

федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева»
(Самарский университет)

**СИСТЕМЫ КОМПЬЮТЕРНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ
МОДУЛЕЙ МЕДИЦИНСКОЙ ТЕХНИКИ**

Методические указания к курсовой работе

«Сквозной цикл проектирования радиоэлектронных схем»

Самара 2022

СОДЕРЖАНИЕ

1 Задание на курсовую работу «Сквозной цикл компьютерного проектирования электронных схем».....	4
2 Микросхемы аналого-цифровых преобразователей.....	5
3 Примеры заданий для проектирования системы ввода аналоговых сигналов в микросхему аналого-цифрового преобразователя.....	7
4 Проектирование схемы ввода сигнала однонаправленного тока I_1	8
5 Проектирование схемы ввода сигнала однонаправленного тока I_2 при воздействии высокочастотных помех.....	10
6 Проектирование схемы ввода сигнала однополярного напряжения U_{DC1}	16
7 Проектирование схемы ввода сигнала однополярного напряжения U_{DC2} с высокочастотной помехой.....	18
8 Проектирование схемы ввода сигнала однополярного напряжения U_{DC3}	24
9 Проектирование схемы ввода сигнала однополярного напряжения U_{DC4} при воздействии высокочастотных помех.....	25
10 Проектирование схемы ввода сигнала переменного (разнополярного) напряжения U_{AC1}	30
11 Проектирование схемы ввода сигнала переменного (разнополярного) напряжения U_{AC2}	32
12 Проектирование схемы ввода сигнала переменного (разнополярного) напряжения U_{AC3}	35
13 Моделирование источника сигнала помехи	37
14 ВАРИАНТЫ ЗАДАНИЙ.....	40
Список использованных источников.....	43
Приложение А (справочное).....	44

1 Задание на курсовую работу «Сквозной цикл компьютерного проектирования электронных схем»

Выполнить проектирование системы ввода аналоговых сигналов в микросхему аналого-цифрового преобразователя (АЦП) для преобразования аналоговых сигналов в цифровые коды. Функциональная схема системы ввода представлена на рис 1.1.

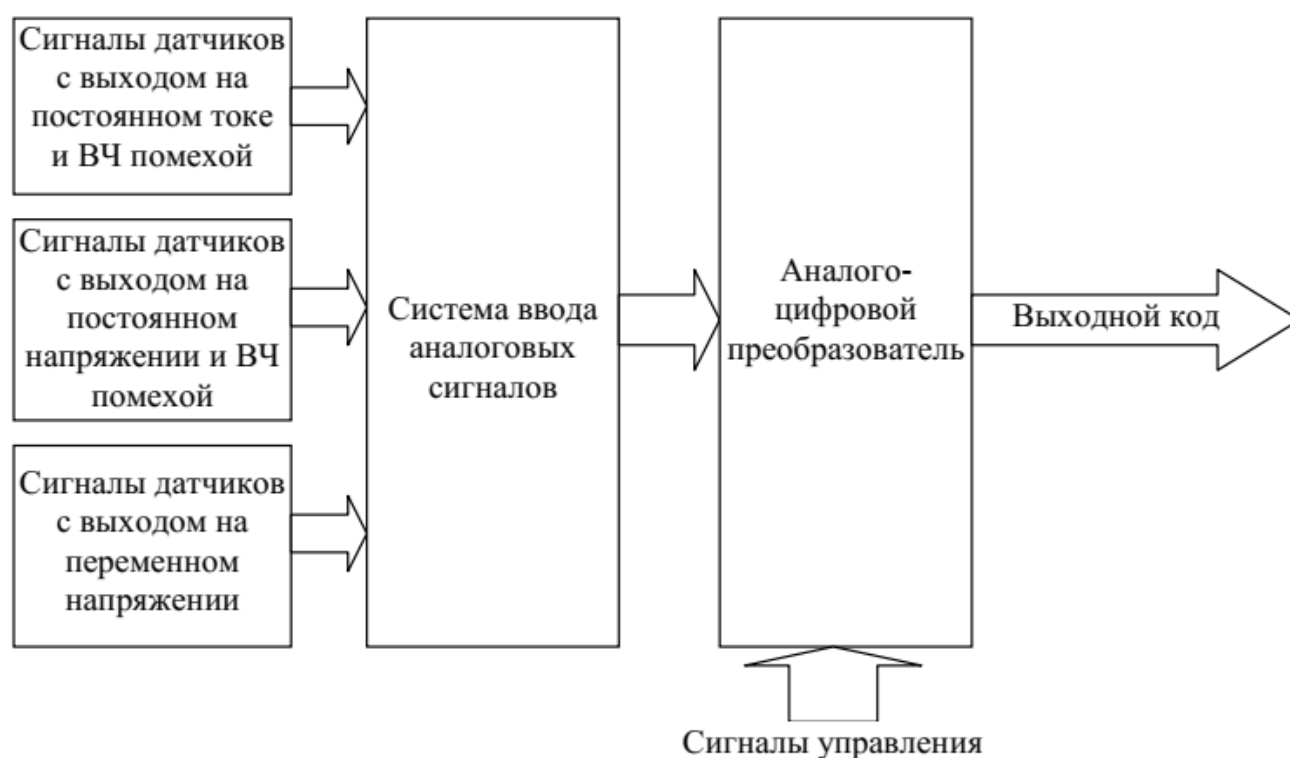


Рис. 1.1. Функциональная схема системы ввода аналоговых сигналов

Курсовая работа содержит следующие этапы:

1. Система ввода аналоговых сигналов должна обеспечить необходимый диапазон изменения входных напряжений для АЦП, определяемый вариантом курсовой работы. Тип аналого-цифрового преобразователя указан в задании.
2. Электрический ток необходимо преобразовать в напряжение. Сделать расчёт компонентов устройства сопряжения.
3. Переменное разнополярное напряжение требуется преобразовать в положительное однополярное напряжение с соответствующим диапазоном изменения величины. Сделать расчёт компонентов устройства сопряжения.

4. Для фильтрации ВЧ помех требуется выполнить проектирование активных фильтров нижних частот структур ИНУН (Саллен-Ки) или МОС (Рауха) и типом аппроксимации АЧХ по Баттерворту, Чебышеву, Бесселю с требуемым количеством звеньев фильтрации и соответствующими коэффициентами передачи по напряжению. Для всех вариантов использовать фильтр второго порядка. Полностью параметры фильтра указаны в задании.

Для всех разработанных устройств резисторы необходимо выбирать по ряду E96 (точность 2%), например: С2-33-0,125-1к±2%, а конденсаторы выбирать по ряду E24 (точность 5%), например: К10-17-50В-120п±5%.

5. Провести моделирование в OrCAD схем усилителей, разработанных по п. 2 и п. 3. Построить амплитудную характеристику – $U_{\text{вых}}=f(U_{\text{вх}})$.

6. Провести моделирование схем ФНЧ в OrCAD по переменному току, разработанных по п.4. Построить АЧХ и ФЧХ фильтров, определить частоту среза. Сравнить с расчетом. Определить уровень шума на выходе ФНЧ. По графику ФЧХ определить фазовый сдвиг на частоте среза.

7. Провести моделирование схемы ввода аналоговых сигналов в OrCAD во временной области, т.е. всей разработанной схемы (усилитель плюс фильтр). Построить графики сигналов на входе, после усилителя и после фильтра. График должен содержать 3-5 периодов переменного напряжения. Рассчитать коэффициент гармоник сигнала переменного напряжения на входе и выходе схемы ввода аналоговых сигналов. Построить графики спектра сигналов переменного напряжения на входе и выходе схемы ввода аналоговых сигналов. Сделать вывод о качестве фильтрации сигналов.

8. Разработать печатную плату схемы ввода аналоговых сигналов в OrCAD. Для этого добавить в схему разъемы и фильтрующие конденсаторы в цепи питания по ВЧ 0,1мкФ на корпус микросхемы, по НЧ 47,0мкФ на линию питания.

9. Пояснительная записка должна содержать описание способа подключения источников аналоговых сигналов к АЦП на основе технической документации на микросхему АЦП, указанную в задании.

10. Нарисовать по ГОСТу (нормам ЕСКД или стандарту СамУн) принципиальную электрическую схему на листе формата А4 разработанного устройства ввода аналоговых сигналов, включающую разъемы, микросхемы ОУ, АЦП и прочие R – С компоненты.

На схеме электрической принципиальной должны быть также изображены условные графические обозначения (УГО) разъемов с требуемым количеством контактов и названиями сигналов. Разъемы должны быть отдельные для входных сигналов, для напряжений питания, для сигналов управления и выходных сигналов АЦП – всего три разъема.

11. Для схемы электрической принципиальной требуется составить перечень элементов и оформить в соответствии с требованиями ЕСКД.

12. Оформить пояснительную записку по стандарту СамУн - СТО СГАУ 02068410-004-2007 или ЕСКД.

2 Микросхемы аналого-цифровых преобразователей

Схемы подачи напряжений питания и внешних опорных напряжений на микросхемы некоторых аналого-цифровых преобразователей (АЦП или ADC) изображены на рис. 2.1, рис 2.2 и рис. 2.3.

Напряжение питания аналого-цифрового преобразователя могут быть установлены в широких пределах. Диапазон изменения входных напряжений определяет внешнее опорное напряжение V_{ref} . По каждому из четырех входов АЦП максимально допустимое напряжение $U_{INmax}=U_{INADCm}$. Линии связи, по которым измерительные сигналы аналоговых токов и напряжений передаются от источников сигналов к аналого-цифровому преобразователю, подвергаются воздействию высокочастотных помех с минимальной частотой в спектре несколько десятков килогерц (величина указана в задании). Для снижения погрешностей измерений необходимо между источником измерительного сигнала и микросхемой

аналого-цифрового преобразователя установить фильтр нижних частот с частотой среза превышающей максимальную частоту в спектре измерительного сигнала в полтора, и даже в два, раза.

