

Лекция 9

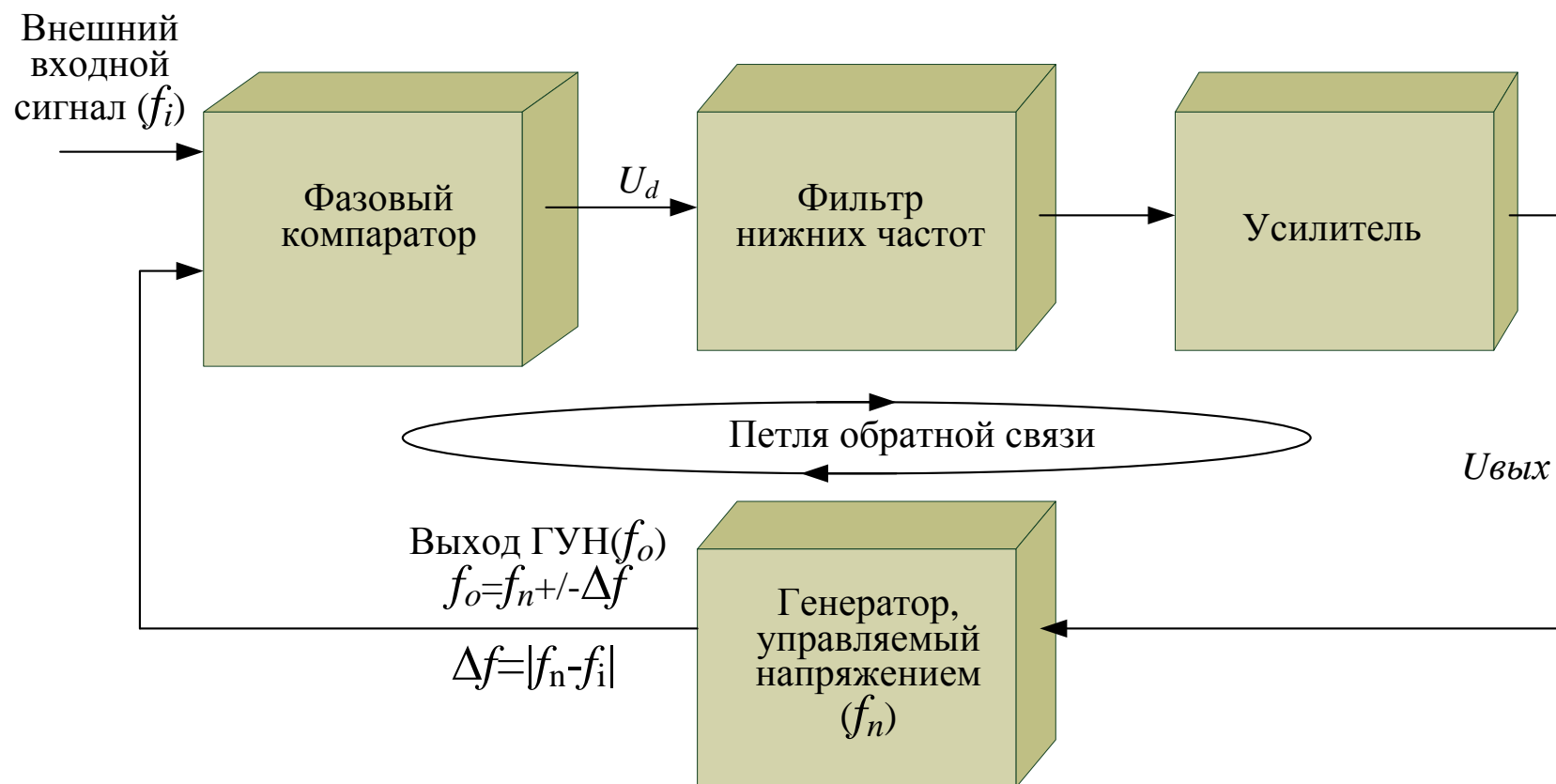
Фазовая автоподстройка частоты (ФАПЧ)

Фазовая автоподстройка частоты широко применяется в современных системах электросвязи для выполнения различных функций, включая модуляцию, демодуляцию, генерацию частоты, синтез частот, восстановления несущей и тактовой частоты и т.д. Схемы ФАПЧ используются в передатчиках и приемниках, при аналоговой и цифровой модуляции и при передаче цифровых сигналов. Сегодня доступен широкий ассортимент интегральных схем ФАПЧ для самых разных применений.

9.1. Структурная схема петли ФАПЧ

ФАПЧ – это система управления с петлей обратной связи, в которой параметрами регулирования являются частота или фаза сигнала, а не величина его напряжения или тока.

Структурная схема ФАПЧ показана на рис.9.1. Система ФАПЧ содержит четыре основных блока: 1) фазовый компаратор или фазовый детектор; 2) фильтр нижних частот; 3) усилитель; 4) ГУН-генератор, управляемый напряжением.



Работа ФАПЧ

Фазовая синхронизация сигналов подстраиваемого и опорного генераторов. После захвата частоты, на выходе фазового компаратора появится напряжение, пропорциональное разности фаз между сигналом на выходе ГУН и внешним эталонным сигналом.

Без опорного сигнала петля ФАПЧ разомкнута, ГУН работает на собственной частоте f_n .

С опорным сигналом компаратор сравнивает частоту внешнего сигнала с частотой выходного сигнала ГУН. На выходе фазового компаратора формируется напряжение ошибки (рассогласования) U_d , пропорциональное разности фаз двух сигналов на входе, которое через усилитель и фильтр воздействует на ГУН.

Если частоты близки, ГУН захватывает внешний сигнал.

Выходная частота ГУН: $f_0 = f_n \pm \Delta f$.

