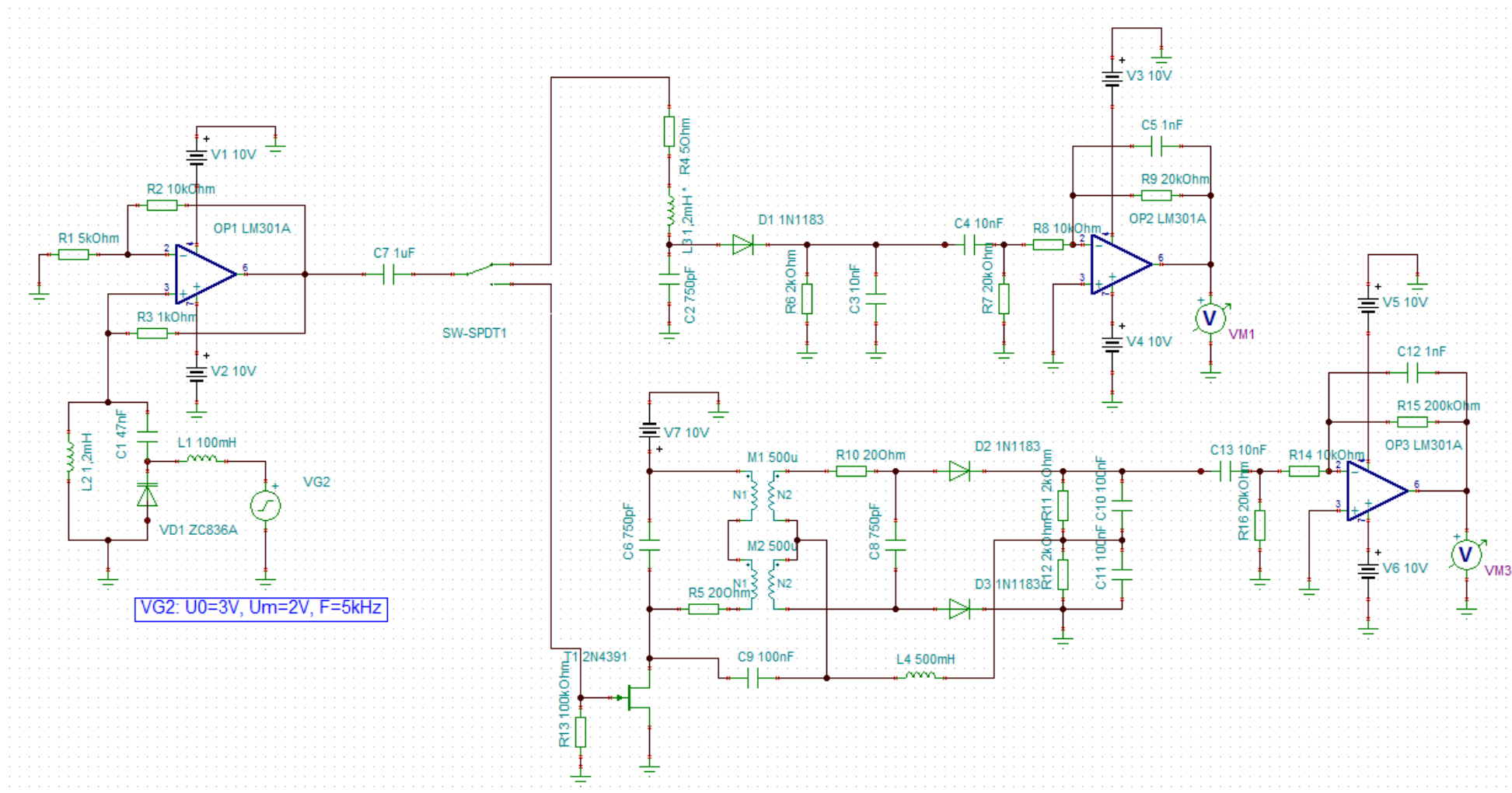


Рис.8.15. Частотный модулятор с частотными детекторами