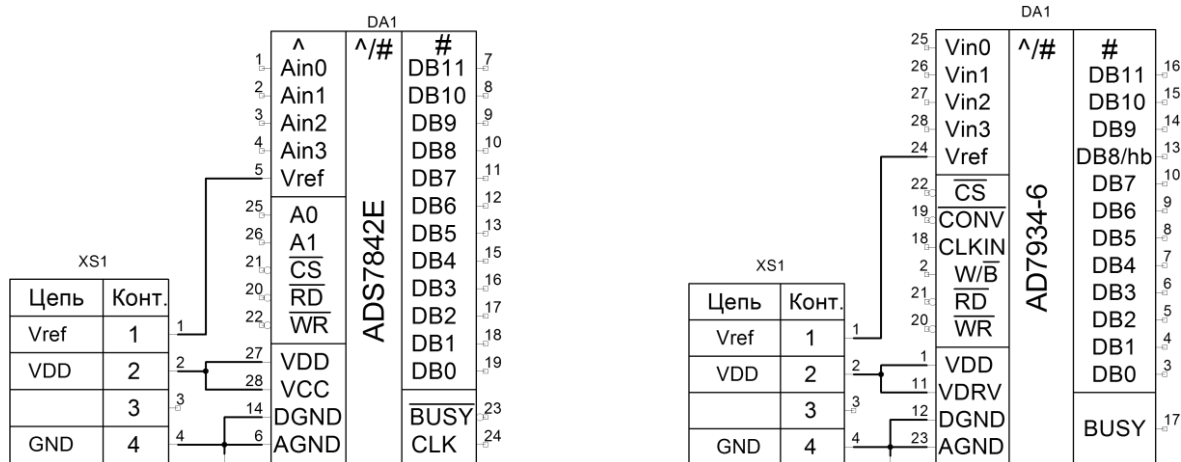


Рис. 2.1. Схемы подключения напряжений питания и опорных напряжений к ИМС ADS7842 и AD7934

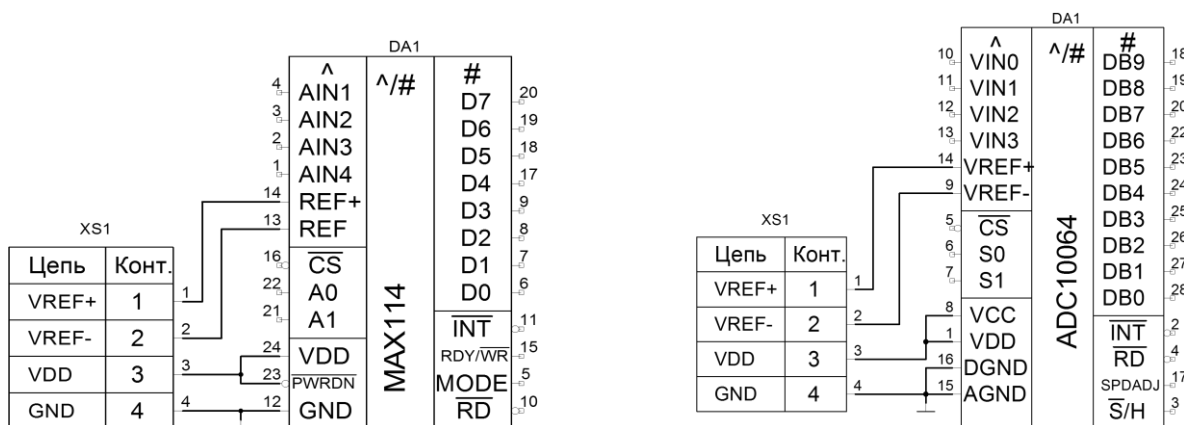


Рис. 2.2. Схемы подключения напряжений питания и опорных напряжений к ИМС MAX114 и ADC10064

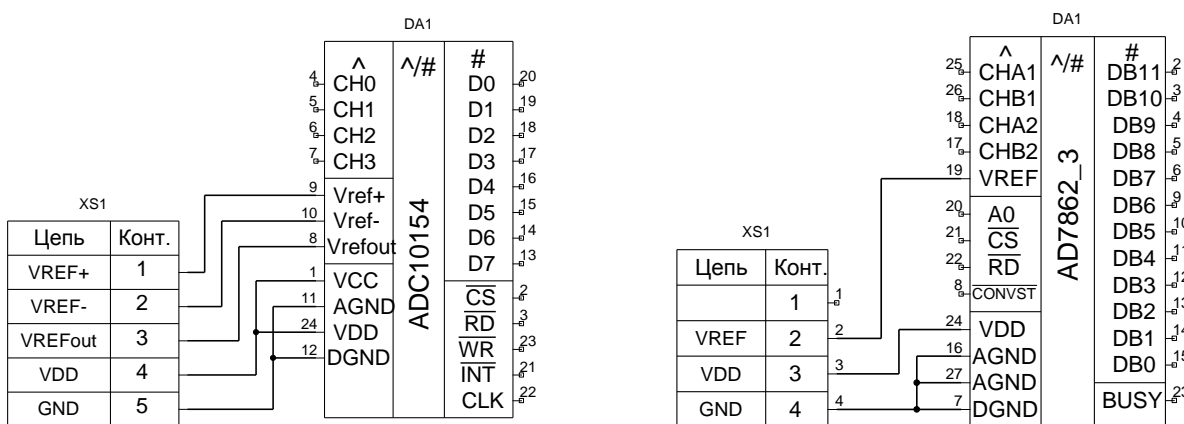


Рис. 2.3. Схемы подключения напряжений питания и опорных напряжений к ИМС ADC10154 и AD7862

3 Примеры заданий для проектирования системы ввода аналоговых сигналов в микросхему аналого-цифрового преобразователя

Примеры заданий на ввод сигналов тока и напряжений представлены в табл. 3.1. Источники сигналов – датчики с выходом постоянного (однонаправленного) тока, датчики с выходом постоянного (однополярного) напряжения и датчики с выходом переменного (разнополярного) напряжения. Входные сигналы микросхемы аналого-цифрового преобразователя положительные однополярные напряжения. Диапазон изменения входных напряжений аналого-цифрового преобразователя задаёт внешнее опорное напряжение V_{ref} .

Таблица 3.1

Пример задания на ввод сигналов тока и напряжений

Вариант №; тип АЦП; диапазон изменения U_{INADC}	Токи однонаправленные (постоянные)	Напряжения однополярные (постоянные)	Напряжения переменные (разнополярные)
1	2	3	4
№ 101; АЦП MAX114; U_{INADC} = от 0В до 1,25В	I_1 = от 0 мА до 270 мА; Верхняя частота в спектре сигнала 1 кГц.	U_{DC1} = от 0В до 17В; Верхняя частота в спектре сигнала 5,3 кГц.	Амплитуда U_{AC1m} = от 0мВ до 5,9 мВ; частота 330 Гц
	I_2 = от 0 мА до 1,4 мА; Верхняя частота в спектре сигнала 5 кГц; ВЧ помеха, нижняя ча- стота помехи 45 кГц.	U_{DC2} = от 0В до 1,9 В; Верхняя частота в спектре сигнала 4,73 кГц; ВЧ помеха, нижняя частота помехи 47 кГц.	Амплитуда U_{AC2m} = от 0В до 0,59 В; частота 470 Гц
		U_{DC3} = от 0В до 0,53 В; Верхняя частота в спектре сигнала 3,47 кГц;	Амплитуда U_{AC3m} = от 0В до 59 В; частота 60 Гц
		U_{DC4} = от 0мВ до 13мВ; Верхняя частота в спектре сигнала 2,47 кГц; ВЧ помеха, нижняя частота помехи 25 кГц.	

Для ввода сигнала тока I_1 необходимо по закону Ома определить величину сопротивления резистора и установить повторитель напряжения на

ИМС операционного усилителя. Для ввода сигнала тока I_2 требуется использовать фильтр нижних частот структуры Саллен-Ки с коэффициентом передачи равным 2 на нижней частоте. Для ввода сигнала напряжения U_{DC1} необходимо применить делитель напряжения и установить повторитель напряжения на ИМС операционного усилителя. Для ввода сигнала напряжения U_{DC2} необходимо установить делитель напряжения и использовать фильтр нижних частот структуры Саллен-Ки с коэффициентом передачи равным 2 на нижней частоте. Для ввода сигнала напряжения U_{DC3} можно использовать масштабный неинвертирующий операционный блок. Для ввода сигнала напряжения U_{DC4} требуется использовать две ступени фильтра нижних частот структуры Рауха. Для ввода сигнала U_{AC1} необходимо использовать инвертирующий суммирующий и масштабный операционные блоки. Для ввода сигналов U_{AC2} и U_{AC3} необходимо использовать неинвертирующий суммирующий операционный блок.

4 Проектирование схемы ввода сигнала однонаправленного тока I_1

Для максимального значения тока $I_{1m}=270\text{мА}$ находим по закону Ома величину сопротивления резистора, на котором будет падение напряжения U_{INADCm} .

$$R1 = U_{INADCm} / I_{1m} = 1,25\text{В} / 270\text{мА} = 4,63 \text{ Ом.} \quad (4.1)$$

Номинальное сопротивление резистора по ряду E96 [1] (Приложение А): $R1=4,64 \text{ Ом}$.

Схему на рис. 4.1 используем для ввода сигнала тока при отсутствии помех.

Операционный усилитель в схеме рис. 4.1 включён повторителем напряжения и позволяет получить выходное сопротивление схемы сопряжения малой величины. Это приводит к уменьшению погрешности при вводе аналоговых сигналов в микросхему аналого-цифрового преобразователя.

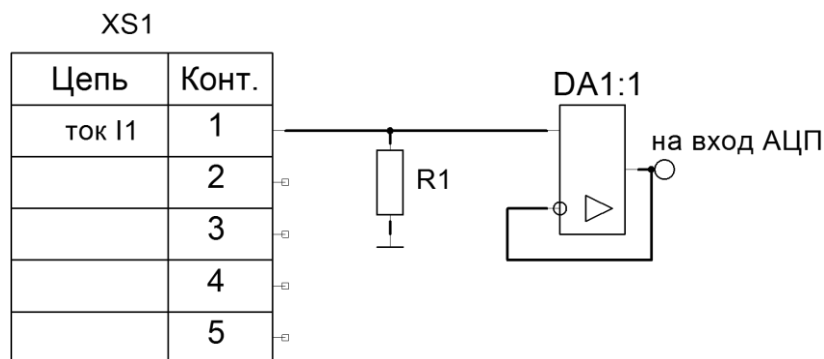


Рис. 4.1. Схема ввода сигнала однонаправленного тока I_1

На рис. 4.2 представлена схема моделирования в пакете Micro Cap 11.