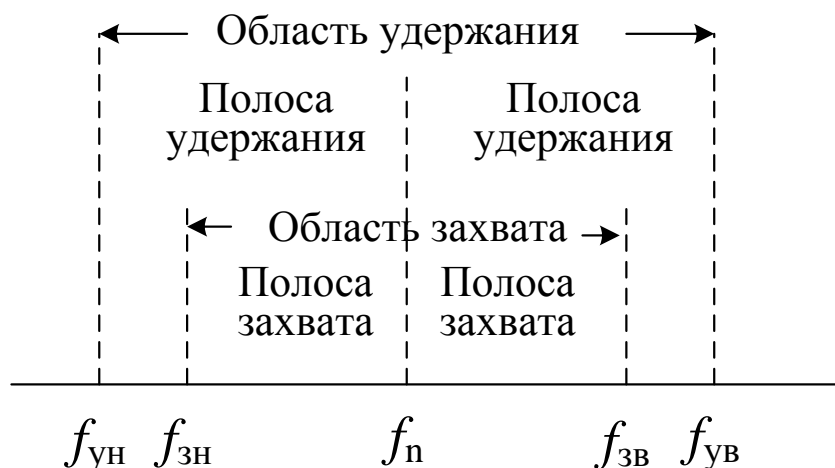
Здесь: $\Delta f = f_i - f_n$, f_i - внешняя опорная частота.

ФАПЧ имеет три рабочих состояния: автономное состояние собственных свободных колебаний, **режим захвата** и **режим слежения (удержания)**.

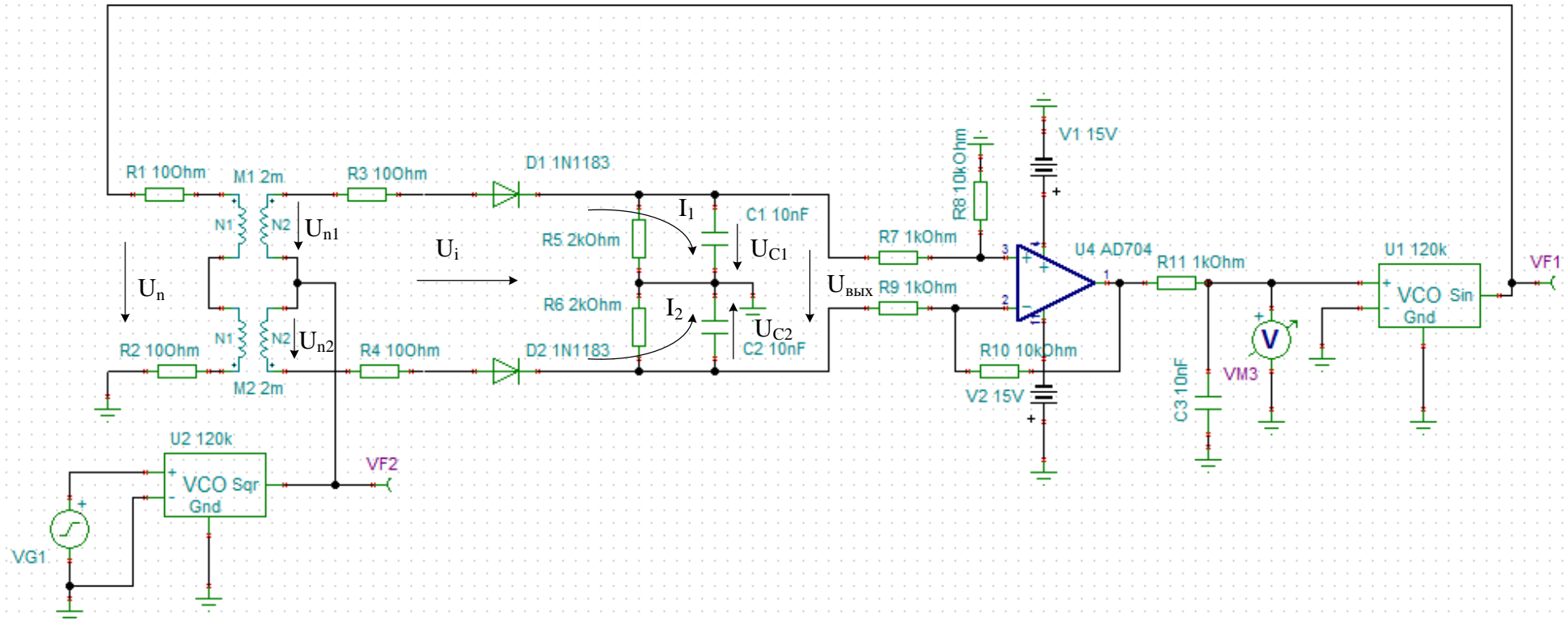
До захвата – биения на выходе ФНЧ: $f_d = |f_0 - f_i|$.

После захвата частоты частота биений на выходе ФНЧ становится равной 0 Гц, а величина и полярность постоянного напряжения будут пропорциональны разности фаз между внешним опорным сигналом и выходным сигналом ГУН. Наступает режим слежения за частотой (удержание).

Полоса захвата и удержания петли ФАПЧ



Модель системы ФАПЧ



Фазовый компаратор работает следующим образом. Диоды $D1$ и $D2$ открываются при положительных импульсах напряжения опорного сигнала U_i . Сигналы U_{n1} и U_{n2} добавляются к сигналу U_i , приводя к дополнительной зарядке или разрядке конденсаторов фильтра нижних частот.

В случае точного совпадения частот $f_n = f_i$ опорный сигнал U_i опережает управляемый сигнал U_n на 90° (рис.7.4а).