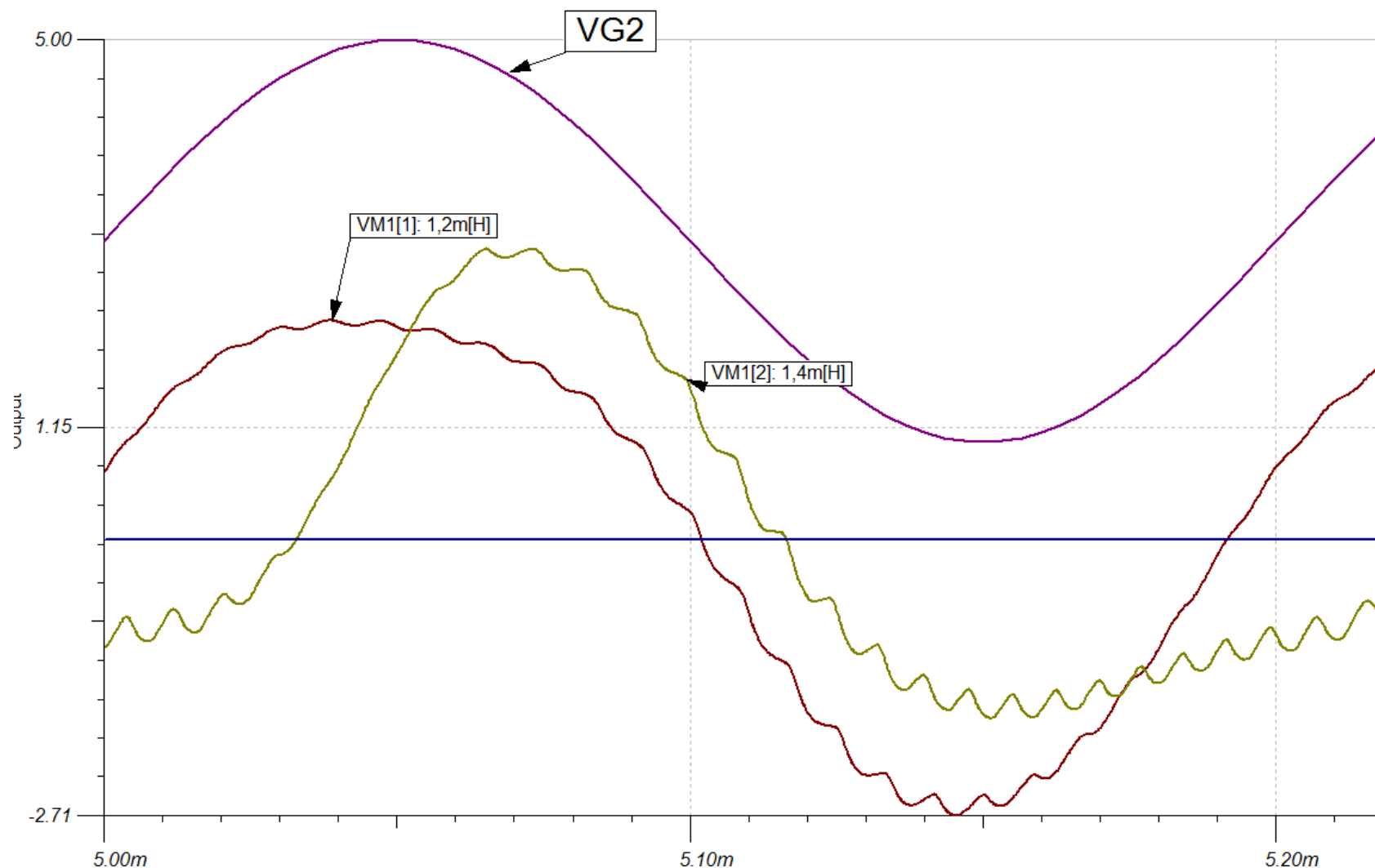
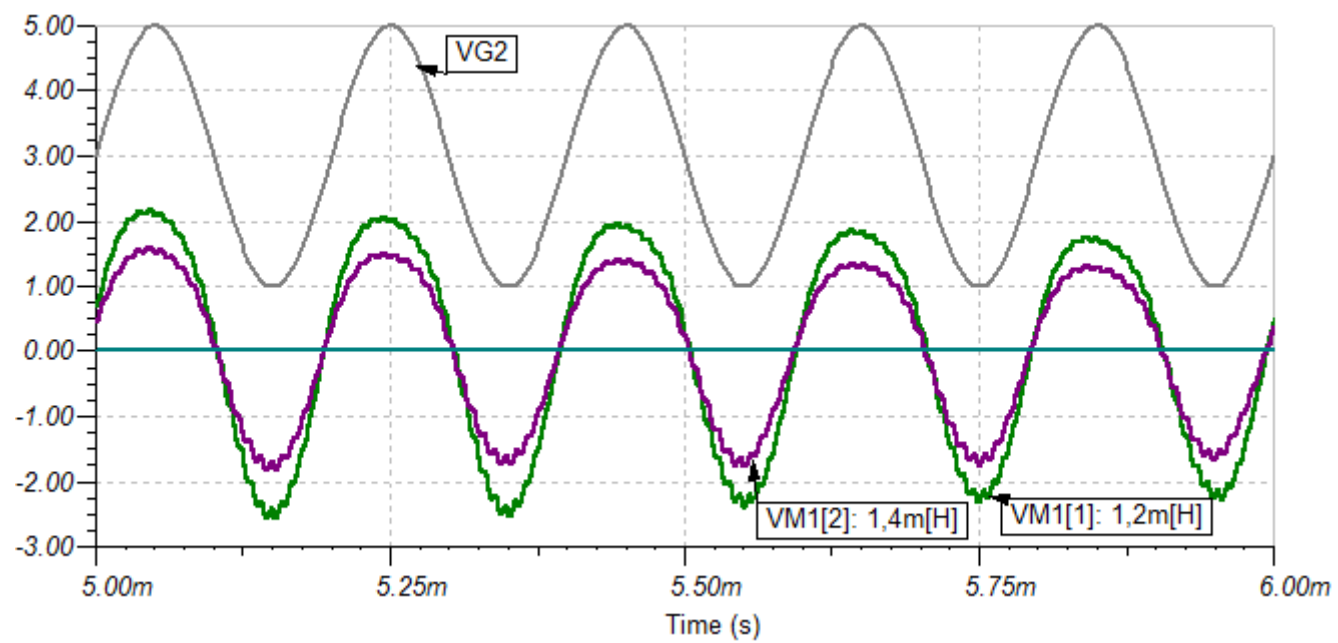
