

## Лабораторная работа № 4

### Исследование на модели системы АРУ

Выполнить моделирование системы автоматической регулировки усиления (АРУ) с обратной связью (с «регулировкой назад»). Получить статическую регулировочную характеристику и оценить влияние амплитуды сигнала на быстродействие системы АРУ.

#### Схема модели и исходные данные для моделирования

Загрузить файл АРУ.cir с моделью системы АРУ (рис. 1).

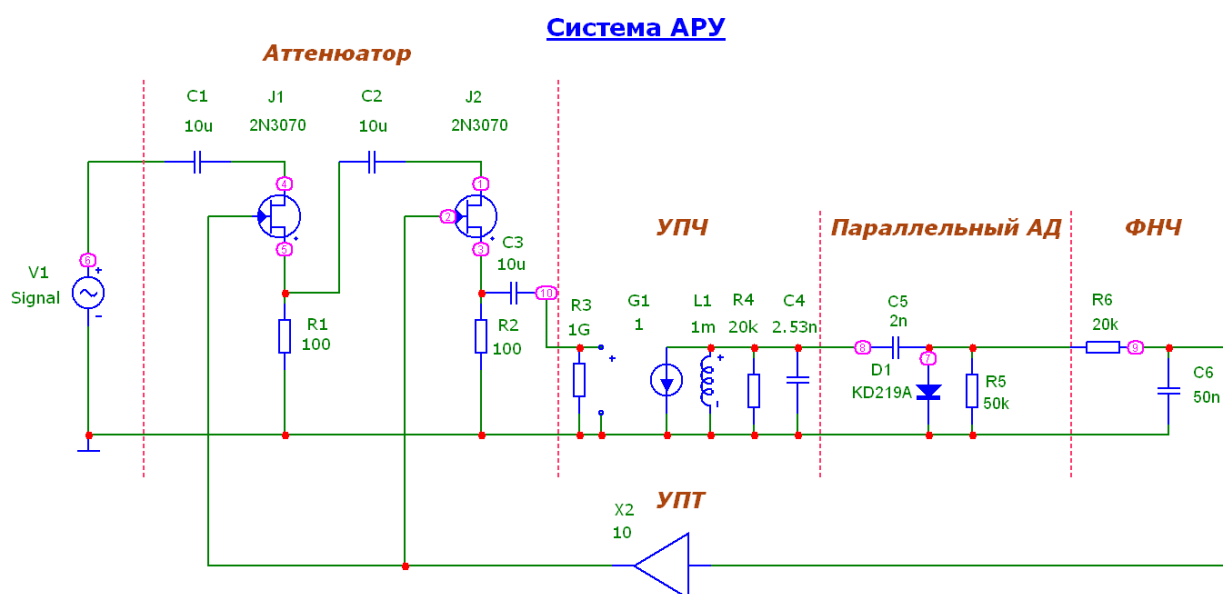


Рис. 1. Схема модели системы АРУ

Ознакомиться с составом модели:

- источник сигнала – источник гармонического напряжения с частотой 100 кГц и амплитудой 1 мВ;
- аттенюатор – двухступенчатый управляемый делитель напряжения на полевых транзисторах с управляющим *pn*-переходом и каналом *n*-типа (рабочее напряжение затвор-исток отрицательное); коэффициент передачи аттенюатора определяется выражением<sup>1</sup>

$$K_{\text{атт}} = \frac{1}{\left(\frac{R_{\text{пт}}}{R} + 1\right)^2 + \frac{R_{\text{пт}}}{R}},$$

где  $R_{\text{пт}}$  – сопротивление канала полевого транзистора,  $R$  – сопротивление резистора, подключённого к истоку транзистора (в модели задано  $R = 100 \text{ Ом}$ );