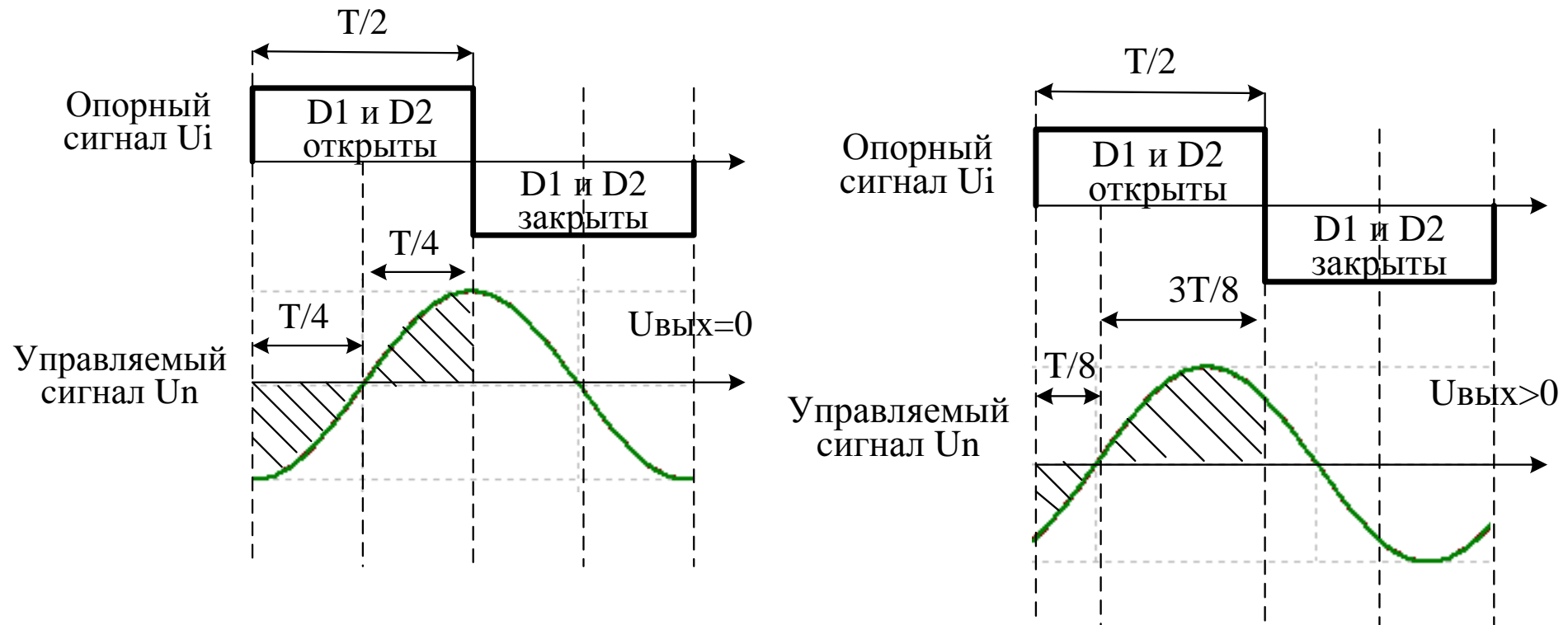


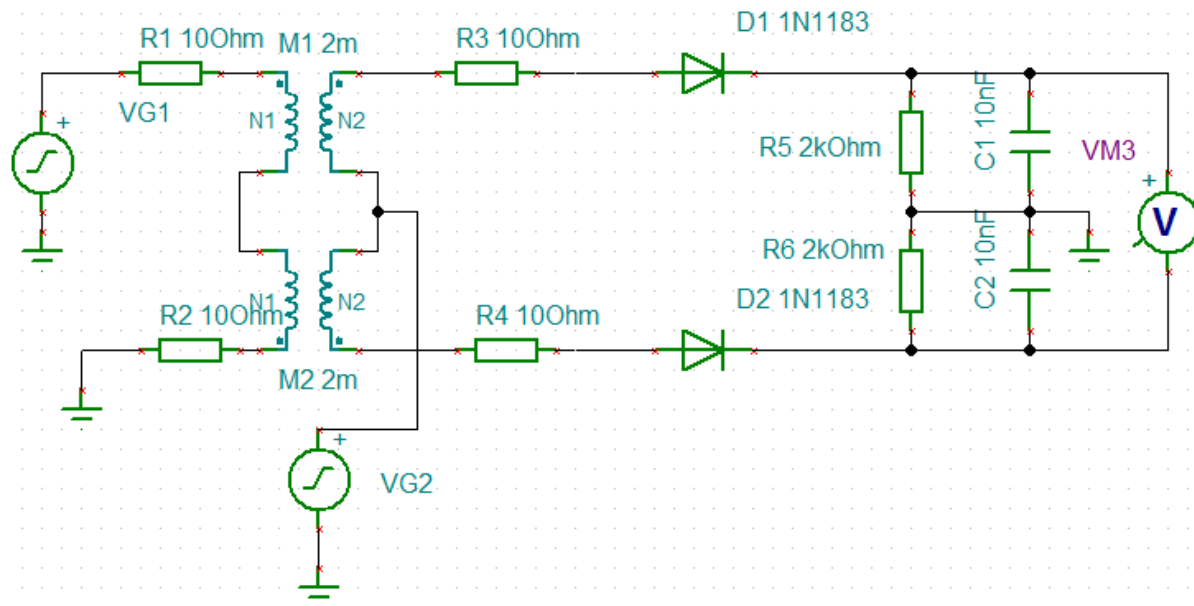
Рис.7.4. Сигналы на фазовом компараторе:
 а) равенство собственной частоты ГУН1 и опорной;
 б) опорная частота выше собственной

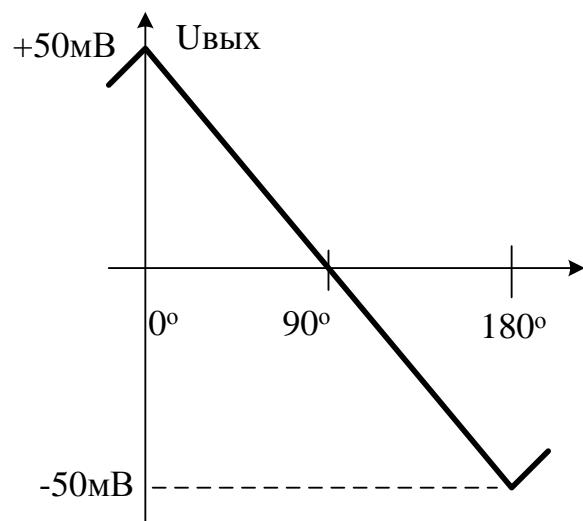
Передаточная функция фазового компаратора

$$K_d = \frac{U_{вых}}{\varphi_n - \varphi_i}$$

$U_{вых}$ - выходное напряжение компаратора, φ_n - фаза управляемого сигнала, φ_i - фаза опорного сигнала.

Схема измерения K_d





$$K_d = \frac{2 \cdot 50 \text{ mB}}{\pi} = \frac{100 \text{ mB}}{3,14} = 0,0318 \text{ B / рад}$$

Коэффициент усиления петли ФАПЧ

Коэффициент усиления системы ФАПЧ равен произведению коэффициентов усиления или передаточных функций отдельных звеньев петли.

Коэффициент усиления разомкнутой петли ФАПЧ

$$K_L = K_d K_\phi K_y K_n$$

Полная размерность коэффициента усиления петли ФАПЧ составит Гц/В.

В нашей модели установлено: $K_y = 10$, $K_n = 10 \text{ кГц} / \text{В}$. Измерено: $K_d = 0,0318 \text{ В} / \text{рад}$. Коэффициент усиления ФНЧ в установившемся режиме на постоянном токе примем равным 1.