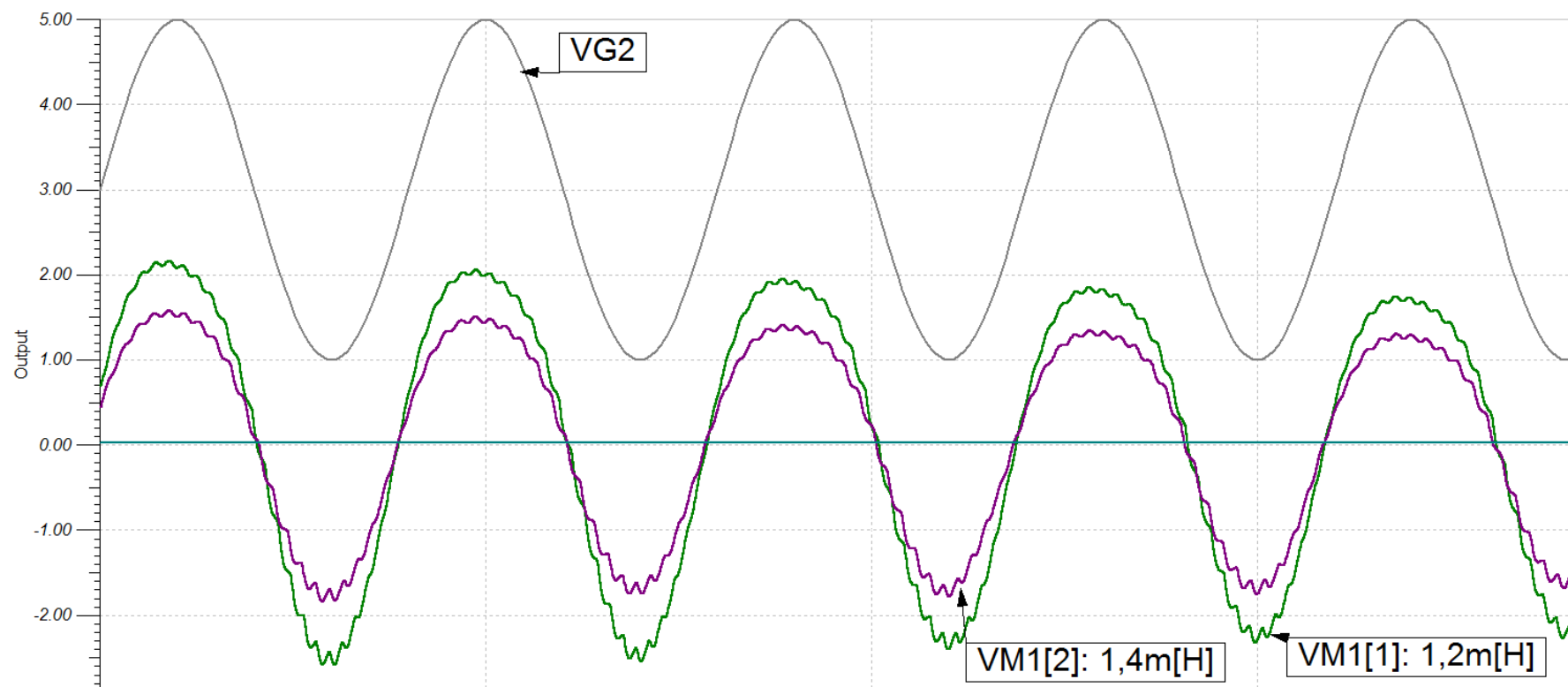
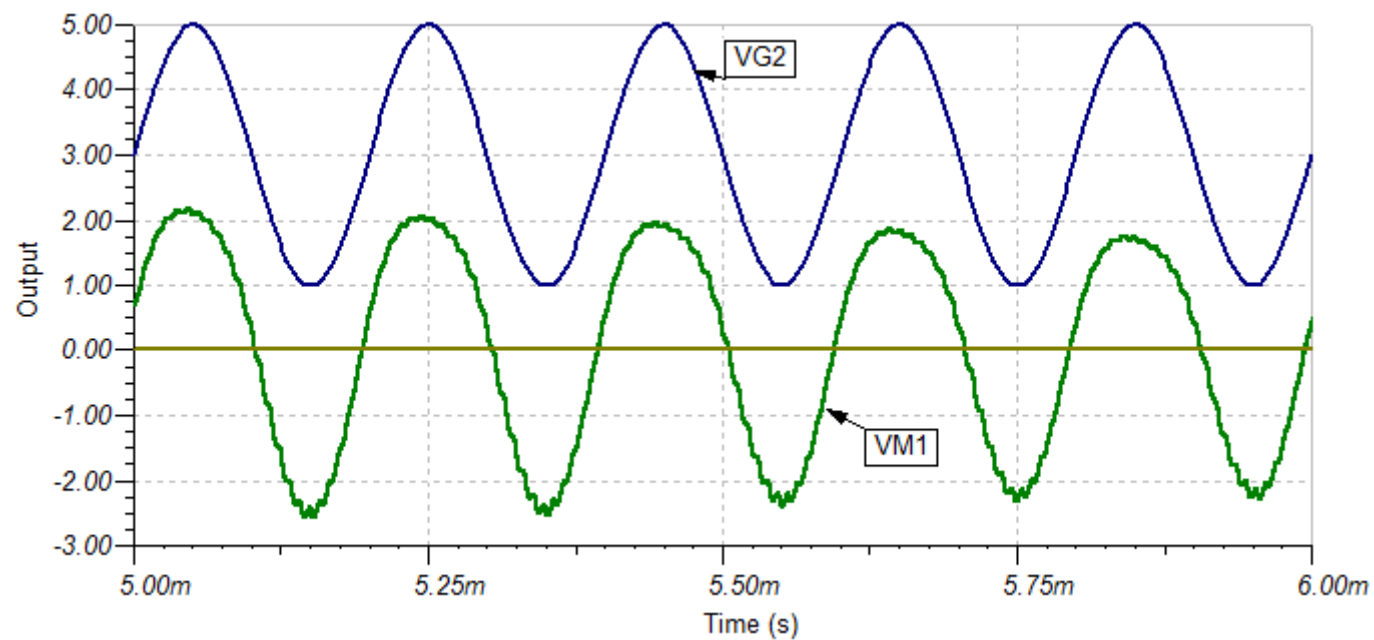