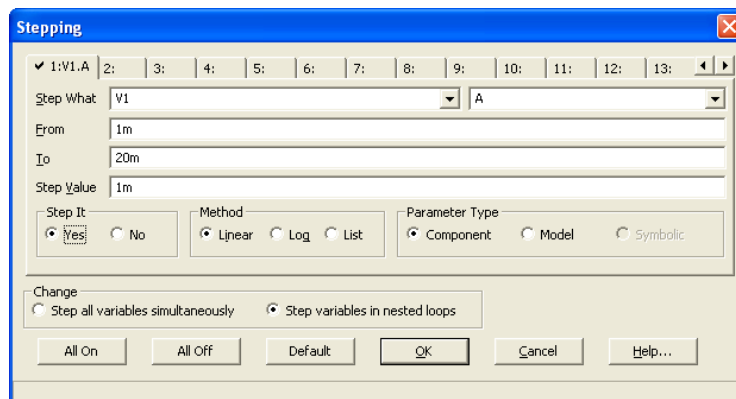
<sup>1</sup> Вывод этого выражения приведён в Приложении 1

- усилитель промежуточной частоты (УПЧ) – моделируется как источник тока, управляемый напряжением (ИТУН)<sup>2</sup>, подключённый к параллельному колебательному контуру с резонансной частотой 100 кГц (ёмкость конденсатора контура задана с учётом влияния выходной ёмкости аттенюатора и входной ёмкости амплитудного детектора);
- амплитудный демодулятор (АД) – параллельный диодный амплитудный детектор;
- фильтр низких частот (ФНЧ) – интегрирующая RC-цепь с постоянной времени 1 мс;
- усилитель постоянного тока (УПТ) – идеальный усилитель напряжения (макрос Amp) с коэффициентом передачи 10.

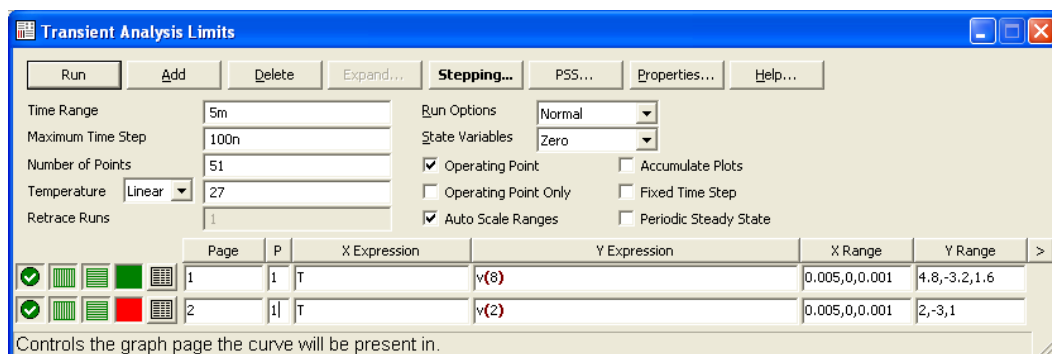
## 1. Измерение амплитудной характеристики УПЧ с системой АРУ

1.1. В режиме **Transient Analysis** задать пошаговое изменение (Stepping) амплитуды сигнала от 1 мВ до 20 мВ с шагом 1 мВ и получить эпюры следующих напряжений:

- на выходе УПЧ;
- на выходе УПТ (управляющее напряжение).



Время моделирования задать равным 5 мс, максимальный шаг по времени 100 нс.



<sup>2</sup> Резистор R3 с практически бесконечным сопротивлением 1ГОм необходим для того, чтобы обеспечить соединение входа ИТУН на «землю»; при отсутствии такого соединения выдаётся сообщение об ошибке и модель не работает.

1.2. По эюграм управляющего напряжения убедиться в том, что во всех случаях к концу интервала моделирования достигается установившийся режим.

1.3. По эюграм напряжения на выходе УПЧ определить амплитуду колебания в установившемся режиме. Для этого выделить участок эюгр, соответствующий установившемуся режиму, и увеличить его. На увеличенном графике установить маркер в максимум и, перемещая его с одной эюгры на другую клавишами «стрелка вверх» и «стрелка вниз», считать значения амплитуды.

1.4. Добавив к результатам измерений точку с координатами  $U_c = 0, U_{\text{вых}} = 0$ , построить (на бумаге или с помощью MathCAD) график амплитудной характеристики (зависимости  $U_{\text{вых}}(U_c)$ ). Определить минимальное напряжение сигнала, при котором начинается эффективная работа системы АРУ. Сделать выводы.