Определим усиление разомкнутой петли ФАПЧ составит:

$$K_L = 0,0318 \text{ В} / \text{рад} \cdot 1 \cdot 10 \cdot 10^4 \cdot \text{Гц} / \text{В} = 3180 \text{ Гц} / \text{рад}.$$

Максимальный сдвиг фаз опорного и управляемого сигнала в фазовом компараторе изменяется на $\pm \frac{\pi}{2}$ относительно значения $\frac{\pi}{2}$ при равенстве частот. Следовательно, максимальное изменение выходной частоты управляемого сигнала ГУН1 составит:

$$\pm \Delta f_{\max} = \pm 3180 \text{ Гц} / \text{рад} \cdot \frac{\pi}{2} = \pm 4995 \text{ Гц}$$

Область удержания – это величина, независящая от характеристик ФНЧ (так как в полосе удержания напряжение на выходе фазового компаратора постоянное), и равная:

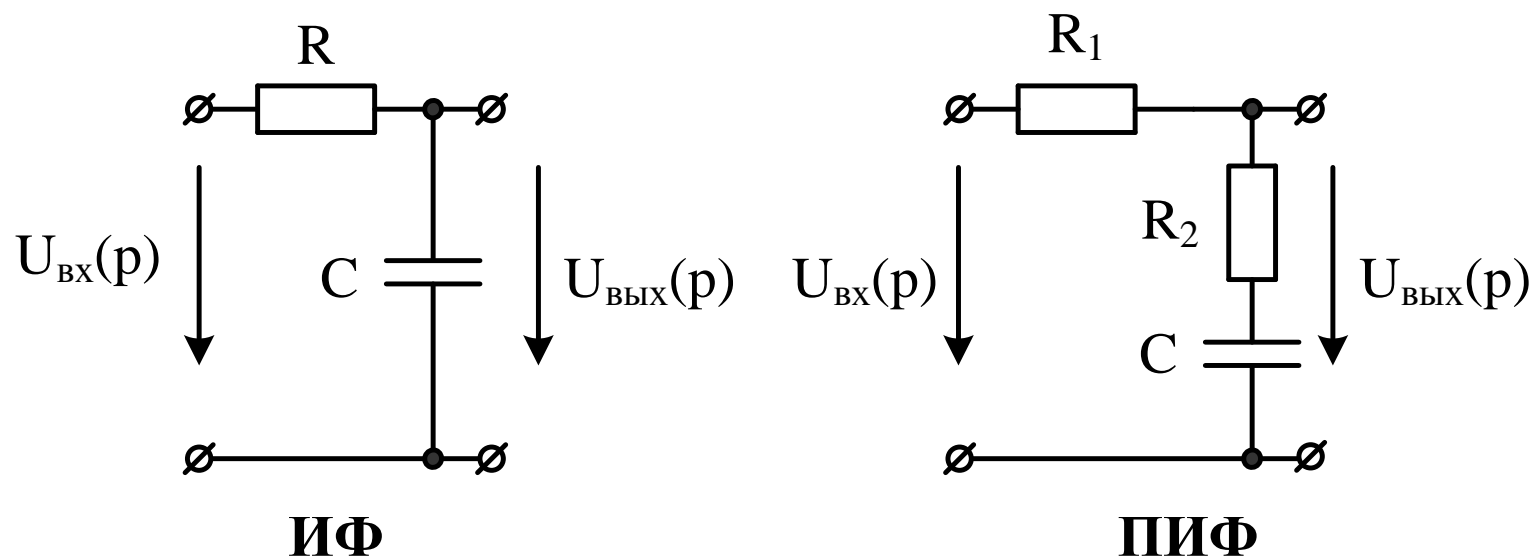
$$2P_y = K_L \cdot \pi = 2\Delta f_{max}.$$

Область захвата зависит от области удержания и от характеристик ФНЧ. Поэтому область захвата изменяется в зависимости от типа использованного фильтра и от его частоты среза.

Таким образом ФНЧ определяет переходные и частотные характеристики системы ФАПЧ в целом. При увеличении постоянной времени ФНЧ (уменьшении полосы пропускания) происходят следующие изменения в системе ФАПЧ:

- процесс захвата происходит более медленно, а время захвата увеличивается;
- диапазон частот захвата уменьшается;
- помехозащищенность системы ФАПЧ возрастает;

На рис.7.7 показаны интегрирующий фильтр первого порядка (ИФ) и пропорционально-интегрирующий фильтр первого порядка (ПИФ).