Рис.8.16. Информационный сигнал в одноконтурном частотном демодуляторе  
Индуктивность  $L_3 = 1,2$  мГн дает меньше искажений.







## Двухконтурный частотный детектор

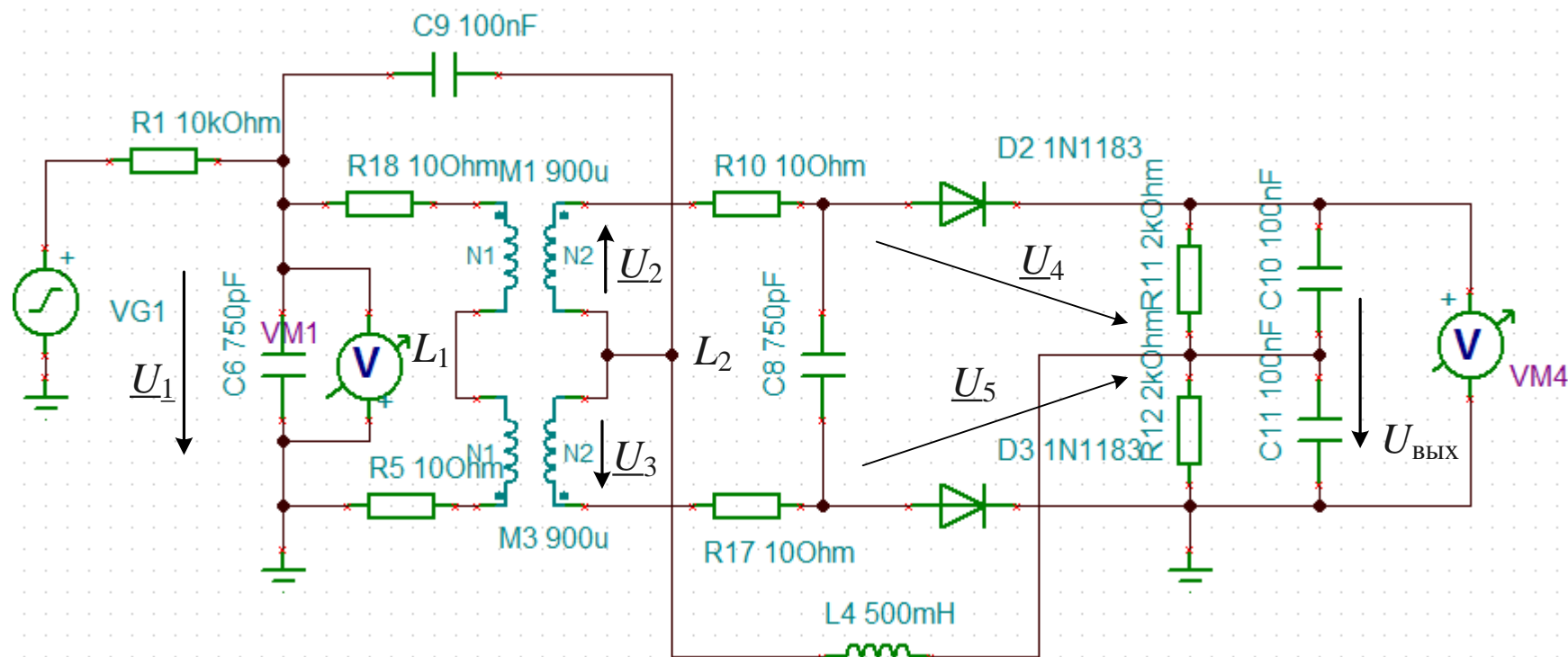


Рис.8.17. Двухконтурный ЧД

В ЧД применены резонансные контуры  $L_1 C_6$   $L_2 C_8$  с магнитной связью. К средней точке  $L_2$  через емкость  $C_9$  подключено напряжение  $\underline{U}_1$ . К цепи  $D_2 R_{11}$  приложено напряжение  $\underline{U}_4 = \underline{U}_1 + \underline{U}_2$ . К цепи  $D_3 R_{12}$  приложено напряжение  $\underline{U}_5 = \underline{U}_1 + \underline{U}_3$ .