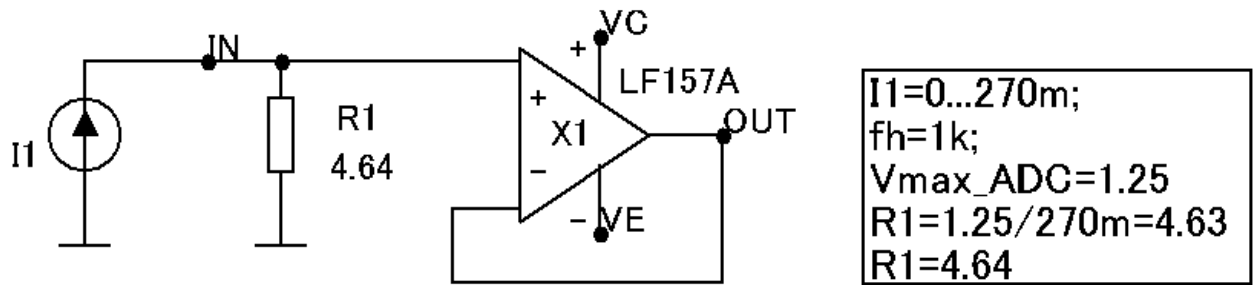


Рис. 4.2. Схема моделирования устройства ввода тока I1

Для проверки функционирования схемы модели используем источник однонаправленного тока, сигнал которого изменяется по закону:

$$I(t)=0,27/2+0,27/2*\sin(2*\pi*1k*t).$$

На рис. 4.3 представлена модель источника сигнала однонаправленного тока.

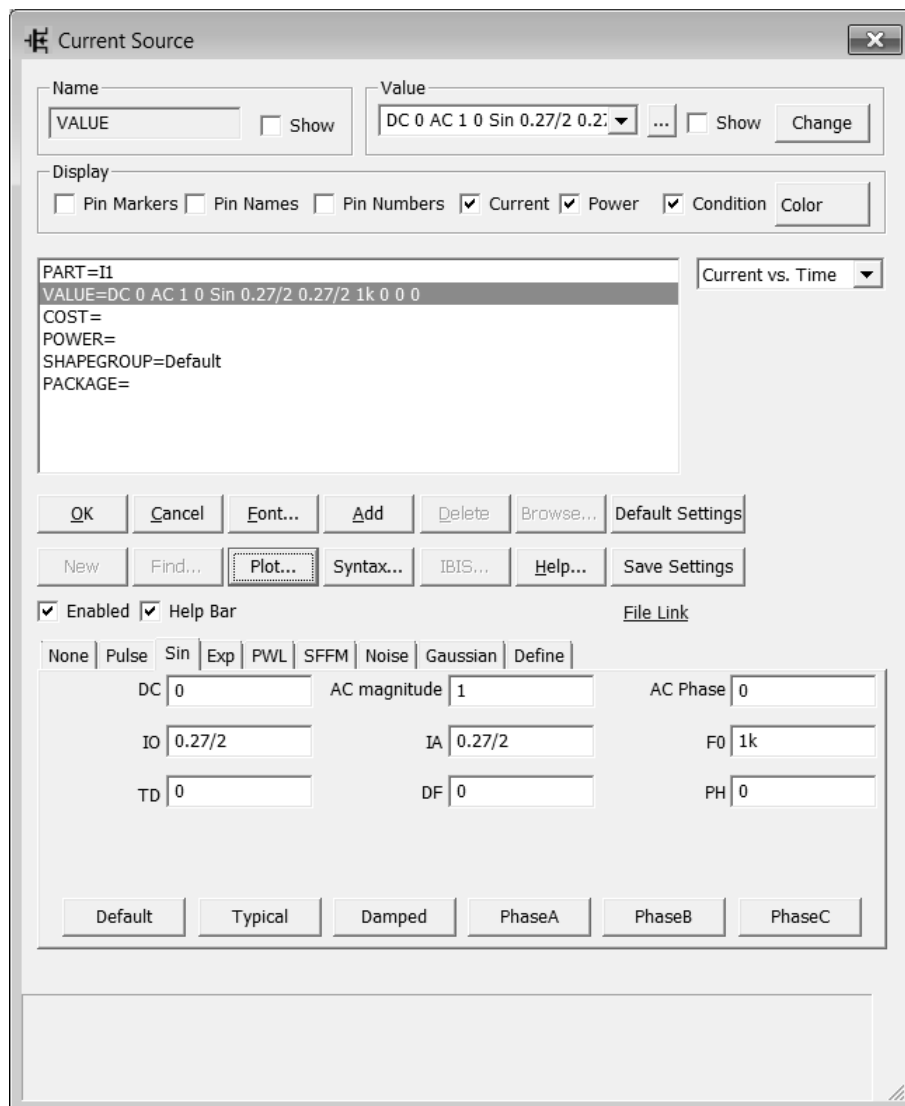


Рис. 4.3. Атрибуты модели источника однонаправленного тока I1

На рис. 4.4 изображены результаты моделирования во временной области.

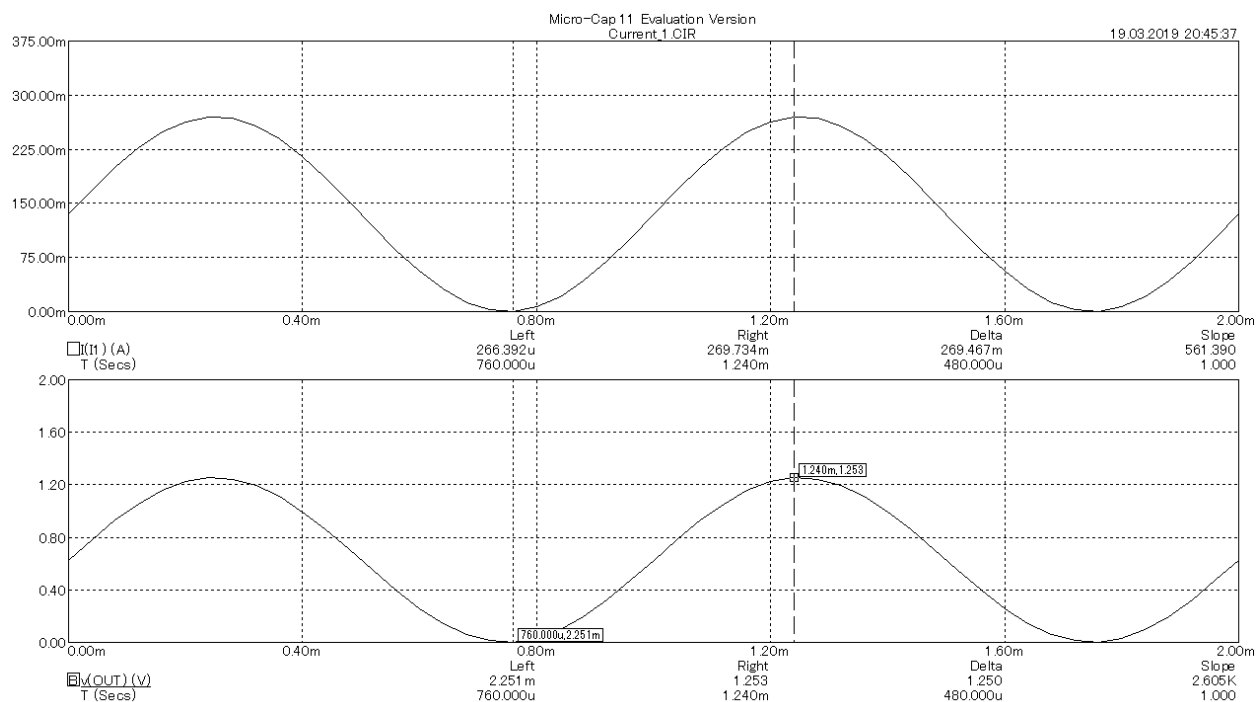


Рис. 4.4. Результаты моделирования во временной области (Transient)

Установленные курсоры подтверждают выполнение задания.

5 Проектирование схемы ввода сигнала однонаправленного тока I_2 при воздействии высокочастотных помех

Максимальное значение тока $I_{2m}=1,4$ мА. Верхняя частота в спектре сигнала тока $f_{max}=5$ кГц. Нижняя частота в спектре высокочастотной помехи (noise) $f_{n_min}=45$ кГц.

Необходимо использовать фильтр нижних частот. Выбираем фильтр нижних частот структуры Саллен-Ки второго порядка [1, 3, 4] – на неинвертирующем операционном блоке. Выбираем тип фильтра по подходу к аппроксимации АЧХ – фильтр Баттерворта. Для расчёта используются обобщённые коэффициенты [3]: $b=1,4142$; $c=1$.

Определяем сопротивление резистора R1, для преобразования тока в напряжение:

$$R1 = U_{INADCm} / I_{2m} = 1,25V / 1,4 \text{ мА} = 892,857 \text{ Ом}. \quad (5.1)$$

Величину сопротивления резистора возьмём в два раза меньше, чтобы коэффициент передачи фильтра нижних частот был равен $K_{LPF}=2$. Получаем:

$$R1 = 892,857 / 2 = 446,429 \text{ Ом}.$$

Выбираем номинальное сопротивление резистора по ряду E96 (Приложение А): $R1=442 \text{ Ом}$.

Коэффициент передачи фильтра нижних частот $K_{LPF}=2$. Такой коэффициент передачи обеспечит одна ступень фильтрации структуры Саллен-Ки второго порядка. Схема ввода сигнала тока при воздействии помех изображена на рис. 5.1.

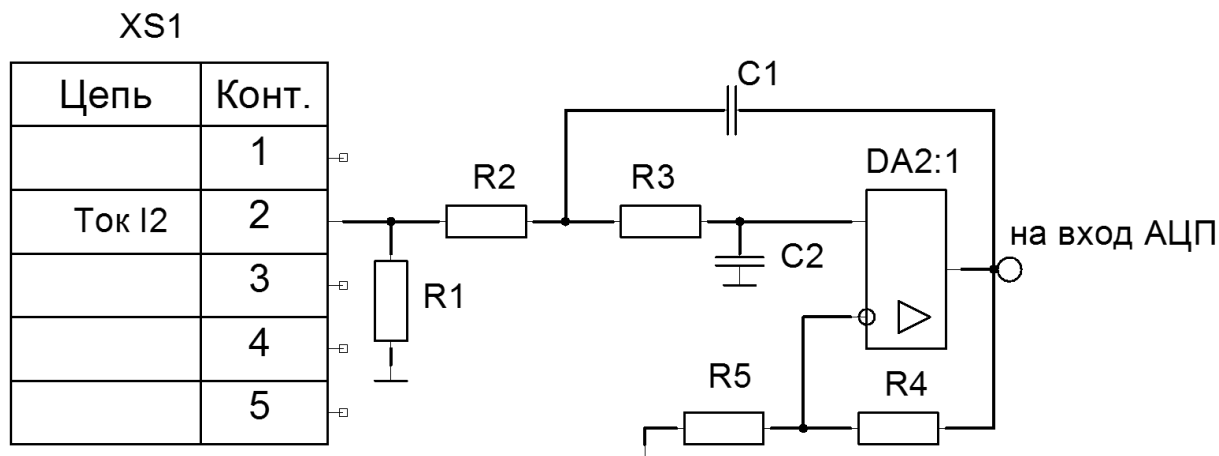


Рис. 5.1. Схема ввода сигнала однонаправленного тока I2 при воздействии помех

Определяем частоту среза фильтра нижних частот:

$$f_c = 2 * f_{\max} = 2 * 5 \text{ кГц} = 10 \text{ кГц}. \quad (5.2)$$

Расчёт номинальных значений резисторов и конденсаторов в схеме каждого звена ФНЧ Саллен-Ки выполняется по формализованным формулам [3]. В первую очередь вычисляется ёмкость конденсатора C1 по формуле:

$$C1 \approx \frac{10}{f_c [\text{kHz}]} [\text{nF}]. \quad (5.3)$$

$$C1 = 10 \text{ нФ} / 10 = 1 \text{ нФ}.$$

Номинальная ёмкость конденсатора C1 по ряду E24: $C1=1 \text{ нФ}$.