Основное уравнение типовой системы ФАПЧ

$$p\varphi + \omega_y k_{дн}(\varphi) K_{\phi}(p) = \Omega_n$$

Экспериментальное исследование модели ФАПЧ

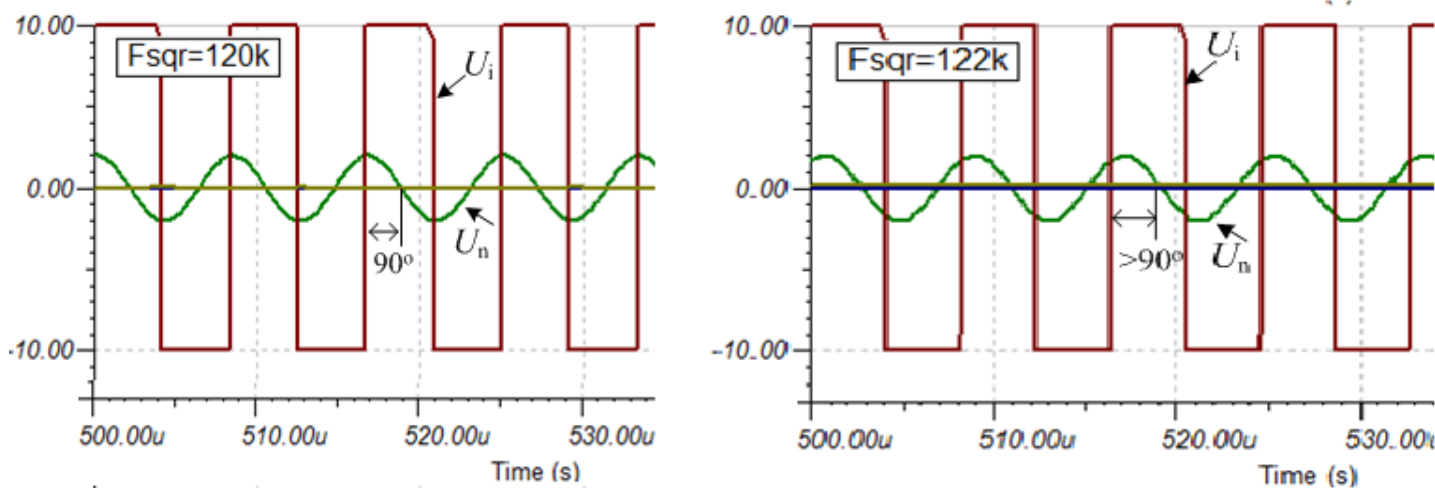
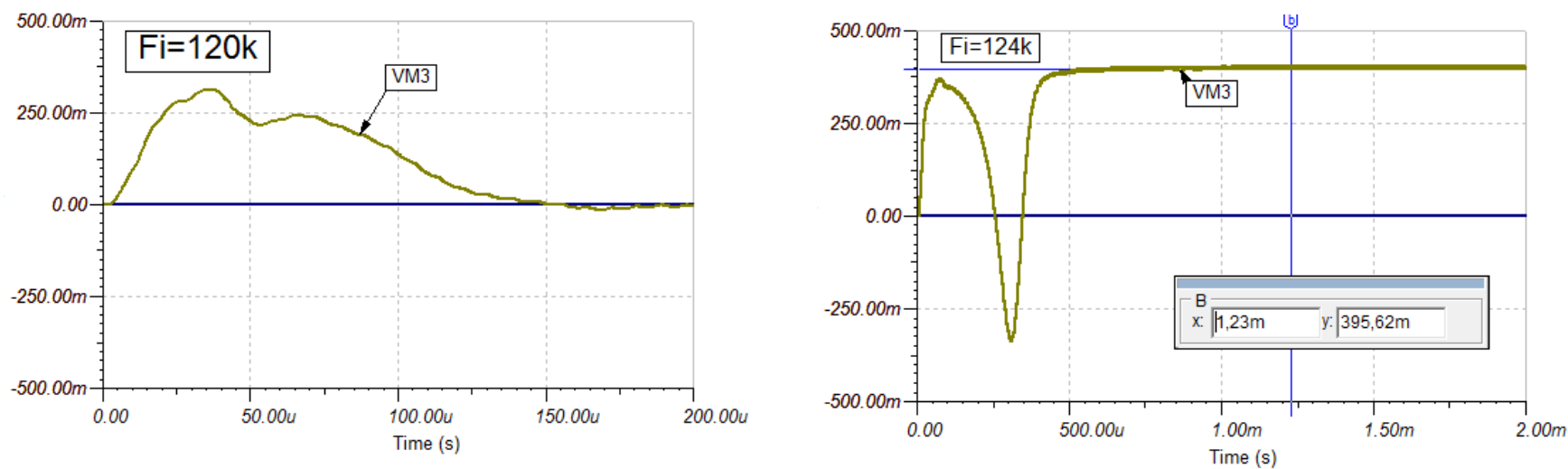
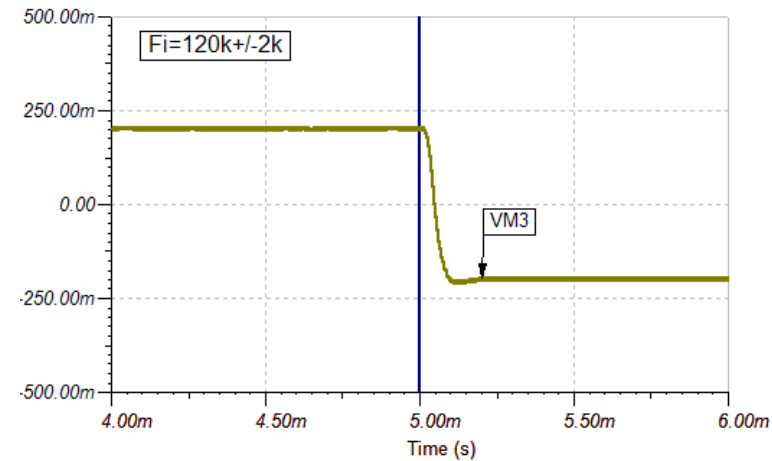
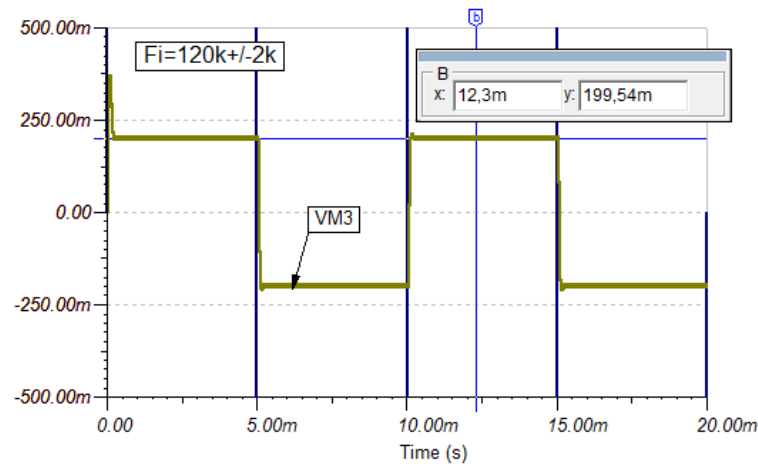