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

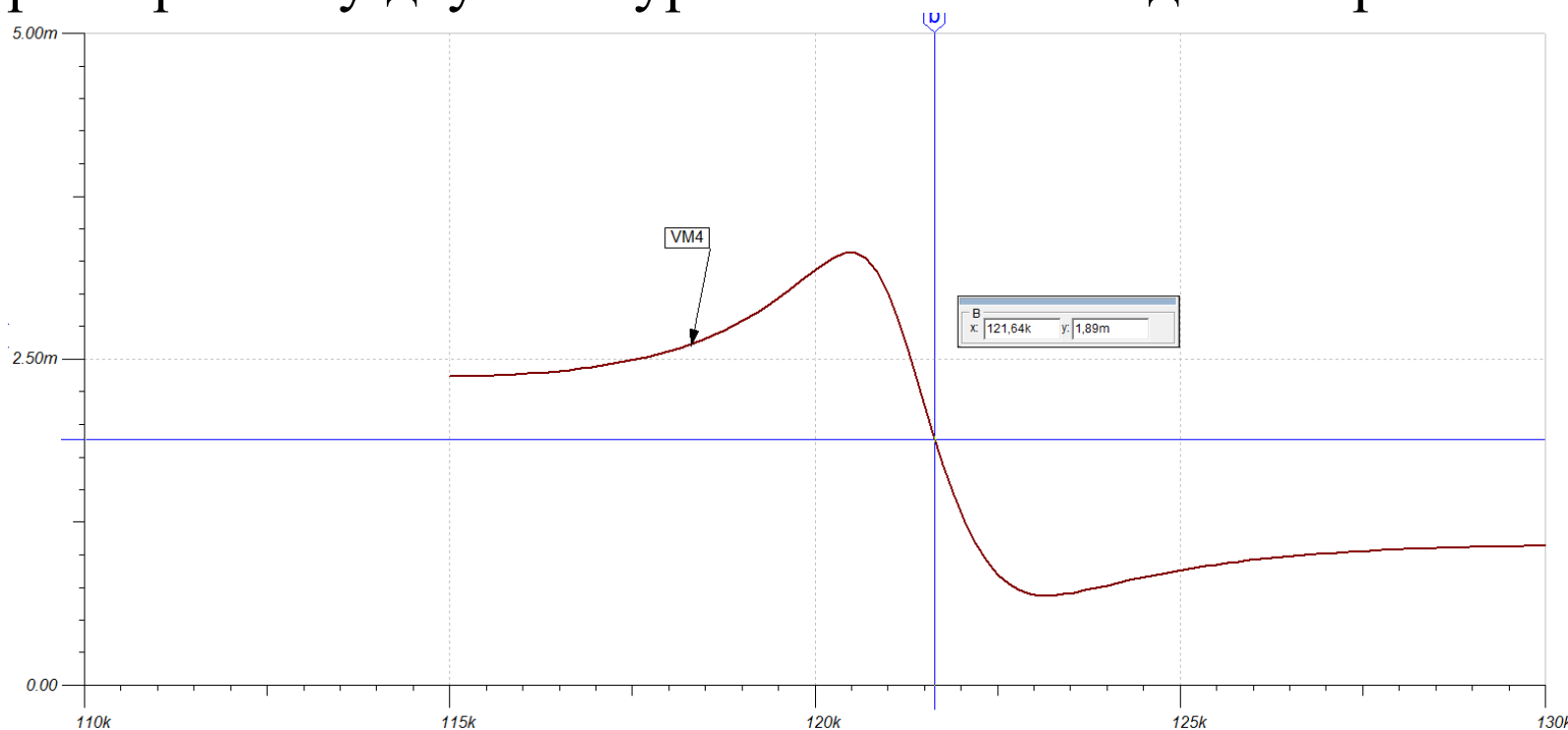


Рис.8.18. Передаточная характеристика двухконтурного ЧД

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

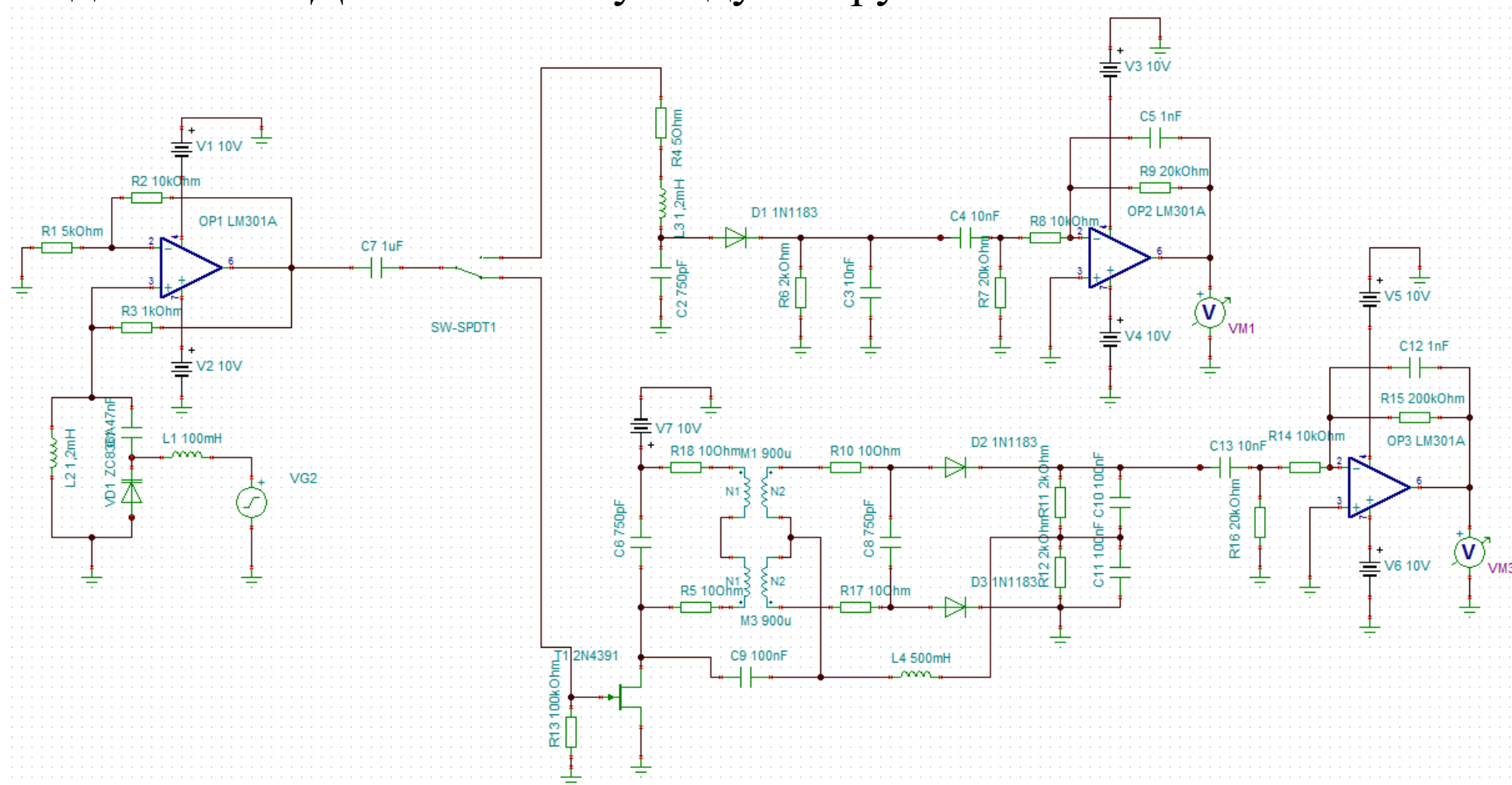


Рис.8.19. Частотный модулятор с частотными детекторами