## 2. Определение быстродействия системы АРУ

2.1. В режиме **Transient Analysis** задать пошаговое изменение (Stepping) амплитуды сигнала от 1 мВ до 5 мВ с шагом 1 мВ и получить эюгру напряжения на выходе УПЧ (управляющего напряжения).

2.2. Оценить влияние амплитуды сигнала на быстродействие системы АРУ. Для этого по эюгре управляющего напряжения определить длительность переходного процесса (до уровня 0,9 от установившегося значения) при изменении амплитуды сигнала от 1 мВ до 5 мВ. Полученные значения занести в таблицу, сделать выводы.

## 3. Определение характеристик блоков системы АРУ

3.1. Получить регулировочную характеристику УПЧ с аттенуатором. Для измерения регулировочной характеристики следует исключить из модели обратную связь, убрав УПТ, и включить между затворами полевых транзисторов и «землём» источник постоянного регулирующего напряжения (батарею) отрицательной полярности. Изменённую модель сохранить под новым именем (например, АРУ без ОС.cir) (рис. 2).

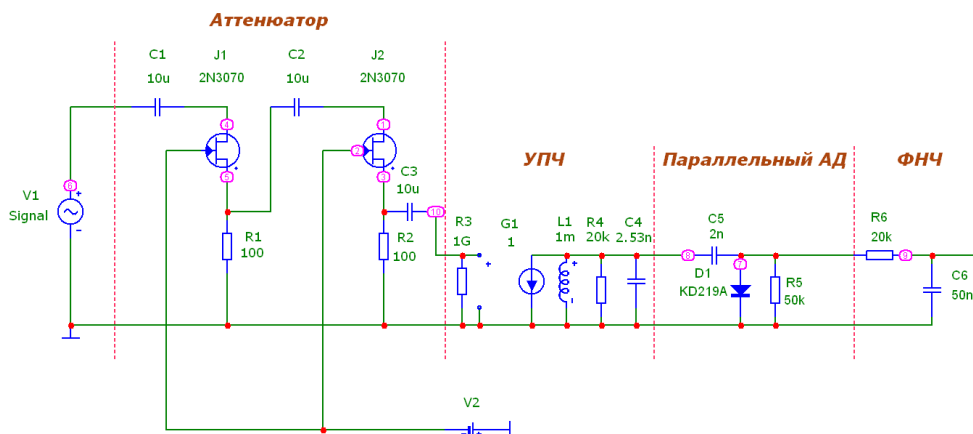


Рис. 2. Схема модели системы АРУ с разомкнутой обратной связью

Задав амплитуду сигнала  $U_c = 1$  мВ и измеряя амплитуду колебания на выходе УПЧ в установившемся режиме при изменении регулирующего напряжения от 0 до 2,2 В с шагом 0,2 В, построить регулировочную характеристику УПЧ с аттенуатором (зависимость резонансного коэффициента усиления  $K_0 = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_c}$  от регулирующего напряжения  $U_p$ ).

3.2. Получить детекторную характеристику. Для этого установить регулирующее напряжение равным 0. Задать изменение амплитуды сигнала от 0,2 мВ до 2 мВ с шагом 0,2 мВ и получить эпюры следующих процессов:

- напряжения на входе АД;
- напряжение на выходе ФНЧ.

Поскольку ФНЧ имеет значительную инерционность, то для достижения установившегося режима время моделирования следует увеличить до 10 мс, максимальный шаг по времени задать равным 100 нс.

По полученным эпюрам процессов в установившемся режиме определить следующие величины:

- амплитуду колебания  $U$  на входе АД;
- абсолютное значение напряжения  $|U_d|$  на выходе ФНЧ.

Добавив к результатам измерений точку с координатами  $U = 0, U_d = 0$ , построить детекторную характеристику  $|U_d| = f(U)$ .