Рис.7.8. Сдвиг фаз при удержании частоты



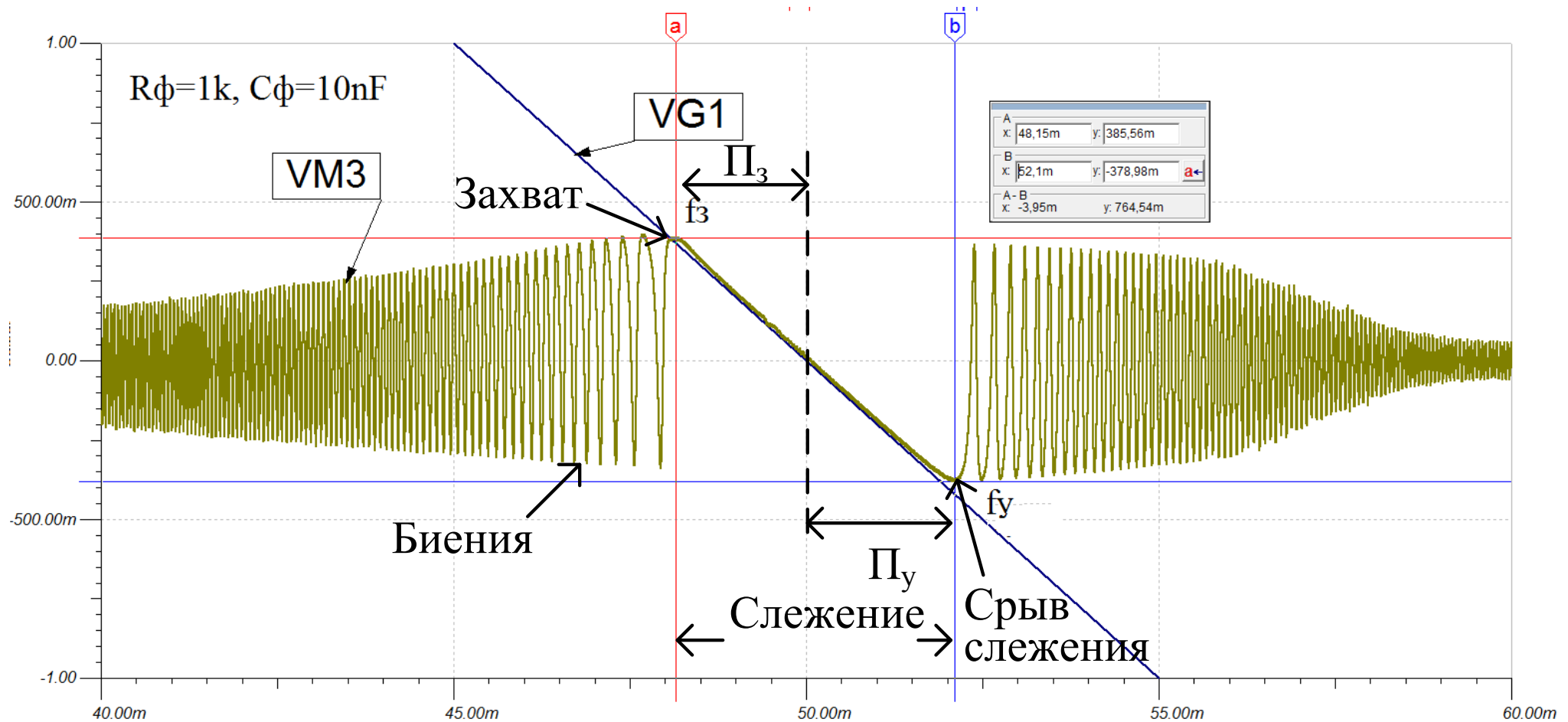
Переходной процесс при захвате частоты



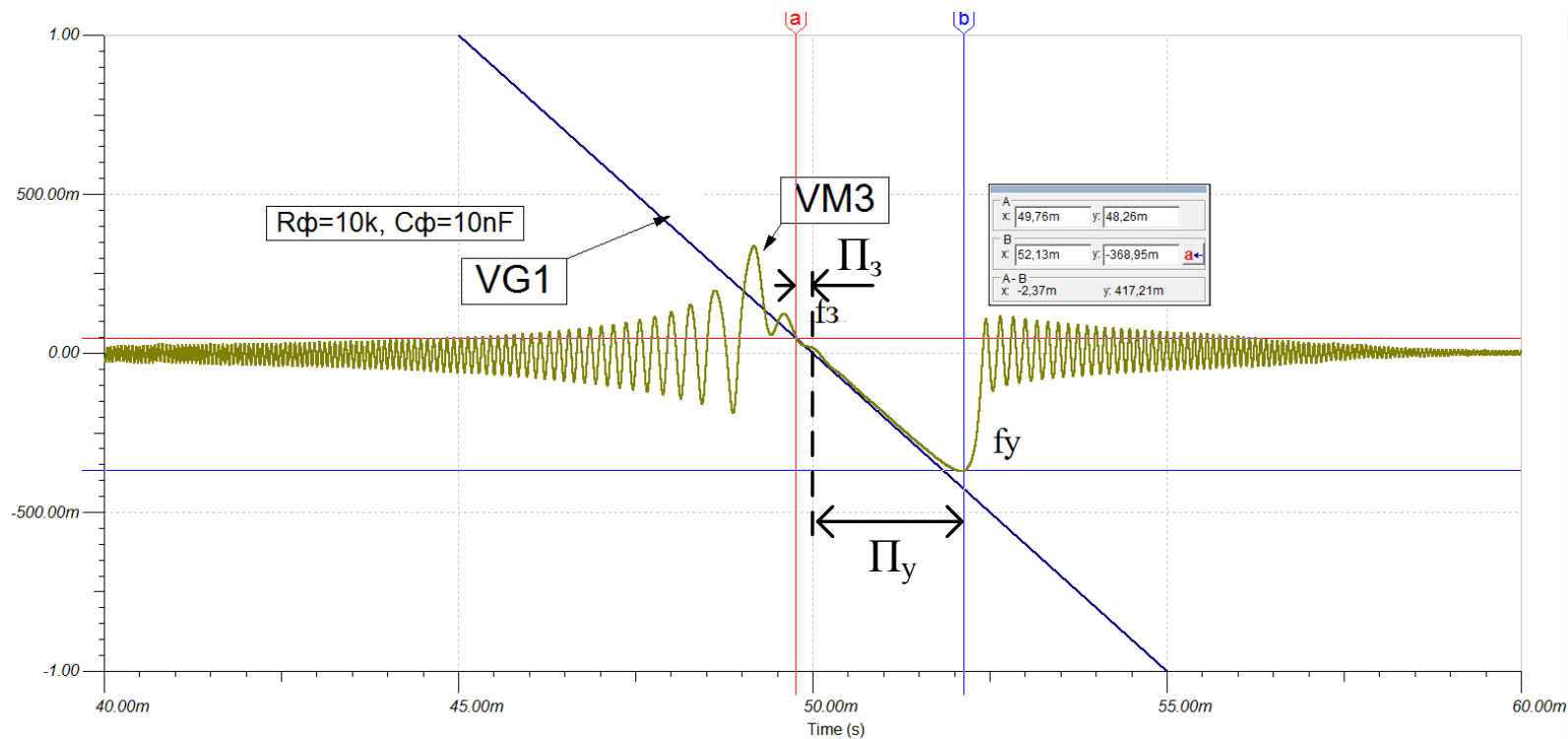
Исследование полосы захвата и удержания

В генераторе VG1 установим треугольный сигнал с частотой 10Гц и амплитудой 5В. Коэффициент преобразования опорного генератора VCO Sqr установим равным 10кГц/В. При этом частота опорного генератора будет линейно меняться в пределах $f_i = 120\text{кГц} \pm 50\text{кГц}$. Сигнал с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ). Скорость изменения составляет $\frac{\Delta f_i}{\Delta t} = 2\text{МГц} / \text{с}$. Будем измерять напряжение VM3 на входе ГУН1 в режиме Transient на временном интервале 0-100мс.