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

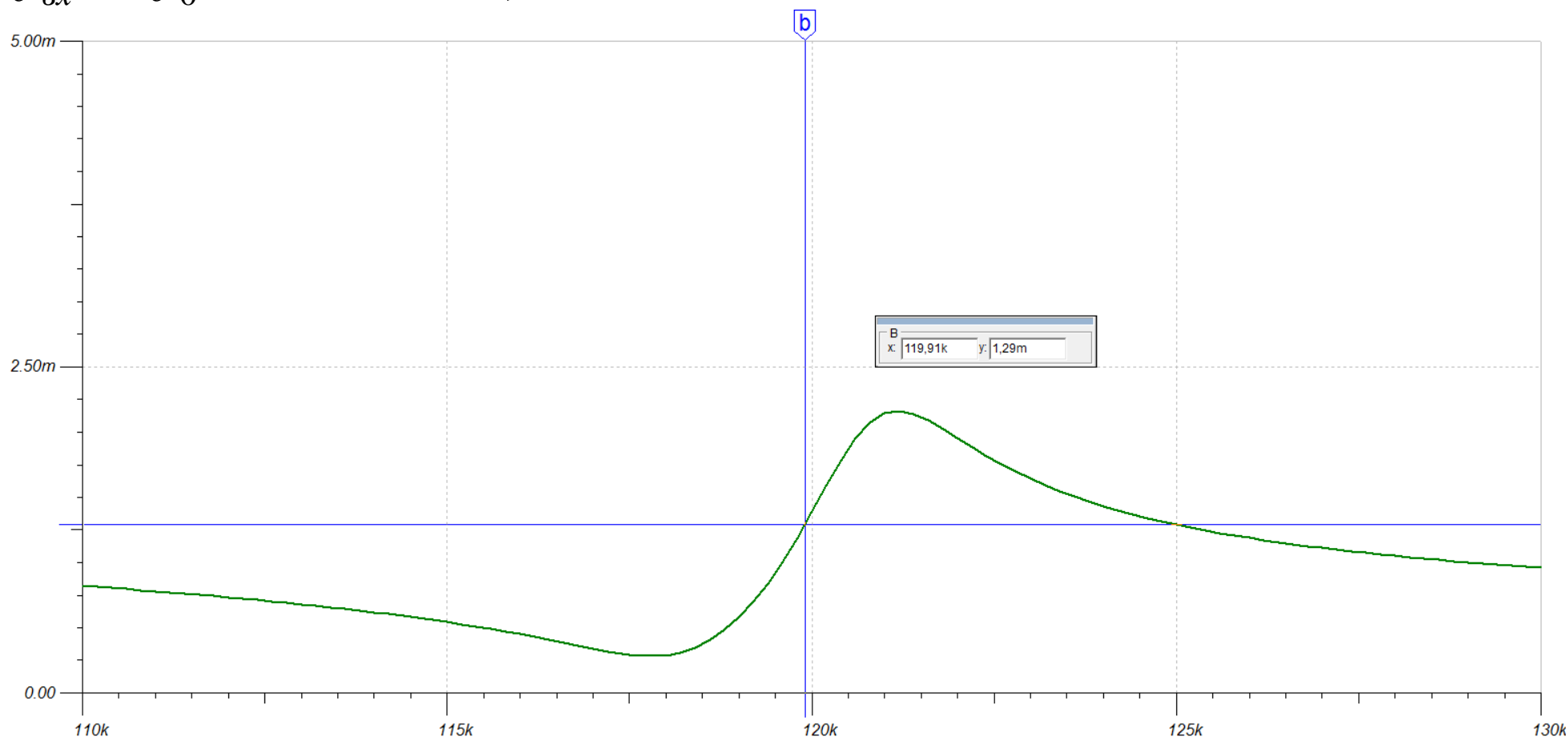


Рис.8.20. Передаточная характеристика частотного демодулятора  
Этой центральной частоте соответствуют параметры частотного модулятора:  $L_2 = 1,2 \text{ мГн}$ ,  $U_0 = 3 \text{ В}$ ,  $U_m = 2 \text{ В}$ ,  $f_M = 5 \text{ кГц}$ .