Вычисляется значение ёмкости конденсатора C2:

$$C2 < (K_{\text{ФНЧ}} - 1 + \frac{b_j^2}{4c_j}) C1. \quad (5.4)$$

$$C2 < (2 - 1 + 1.4142^2 / (4 * 1)) * 1 \text{ нФ} = 1,5 \text{ нФ}.$$

С учётом условия номинальная ёмкость конденсатора C2 по ряду E24: $C2=1,3 \text{ нФ}$.

Вычисляется значение сопротивления резистора R2 и выбирается ближайшее номинальное значение из ряда E96.

$$R2 = \frac{1}{(\pi f_c C1) \cdot \left(b_j + \sqrt{b_j^2 + 4c_j (K_{LPFj} - 1)} - 4c_j \frac{C2}{C1} \right)}. \quad (5.5)$$

Для вычисления воспользуемся калькулятором пакета схемотехнического моделирования Micro Cap 11 и запишем формулу в формате этого пакета.

$$R1 = 1 / (\pi * 10k * 1n) / (1.4142 + \sqrt{1.4142^2 + 4 * 1 * (2-1)} - 4 * 1 * 1.3n / 1n) = 13,788 \text{ кОм.}$$

По ряду E96 номинальное сопротивление резистора $R2 = 13,7 \text{ кОм.}$

Вычисляется значение сопротивления резистора R3 и выбирается ближайшее номинальное значение из ряда E96.

$$R3 = \frac{1}{c_j \cdot C1 \cdot C2 \cdot R2 \cdot (2 \cdot \pi \cdot f_c)^2} \quad (5.6)$$

Формула в формате калькулятора пакета схемотехнического моделирования MicroCap 11:

$$R3 = 1 / (1 * 1n * 1.3n * 13.7k * (2 * \pi * 10k)^2) = 14,223 \text{ кОм.}$$

По ряду E96 номинальное сопротивление резистора: $R3 = 14,3 \text{ кОм.}$

Формула для коэффициента передачи фильтра нижних частот:

$$K_{ФНЧ} = \frac{R4}{R5} + 1. \quad (5.7)$$

Для схемы на рис. 5.1 должно выполняться условие:

$$R2 + R3 = \frac{R4 \cdot R5}{R4 + R5}. \quad (5.8)$$

Из выражений (5.7) и (5.8) определим сопротивление резистора R4:

$$R4 = \frac{(R2 + R3) K_{ФНЧ}}{K_{ФНЧ} - 1} = (13.7k + 14.4k) * 2 / (2 - 1) = 56,2 \text{ кОм.} \quad (5.9)$$

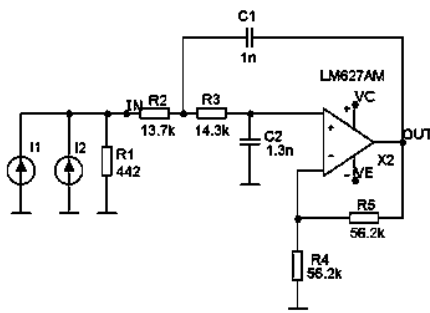
По ряду E96 номинальное сопротивление резисторов: $R4 = R5 = 56,2 \text{ кОм.}$

На рис. 5.2 изображена схема моделирования в пакете Micro Cap 11 и расчёты номинальных значений сопротивлений резисторов и ёмкостей конденсаторов.

Сигнал однонаправленного тока изменяется по закону:

$$I1(t) = 0,0014 / 2 + 0,0014 * \sin(2 * \pi * 5k * t) / 2.$$

Модель источника сигнала однонаправленного тока представлена на рис. 5.3. Источник тока I2 имитирует высокочастотную помеху. На рис. 5.4 представлена модель источника высокочастотной помехи. Атрибут "Interval" определяет интервал времени между значениями случайной помехи. Атрибут "End-Time" задаёт окончание интервала формирования случайной помехи.



$I2_{max}=1.4m$;
 $f_{max}=5k$;
 $f_{n_min}=45k$;
 Butterwort; $b=1.4142$; $c=1$;
 $U_{in_adcm}=1.25$;
 $R1=U_{in_adcm}/I2_{max}=1.25/1.4m=892.857$;
 $K_{lpf}=2$;
 $R1=892.857/2=446.429$;
 $R1=442$;
 $f_c=2*f_{max}=2*5k=10k$;
 $C1=10/f_c=10n/10=1n$;
 $C2 < (K_{lpf}-1+b*b/(4*c))*C1=(2-1+1.4142^2/(4*1))*1n=1.5n$;
 $C2=1.3n$;
 $R2=1/(PI*f_c*C1)/(b+sqrt(b*b+4*c*(K_{lpf}-1)-4*c*C2/C1))=$
 $=1/(PI*10k*1n)/(1.4142+sqrt(1.4142^2+4*1*(2-1)-4*1*1.3n/1n))=13.788K$;
 $R2=13.7k$;
 $R3=1/(c*C1*C2*R2*(2*PI*f_c)^2)=1/(1*1n*1.3n*13.7K*(2*PI*10k)^2)=14.223K$;
 $R3=14.3k$;
 $R4=R5=(R2+R3)*K_{lpf}/(K_{lpf}-1)=(13.7k+14.3k)*2/(2-1)=56K$;
 $R3=R4=56.2k$;