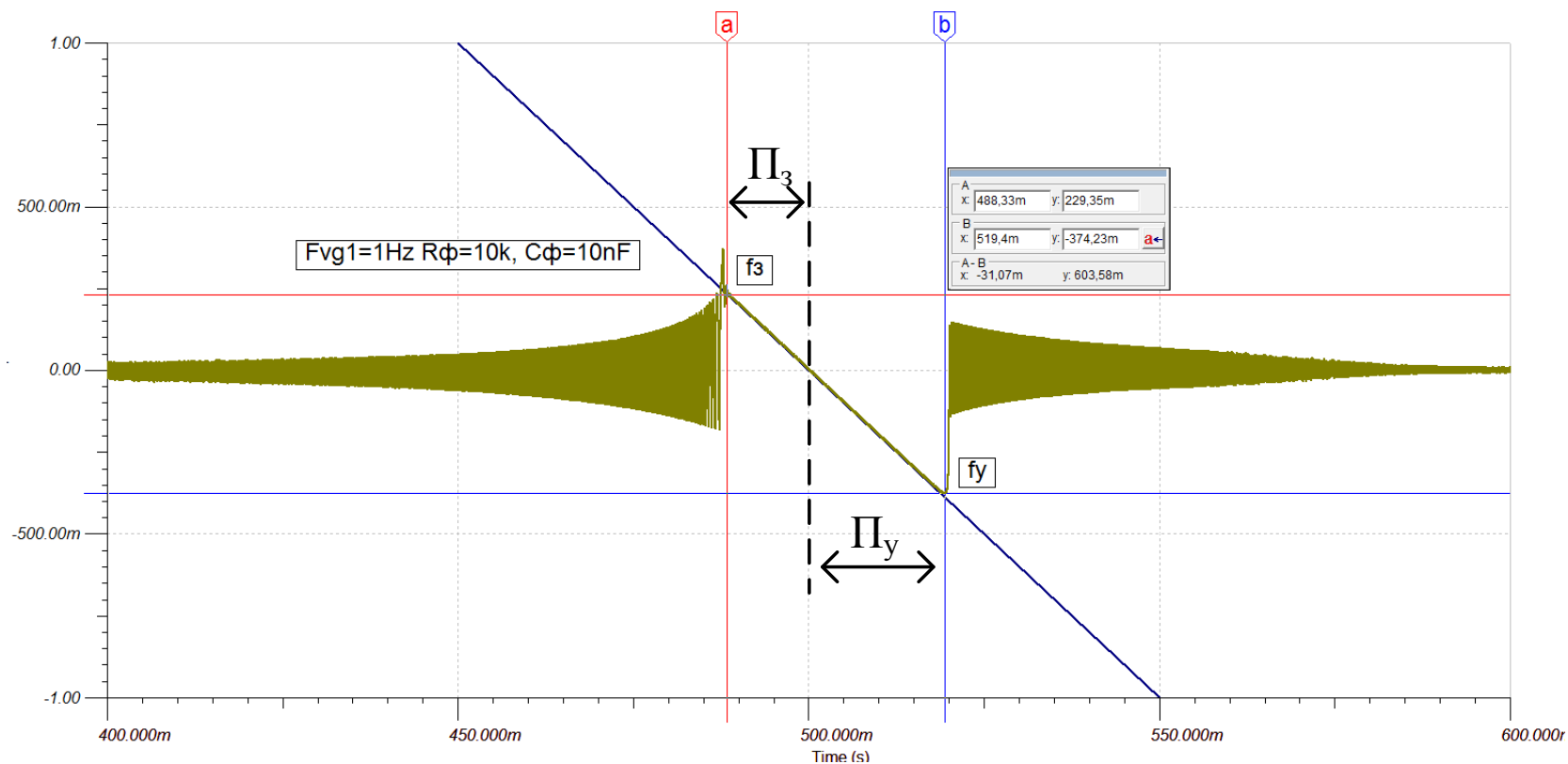
Будем измерять напряжение VM3 на входе ГУН1 в режиме Transient на временном интервале 0-100мс.



$$f_3 \approx f_y = 385mB \cdot 10k\Gamma_{\text{ц}} / B = 3,85k\Gamma_{\text{ц}}$$



$$f_3 \approx 480 \text{ Гц}, f_y = 3,85 \text{ кГц}$$

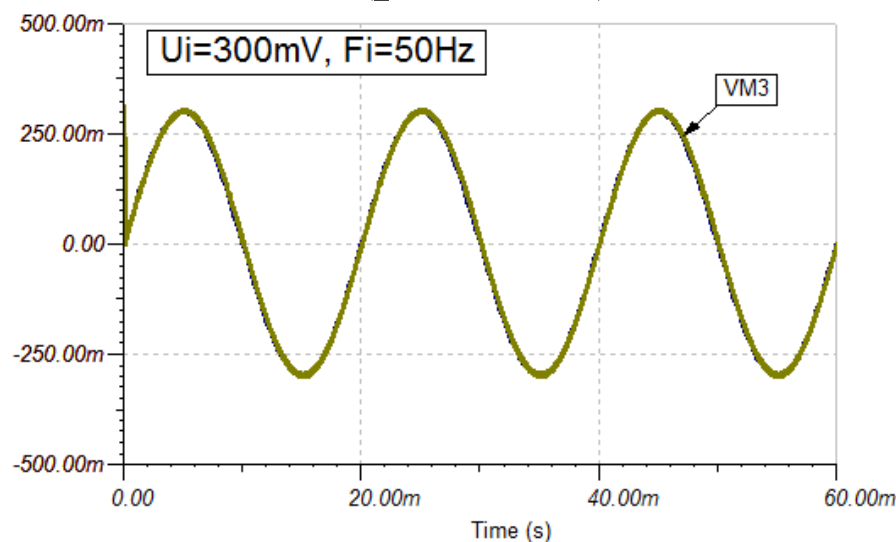


Измерение полосы захвата и удержания для ФНЧ с $\tau_{\phi} = 10^{-4}\text{c}$
при скорости ЛЧМ 200кГц/с