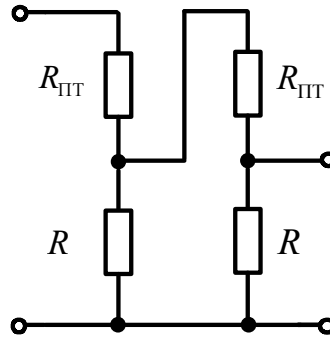
#### 4. Расчёт амплитудной характеристики

Для проверки правильности измеренных характеристик рассчитать несколько (не менее трёх) точек на амплитудной характеристике. Расчёт делается в следующей последовательности:

1. задать некоторое значение  $U_{\text{ВЫХ}}$  амплитуды сигнала на выходе УПЧ;
2. по детекторной характеристике найти соответствующее ему напряжение  $U_d$  на выходе АД;
3. умножив  $U_d$  на коэффициент усиления УПТ  $K_{\text{УПТ}} = 10$ , определить регулирующее напряжение  $U_p$ ;
4. по регулировочной характеристике УПЧ найти коэффициент усиления  $K_0$ , соответствующий полученному значению  $U_p$ ;
5. разделив заданную амплитуду выходного сигнала на найденный коэффициент усиления, определить амплитуду сигнала на входе:  $U_c = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{K_0}$ ;
6. нанести точку с координатами  $(U_c, U_{\text{ВЫХ}})$  на график амплитудной характеристики.

### Коэффициент передачи аттенюатора

Эквивалентная схема двухступенчатого аттенюатора показана на рисунке.



Его коэффициент передачи в режиме холостого хода равен произведению коэффициентов передачи 1-й ступени  $K_1$  и 2-й ступени  $K_2$ :

$$K_{\text{атт}} = K_1 K_2.$$

Поскольку нагрузкой 1-й ступени аттенюатора является последовательно соединённые сопротивления  $R_{\text{ПТ}}$  и  $R$ , входящие в состав 2-й ступени, то её коэффициент передачи определяется следующим выражением:

$$\begin{aligned} K_1 &= \frac{R \parallel (R_{\text{ПТ}} + R)}{R_{\text{ПТ}} + R \parallel (R_{\text{ПТ}} + R)} = \frac{\frac{R(R_{\text{ПТ}} + R)}{R + (R_{\text{ПТ}} + R)}}{R_{\text{ПТ}} + \frac{R(R_{\text{ПТ}} + R)}{R + (R_{\text{ПТ}} + R)}} = \\ &= \frac{R(R_{\text{ПТ}} + R)}{R_{\text{ПТ}}(R_{\text{ПТ}} + 2R) + R(R_{\text{ПТ}} + R)} = \frac{\frac{R_{\text{ПТ}}}{R} + 1}{\frac{R_{\text{ПТ}}}{R} \left( \frac{R_{\text{ПТ}}}{R} + 2 \right) + \left( \frac{R_{\text{ПТ}}}{R} + 1 \right)}. \end{aligned}$$

Коэффициент передачи 2-й ступени равен

$$K_2 = \frac{R}{R_{\text{ПТ}} + R} = \frac{1}{\frac{R_{\text{ПТ}}}{R} + 1}.$$

Следовательно, коэффициент передачи аттенюатора равен

$$\begin{aligned} K_{\text{атт}} &= \frac{\frac{R_{\text{ПТ}}}{R} + 1}{\frac{R_{\text{ПТ}}}{R} \left( \frac{R_{\text{ПТ}}}{R} + 2 \right) + \left( \frac{R_{\text{ПТ}}}{R} + 1 \right)} \cdot \frac{1}{\frac{R_{\text{ПТ}}}{R} + 1} = \frac{1}{\frac{R_{\text{ПТ}}}{R} \left( \frac{R_{\text{ПТ}}}{R} + 2 \right) + \left( \frac{R_{\text{ПТ}}}{R} + 1 \right)} = \\ &= \frac{1}{\left( \frac{R_{\text{ПТ}}}{R} \right)^2 + 2 \frac{R_{\text{ПТ}}}{R} + 1 + \frac{R_{\text{ПТ}}}{R}} = \frac{1}{\left( \frac{R_{\text{ПТ}}}{R} + 1 \right)^2 + \frac{R_{\text{ПТ}}}{R}}. \end{aligned}$$