Рис. 5.2. Схема моделирования устройства ввода тока I2

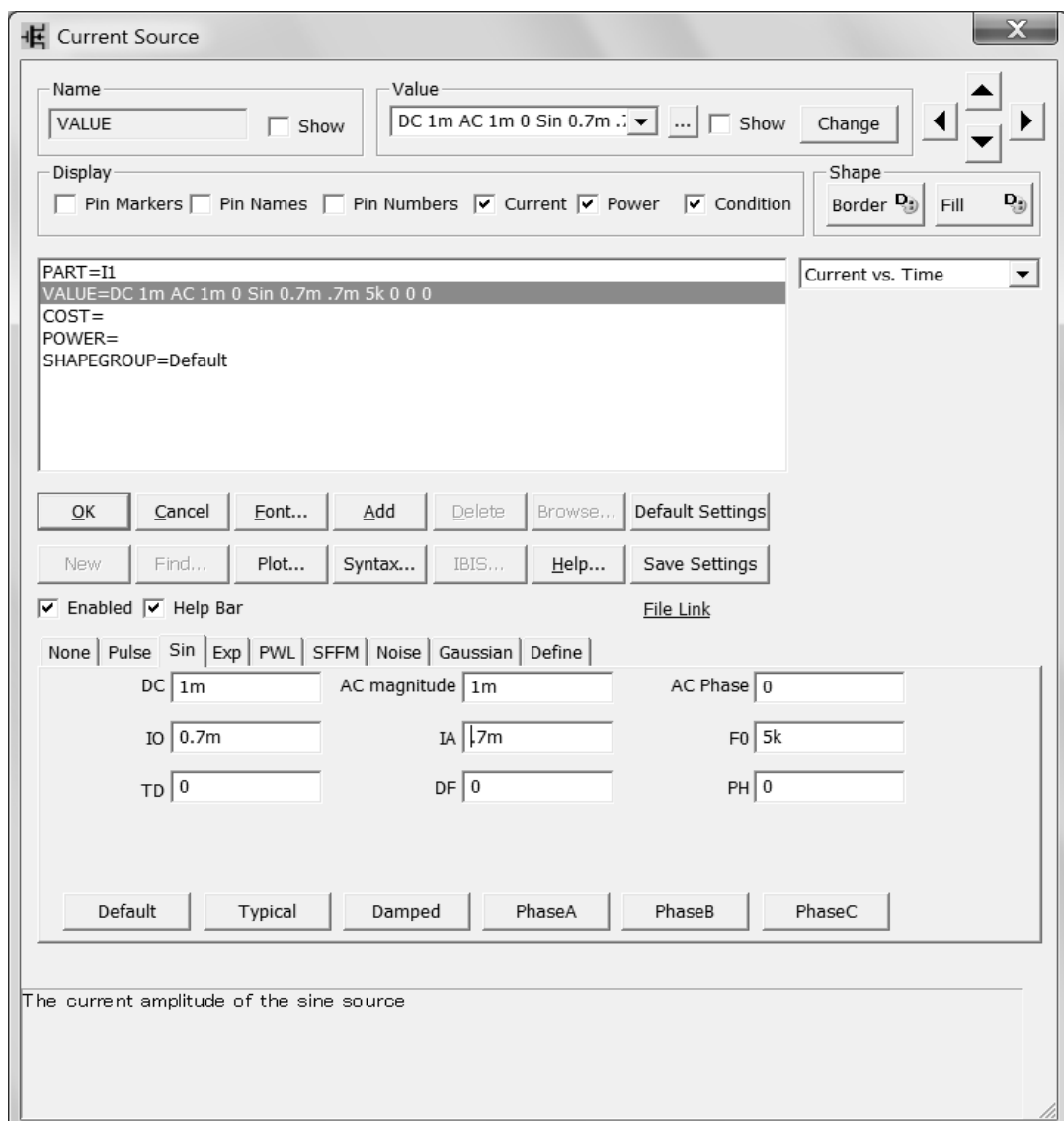


Рис. 5.3. Атрибуты модели источника сигнала тока I2

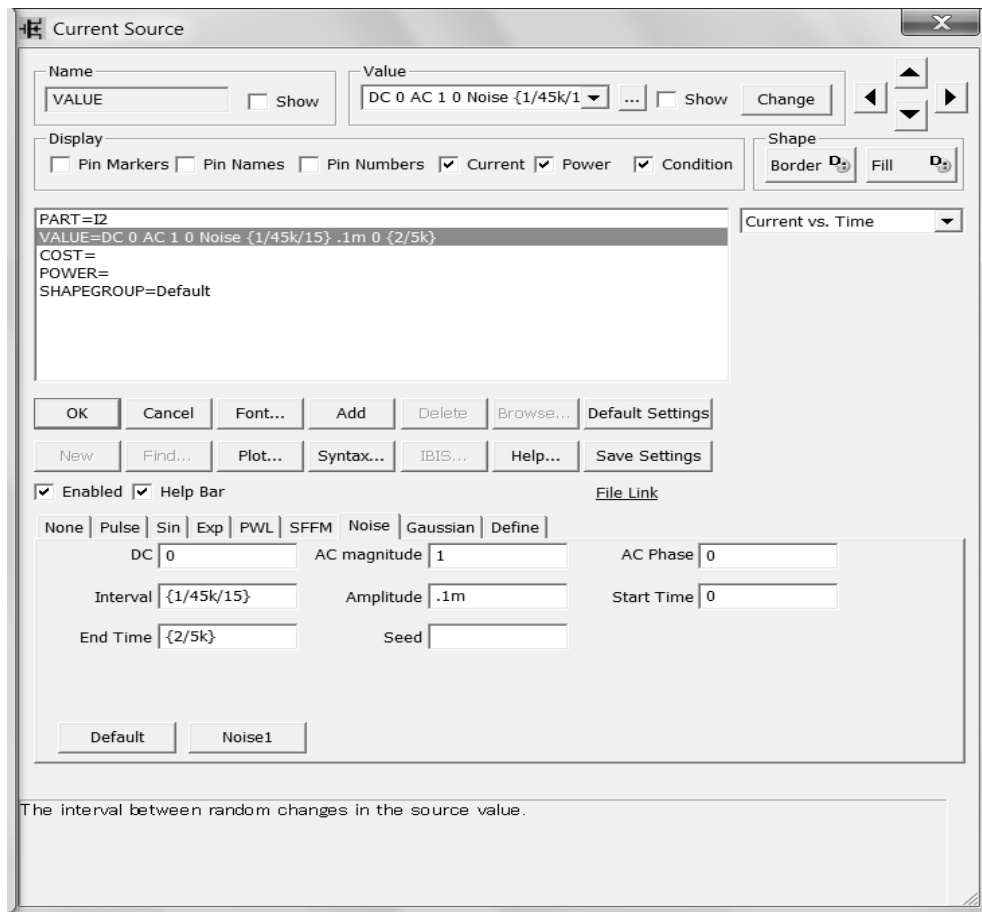


Рис. 5.4. Атрибуты модели источника высокочастотной помехи тока

На рис. 5.5 представлены результаты моделирования в частотной области.

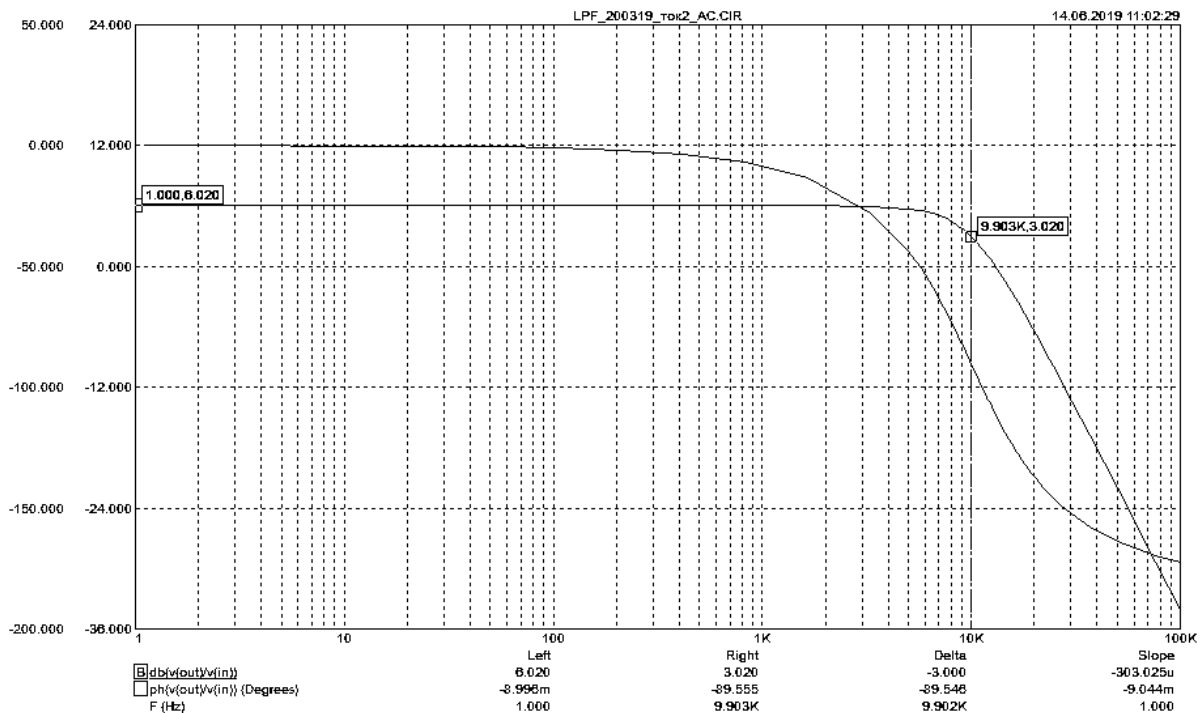


Рис. 5.5. Результаты моделирования в частотной области (AC)

Курсоры установлены на начало частотного диапазона и на частоту среза $f_c=9,903\text{кГц}$. Частота среза заданная и полученная при моделировании отличаются на сотые доли килогерц.

На рис. 5.6 представлены результаты моделирования во временной области. На временных диаграммах изображён входной ток, содержащий помехи и выходное напряжение системы ввода после фильтра второго порядка без помех.

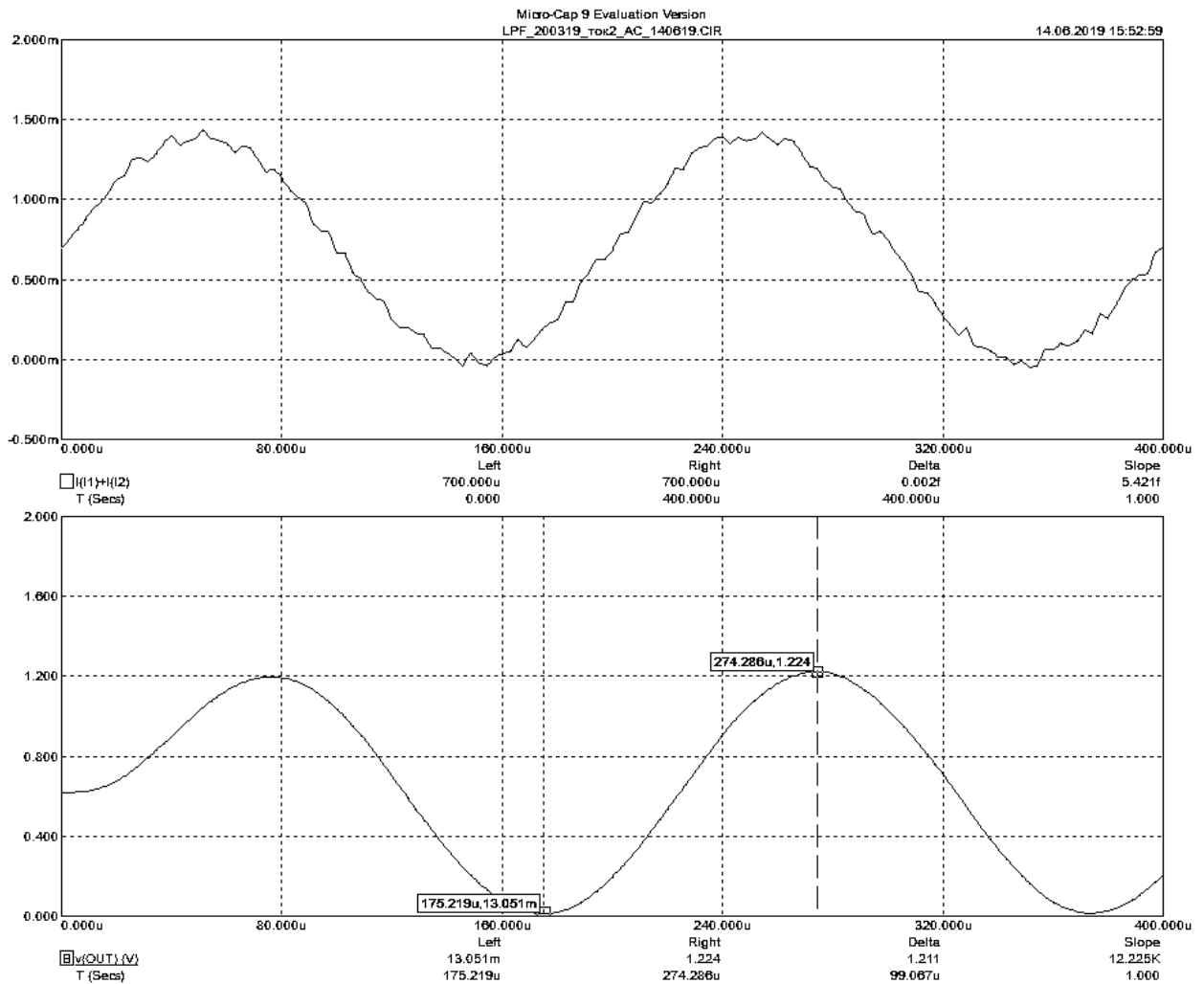


Рис. 5.6. Результаты моделирования во временной области (Transient)

6 Проектирование схемы ввода сигнала однополярного напряжения U_{DC1}

Максимальное значение напряжения $U_{DC1m}=17\text{В}$. Верхняя частота в спектре сигнала 5,3 кГц. Для ввода напряжения U_{DC1m} превышающего напряжение U_{INADCm} необходимо использовать делитель напряжения. Задаём ток делителя напряжения равным 1мА. Вычислим полное сопротивление:

$$R_{DIV}=R1+R2= U_{DC1m}/1\text{mA}=17\text{В}/0,001\text{А}=17 \text{ кОм}. \quad (6.1)$$

Вычислим коэффициент передачи схемы резисторного делителя:

$$K_{DIV} = U_{INADCm} / U_{DC1m} = 1,25V / 17V = 0,0735. \quad (6.2)$$

Сопротивление резистора R2 в нижнем плече резисторного делителя:

$$R2 = R_{DIV} * K_{DIV} = 17k\Omega * 0,0735 = 1,2495 k\Omega. \quad (6.3)$$

По ряду E96 сопротивление резистора R2=1,24 kΩ.