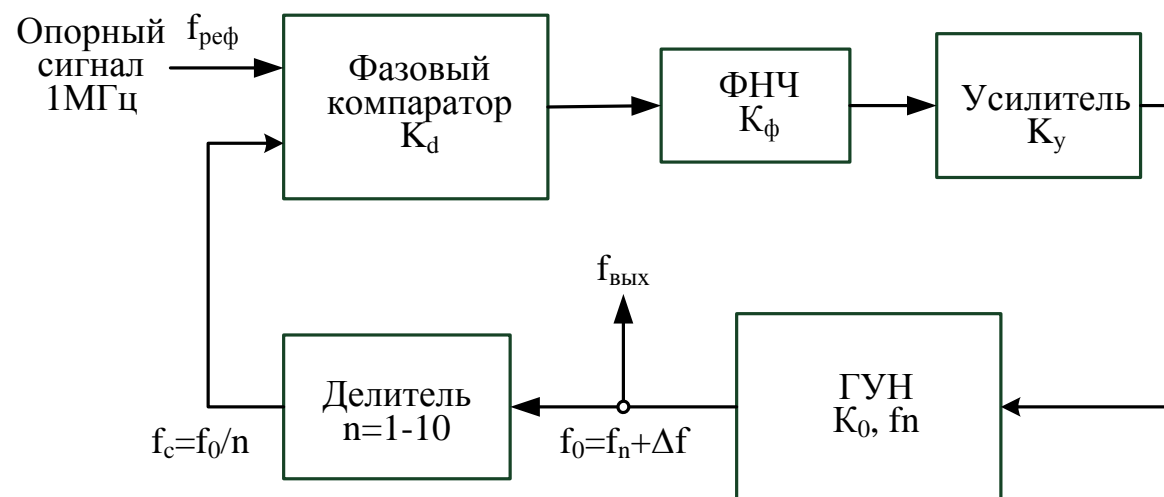
Использование ФАПЧ для демодуляции ЧМ сигнала

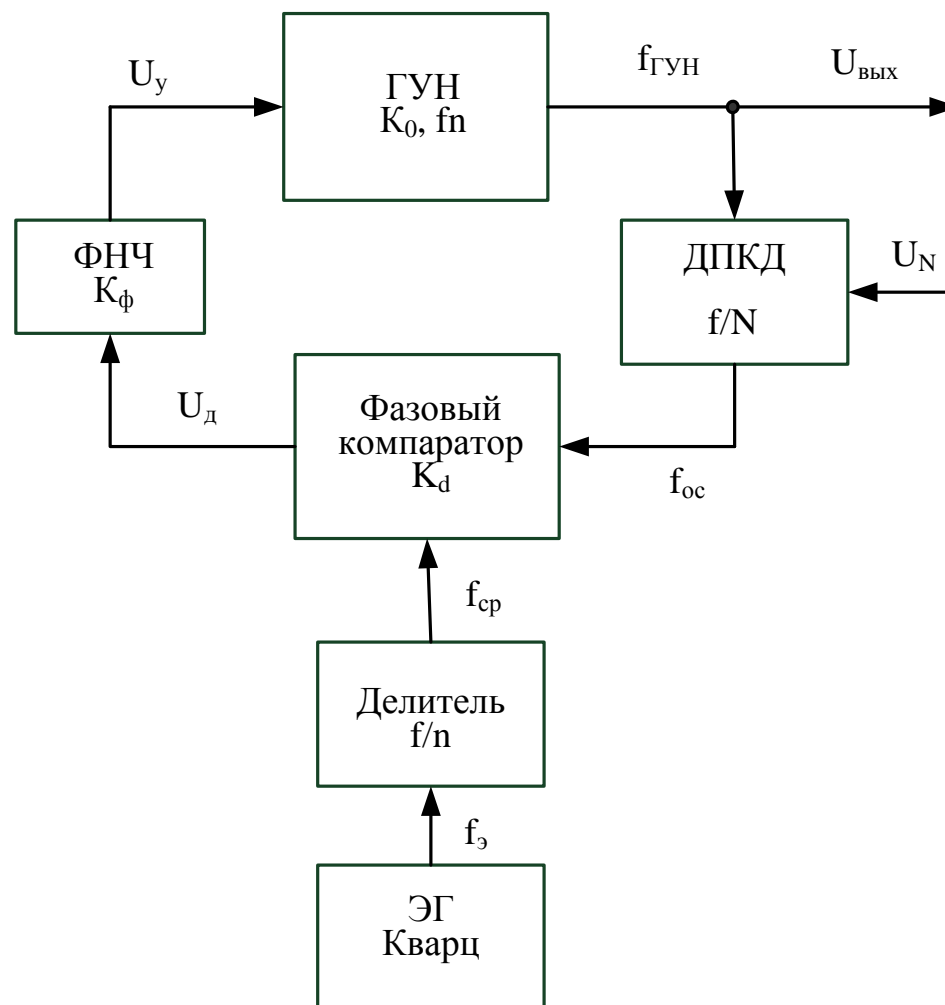
При соответствующем выборе параметров ФНЧ система ФАПЧ может с высокой точностью отслеживать частоту сигнала с частотной модуляцией. В этом случае управляющее напряжение на выходе ФНЧ будет повторять модулирующее сообщение.

Установим в генераторе VG1 синусоидальный сигнал с амплитудой 300мВ и частотой 50Гц. Коэффициент преобразования опорного генератора VCO Sqr установим равным 10кГц/В. Постоянная времени ФНЧ $\tau_\phi = R_\phi C_\phi = 10^{-5} \text{ с}$. В режиме Transient на выходе ФНЧ получим демодулированный сигнал (рис.7.16).



Синтезаторы частоты на основе ФАПЧ





. Функциональная схема синтезатора с двумя делителями частоты

$$f_{ГУН} = N \cdot f_{cp}$$