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

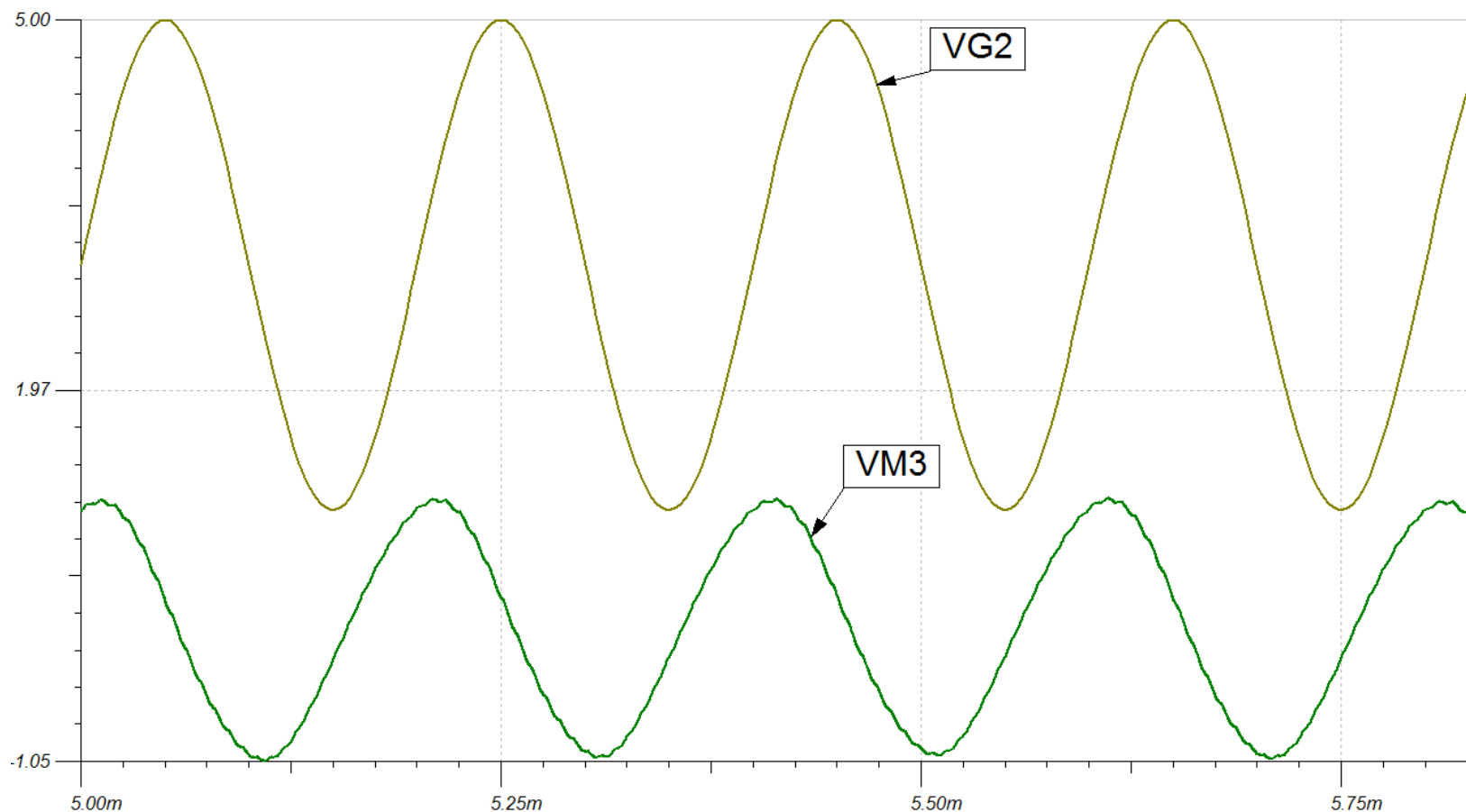


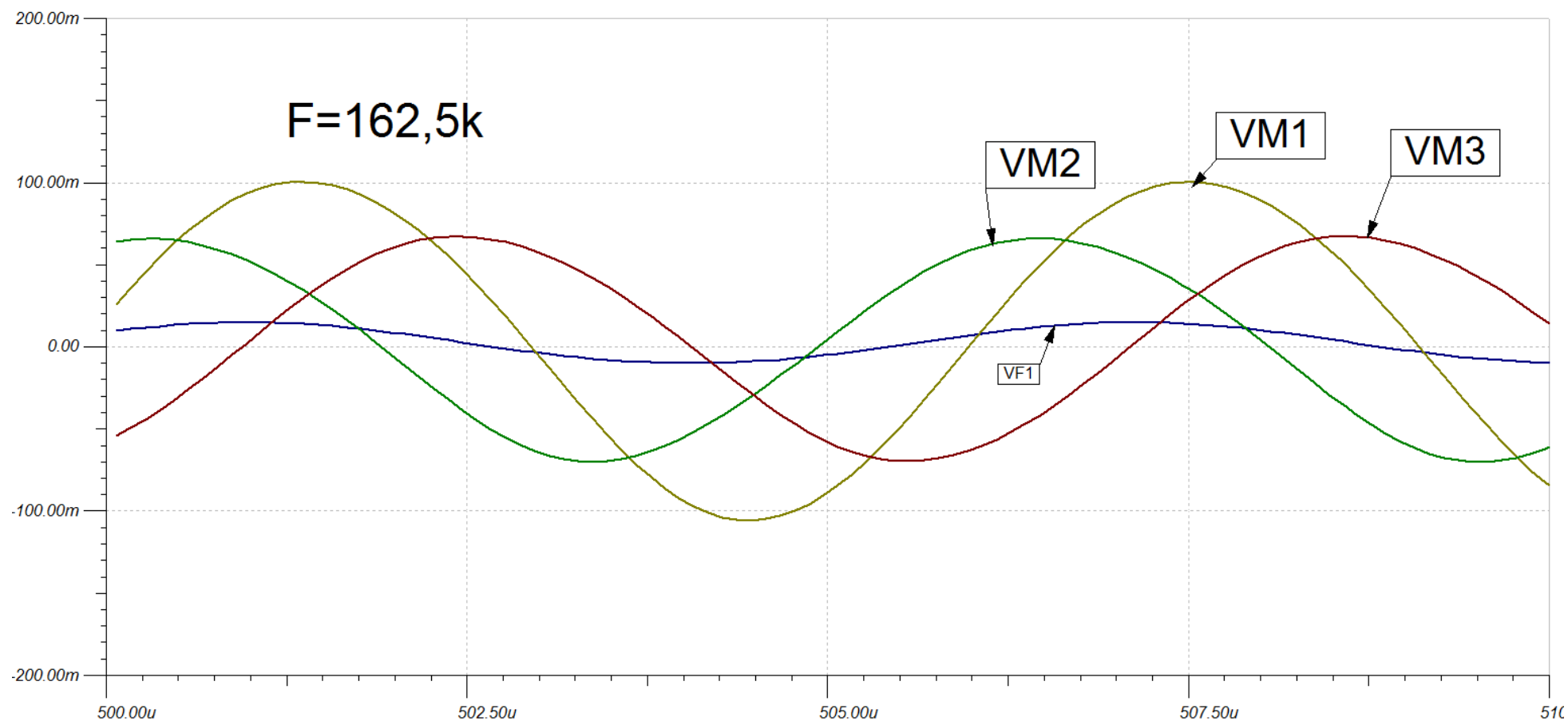
Рис.8.21. Информационный сигнал в двухконтурном частотном демодуляторе

## 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