Сопротивление резистора R1:

$$R1 = R_{DIV} - R2 = 17 k\Omega - 1,24 k\Omega = 15,76 k\Omega. \quad (6.4)$$

По ряду E96 сопротивление резистора R1=15,8 kΩ.

На рис. 6.1 представлена схема ввода однополярного напряжения [1].

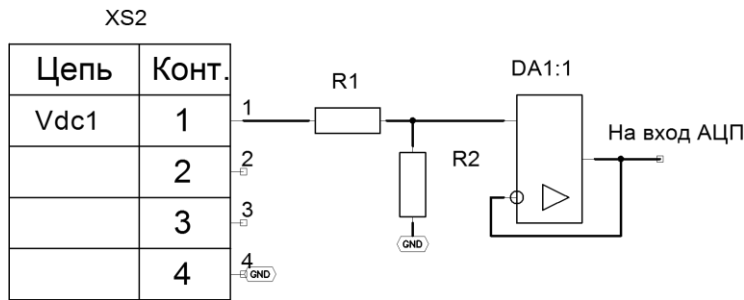


Рис. 6.1. Схема ввода однополярного напряжения U_{DC1}

На рис. 6.2 изображена схема моделирования ввода напряжения.

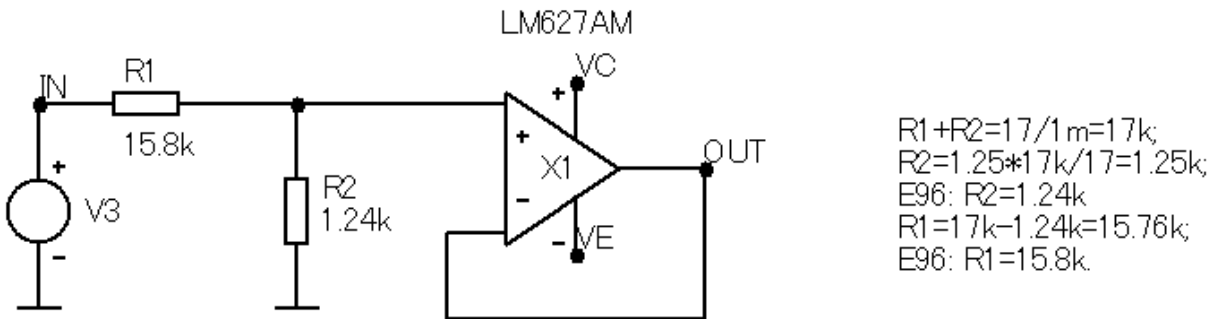


Рис. 6.2. Схема моделирования ввода однополярного напряжения U_{DC1}

В схеме моделирования сигнал источника напряжения V3 изменяется по закону:

$$V3(t) = 17/2 + 17 * \sin(2 * \pi * 5,3k * t) / 2. \quad (6.5)$$

На рис. 6.3 представлены результаты моделирования во временной области ввода однополярного напряжения по схеме рис. 6.2. Курсоры на рис. 6.3 подтверждают изменение напряжения на выходе схемы в пределах от 1,77мВ до 1,233В.

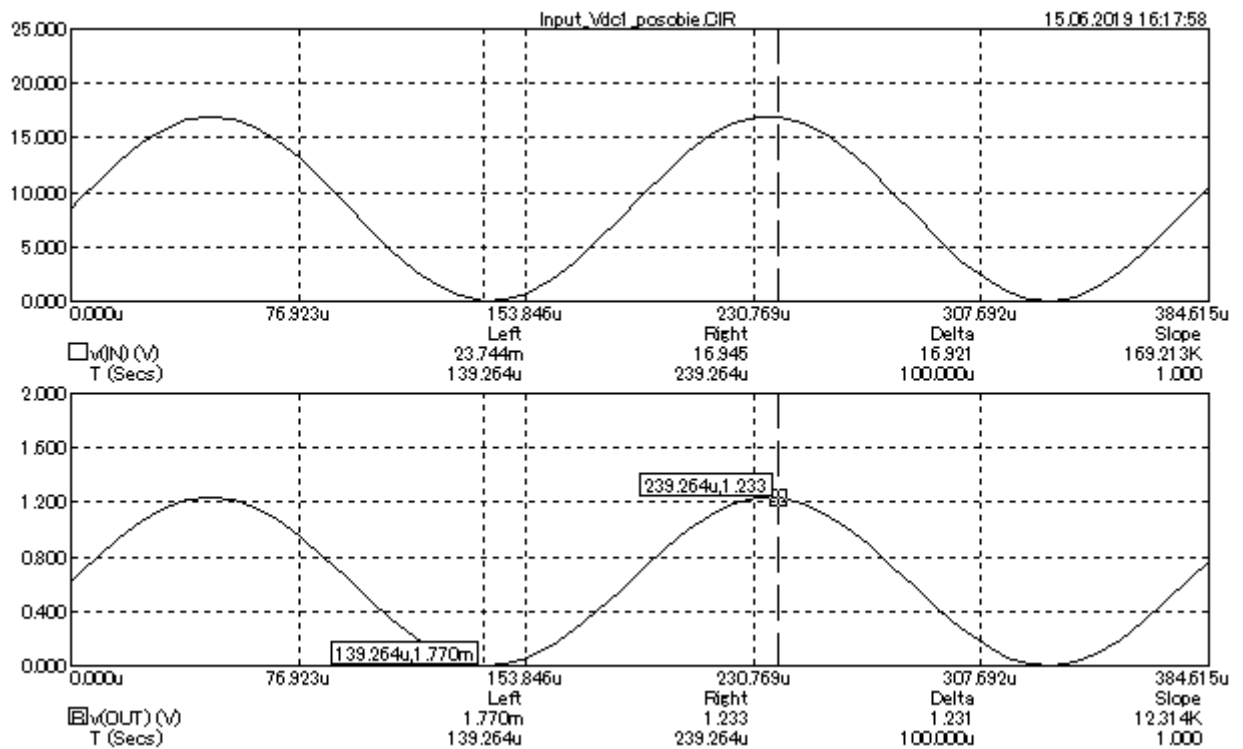


Рис. 6.3. Результаты моделирования ввода однополярного напряжения U_{DC1}

7 Проектирование схемы ввода сигнала однополярного напряжения U_{DC2} с высокочастотной помехой

Пределы изменения однополярного напряжения U_{DC2} от 0В до 1,9В. Верхняя частота в спектре сигнала 4,73 кГц. На сигнал воздействует высокочастотная помеха, нижняя частота в спектре помехи 47 кГц. Необходимо выполнить деление входного напряжения и частотную фильтрацию (рис. 7.1). Коэффициент передачи фильтра нижних частот $K_{LPF}=2$. Такой коэффициент передачи обеспечит одна ступень фильтрации структуры Саллен-Ки второго порядка. Схема ввода сигнала однополярного напряжения при воздействии помех изображена на рис. 7.1.

Для получения коэффициента передачи фильтра равного двум $K_{LPF}=2$ необходимо выполнение условия:

$$U_{DC2m} * K_{LPF} * K_{DIV} = U_{INADCm}. \quad (7.1)$$

Получим коэффициент передачи делителя:

$$K_{DIV} = U_{INADCm} / (U_{DC2m} * K_{LPF}) = 1,25В / 1,9В / 2 = 0,329. \quad (7.2)$$

Задаём ток делителя напряжения равный $I_{DIV}=1mA$. Величина суммарного сопротивления делителя напряжения:

$$R_{DIV} = R1 + R2 = 1,9В / 1mA = 1,9кОм. \quad (7.3)$$

Сопротивление нижнего резистора делителя $R2$:

$$R2 = R_{DIV} * K_{DIV} = 1,9 \text{кОм} * 0,329 = 625,1 \text{Ом}. \quad (7.4)$$

Номинальное сопротивление резистора R2 по ряду E96: R2=634Ом.

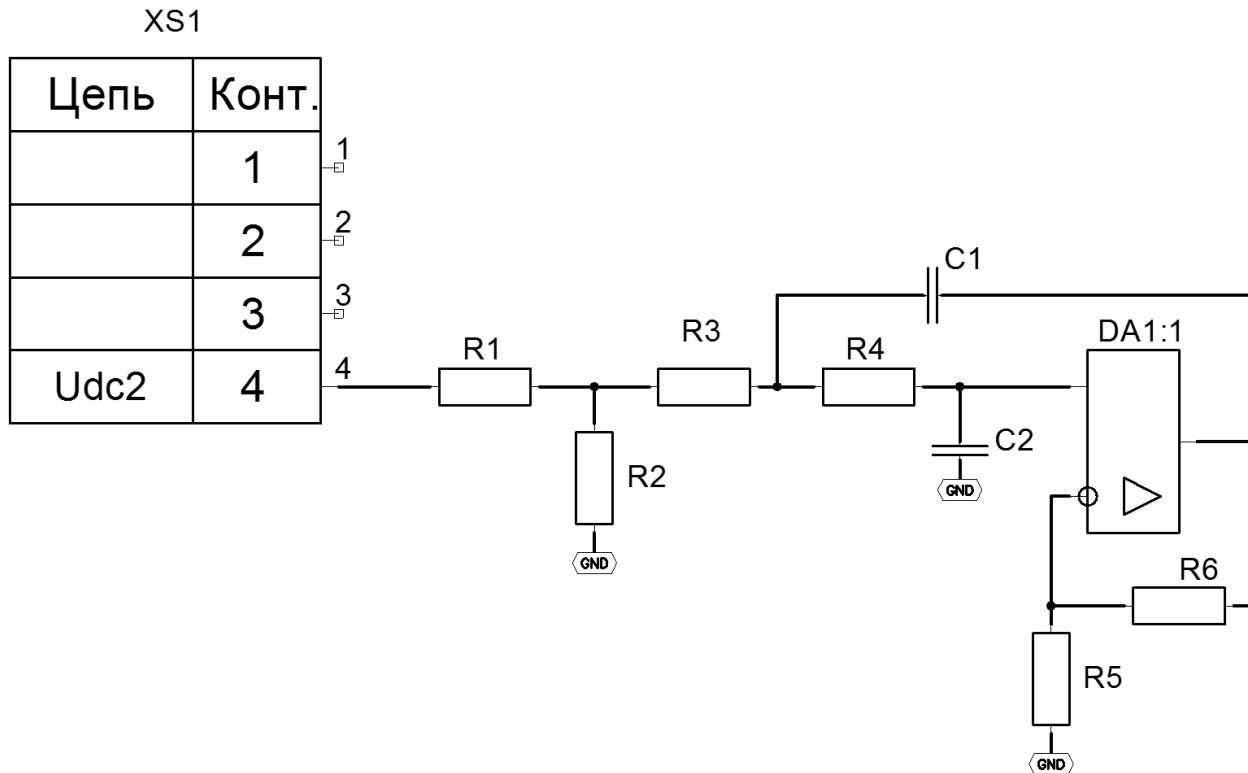


Рис. 7.1. Схема ввода однополярного напряжения с помехой U_{DC2}

Сопротивление резистора R1:

$$R1 = R_{DIV} - R2 = 1,9 \text{кОм} - 634 \text{Ом} = 1,266 \text{кОм}. \quad (7.5)$$

Номинальное сопротивление резистора R1 по ряду E96: R1=1,27кОм

Определяем частоту среза фильтра нижних частот:

$$f_c = 2 * f_{max} = 2 * 4,73 \text{кГц} = 9,46 \text{кГц}. \quad (7.6)$$

Расчёт номинальных значений резисторов и конденсаторов в схеме каждого звена ФНЧ Саллен-Ки выполняется по формализованным формулам [3]. Для расчёта используются обобщённые коэффициенты [3]: $b=1,4142$; $c=1$. Схема моделирования в пакете Micro Cap 11 изображена на рис. 7.2.

В первую очередь вычисляется ёмкость конденсатора C1 по формуле:

$$C1 = \frac{10}{f_c [\text{kHz}]} [\text{nF}] = 10 \text{нФ} / 9,46 = 1,057 \text{нФ}. \quad (7.7)$$

Номинальное значение ёмкости конденсатора C1 по ряду E24: C1=1нФ.

Вычисляется значение ёмкости конденсатора C2:

$$C2 < (K_{LPF} - 1 + b^2 / (4c)) C1. \quad (7.8)$$

$$C2 < (2 - 1 + 1,4142^2 / (4 * 1)) * 1 \text{ нФ} = 1,5 \text{ нФ}.$$

С учётом условия номинальная ёмкость конденсатора C2 по ряду E24: C2=1,3 нФ.

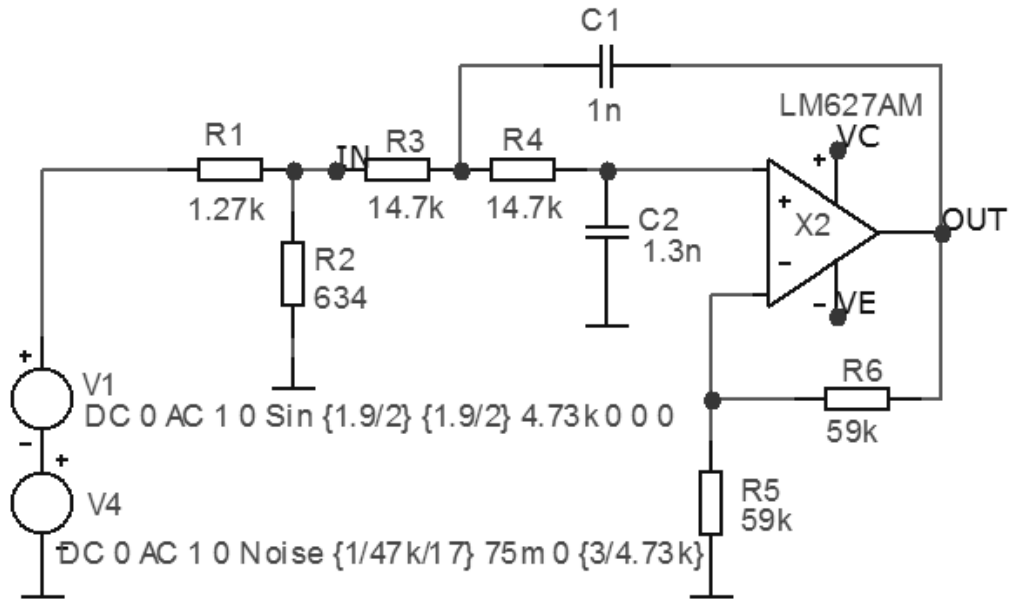


Рис. 7.2. Схема моделирования ввода напряжения U_{DC2} с помехой

Вычисляется значение сопротивления резистора R3 и выбирается ближайшее номинальное значение из ряда E96.

$$R3 = \frac{1}{(\pi f_c C1) \cdot \left(b_j + \sqrt{b_j^2 + 4c_j (K_{LPEj} - 1)} - 4c_j \frac{C2}{C1} \right)}. \quad (7.9)$$

Для вычисления воспользуемся калькулятором пакета схемотехнического моделирования MicroCap 11 и запишем формулу в формате этого пакета.

$$R3 = 1 / (\pi * 9.46k * 1n) / (1.4142 + \text{sqrt}(1.4142^2 + 4 * 1 * (2 - 1) - 4 * 1 * 1.3n / 1n)) = 14.58 \text{ кОм}.$$

По ряду E96 номинальное сопротивление резистора R3=14,7 кОм.

Вычисляется значение сопротивления резистора R4 и выбирается ближайшее номинальное значение из ряда E96.

$$R4 = \frac{1}{c_j \cdot C1 \cdot C2 \cdot R3 \cdot (2 \cdot \pi \cdot f_c)^2}. \quad (7.10)$$

Формула в формате калькулятора пакета схемотехнического моделирования Micro Cap 11:

$$R4 = 1 / (1 * 1n * 1.3n * 14.7k * (2 * \pi * 9.46k)^2) = 14.81 \text{ кОм}.$$

По ряду E96 номинальное сопротивление резистора: R4=14,7 кОм.

Формула для коэффициента передачи фильтра нижних частот:

$$K_{LPF} = \frac{R6}{R5} + 1. \quad (7.11)$$

Для схемы на рис. 7.2 должно выполняться условие:

$$R3 + R4 = \frac{R5 \cdot R6}{R5 + R6} \quad (7.12)$$

Из выражений (7.11) и (7.12) определим сопротивление резистора R5:

$$R5 = \frac{(R3 + R4) K_{ФНЧ}}{K_{ФНЧ} - 1} = (14.7k + 14.7k) \cdot 2 / (2 - 1) = 58.8 \text{ кОм}. \quad (7.13)$$

По ряду E96 номинальное сопротивление резисторов: R6=R5=59 кОм.

На рис. 7.3 представлены расчёты номинальных значений сопротивлений резисторов и ёмкостей конденсаторов в схеме моделирования.

```

Udc2max=1.9
fmax=4,73k;
fn_min=47k;
Butterwort; b=1.4142; c=1;
Uin_adcm=1.25;
Idiv=1m;
Rdiv=R1+R2=Udc2max/Idiv=1.9/1m=1.9k
R2=(R1+R2)*Uin_adcm/Udc2m/2=1.9k*1.25/2/1.9=625;
E96: R2=634;
R1=Rdiv-R2=1.9k-634=1.27K
E96: R1=1.27k;
Klpf=2;
fc=2*fmax=4,73k*2=9.46k;
C1=10/fc=10n/9.46=1.06n;
E24: C1=1n;
C2<(Klpf-1+b*b/(4*c))*C1=(2-1+1.4142^2/(4*1))* 1n=1.5n;
C2=1.3n;
R3=1/(PI*fc*C1)/(b+sqrt(b*b+4*c*(Klpf-1)-4*c*C2/C1))=
=1/(PI*9.46k*1n)/(1.4142+sqrt(1.4142^2+4*1*(2-1)-4*1*1.3n/1n))=14.58K;
E96: R3=14.7k;
R4=1/(c*C1*C2*R2*(2*PI*fc)^2)=
=1/(1*1n*1.3n*14.7K*(2*PI*9.46k)^2)=14.81K;
E96: R4=14.7k;
R6=R5=(R3+R4)*Klpf/(Klpf-1)=(14.7k+14.7k)*2/(2-1)=58.8K;
E96: R5=R6=59k;

```

Рис. 7.3. Расчёты номинальных значений сопротивлений резисторов и ёмкостей конденсаторов в схеме моделирования

На рис. 7.4 изображены результаты моделирования в частотной области. Курсор установлен на частоту среза $f_c = 9,557 \text{ кГц}$.

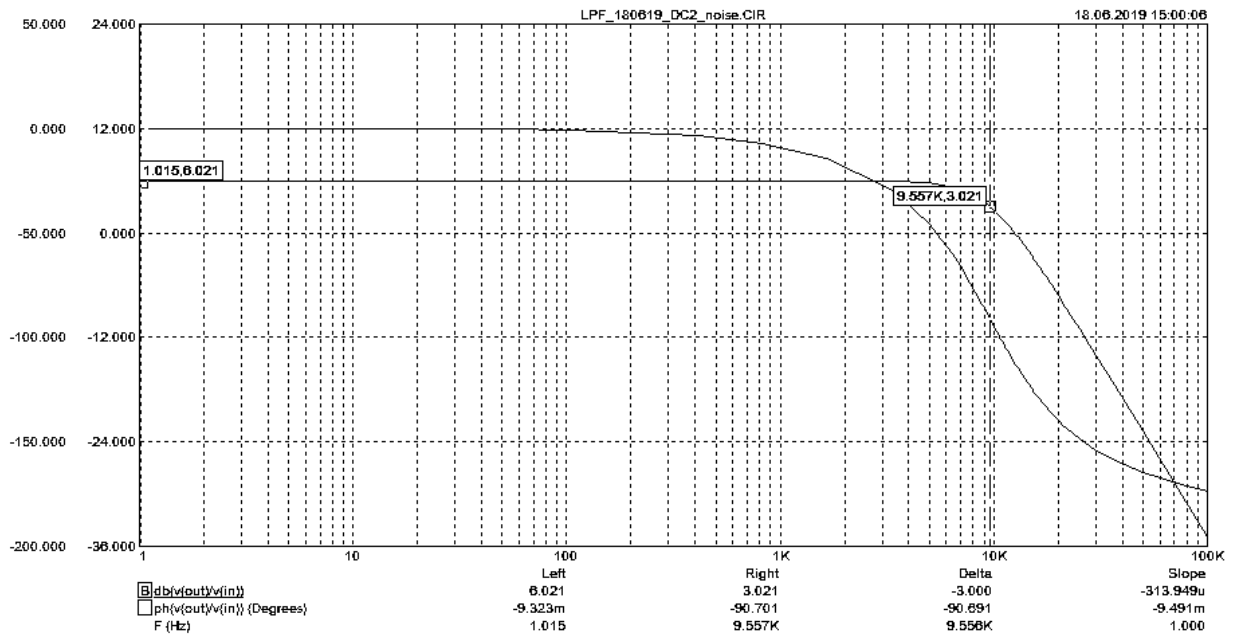


Рис. 7.4. Результаты моделирования в частотной области

Частота среза фильтра, полученная в результате моделирования, отличается от расчётного значения менее чем на 1%.

Для проверки функционирования схемы моделирования системы ввода аналогового напряжения, в источнике напряжения V1 требуется сформировать сигнал напряжения изменяющийся от нуля до максимального значения на максимальной частоте в спектре сигнала:

$$U_{DC2} = 1,9/2 + 1,9 * \sin(2 * \pi * 4,73K * t) / 2. \quad (7.14)$$

Для имитации высокочастотной помехи используется источник напряжения V4. На рис. 7.5 представлена модель источника напряжения V4 с заданными атрибутами модели высокочастотной помехи. Атрибут "Interval" определяет интервал времени между соседними случайными значениями помехи. Атрибут "EndTime" определяет окончание интервала формирования случайных значений помехи.

На рис. 7.6 представлены результаты моделирования во временной области. Курсоры установлены на максимум сигнала $U_{DC2} = 1,252V$ и на минимальное значение $U_{DC2} = 15,487$ милливольт. Отличие от теоретических значений составляет менее 1%.

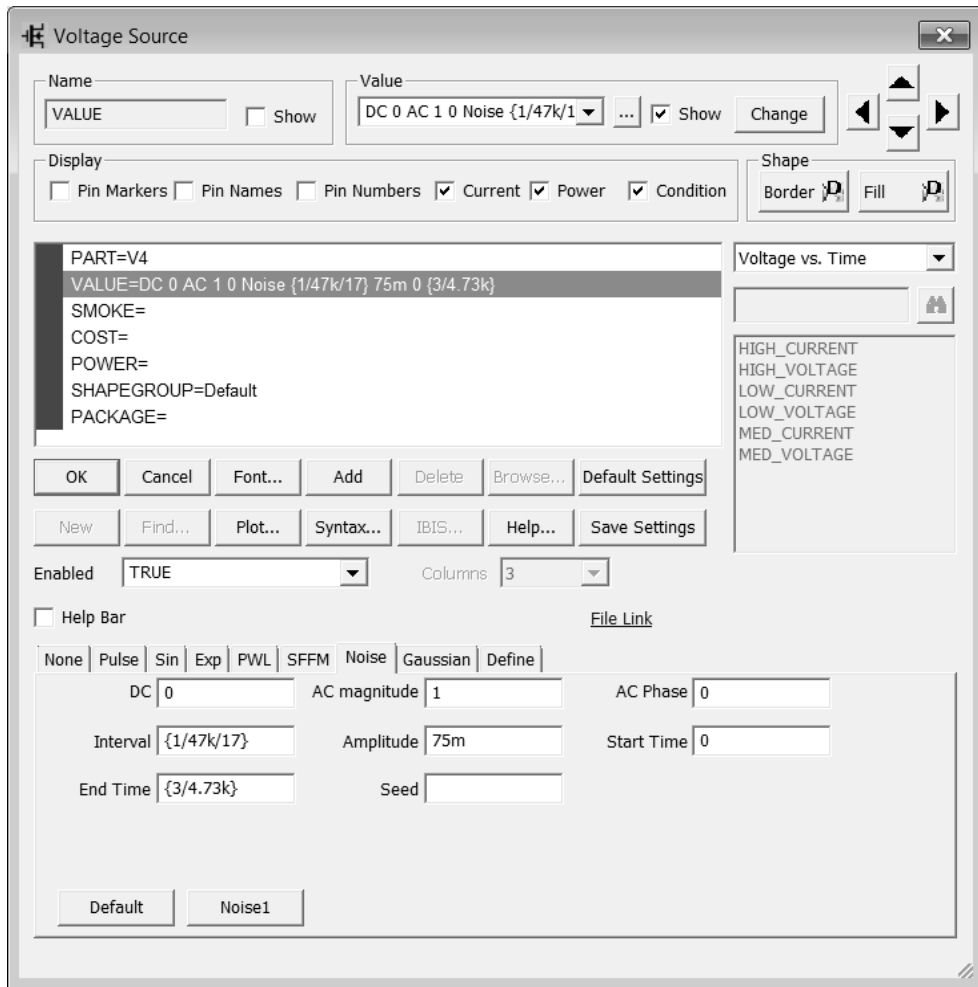


Рис. 7.5. Атрибуты модели высокочастотной помехи

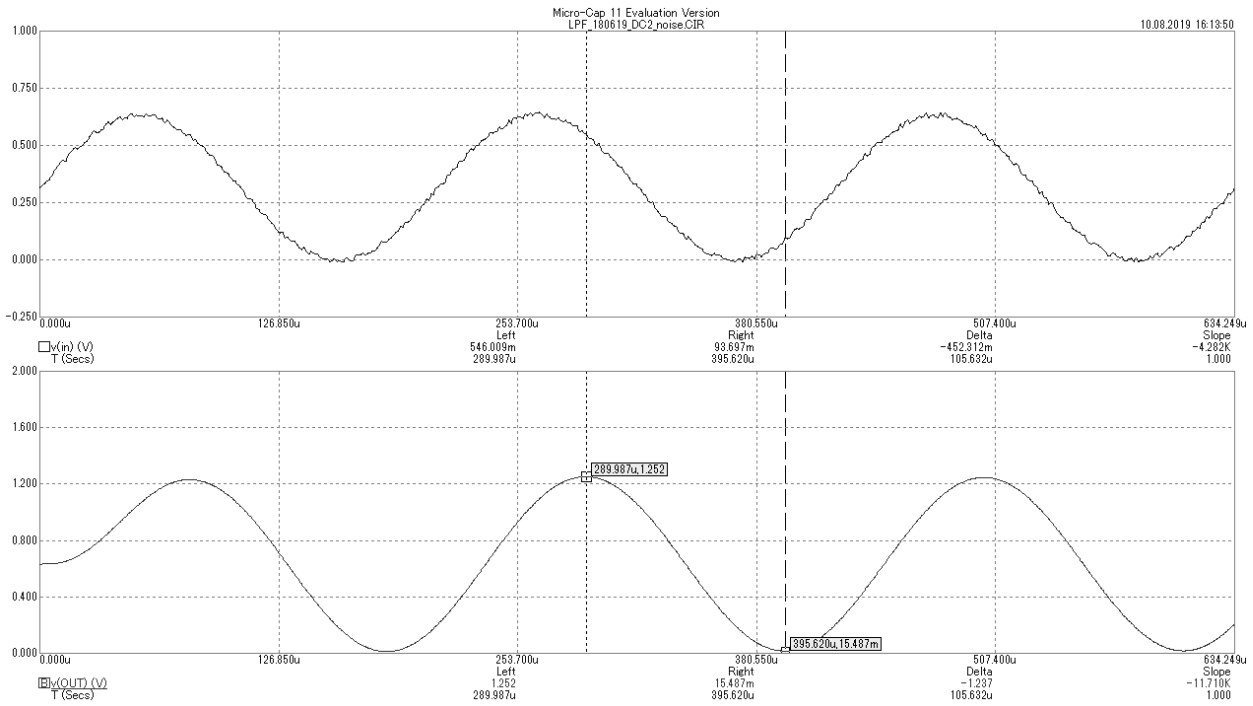


Рис. 7.6. Результаты моделирования во временной области

8 Проектирование схемы ввода сигнала однополярного напряжения U_{DC3}

Пределы изменения напряжения U_{DC3} от 0В до 0,53 В. Верхняя частота в спектре сигнала 3,47 кГц. Требуемый коэффициент передачи

$$K3 = U_{INADCm} / U_{DC3m} = 1,25 / 0,53 = 2,358.$$

Необходимо использовать неинвертирующий масштабный операционный блок [1]. Схема ввода напряжения U_{DC3} изображена на рис. 8.1

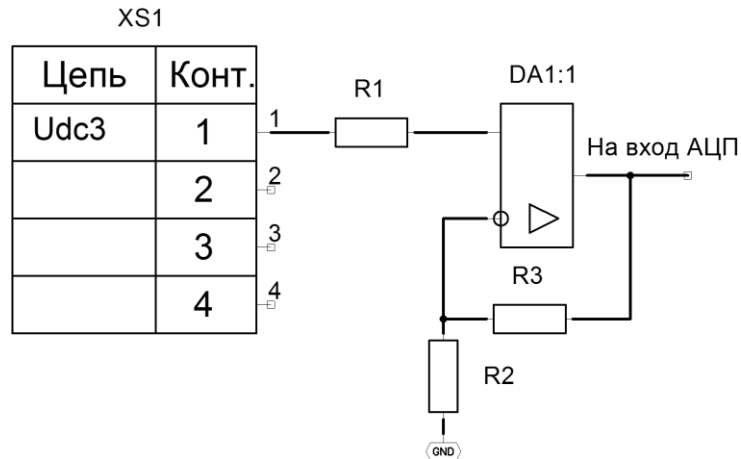


Рис. 8.1. Схема ввода напряжения U_{DC3}

Задаём номинальное значение сопротивления резистора $R2 = 20 \text{ кОм}$. Сопротивление резистора $R3$ вычислим:

$$R3 = R2 * (K3 - 1) = 20 \text{ кОм} * (2,358 - 1) = 27,16 \text{ кОм}.$$

По ряду E96 сопротивление резистора $R3 = 27,4 \text{ кОм}$.

Сопротивление резистора $R1$ вычисляется по формуле:

$$R1 = R2 * R3 / (R2 + R3) = 20 \text{ кОм} * 27,4 \text{ кОм} / (20 \text{ кОм} + 27,4 \text{ кОм}) = 11,56 \text{ кОм}.$$

По ряду E96 сопротивление резистора $R1 = 11,5 \text{ кОм}$.

На рис. 8.2 представлена схема моделирования ввода напряжения U_{DC3} .

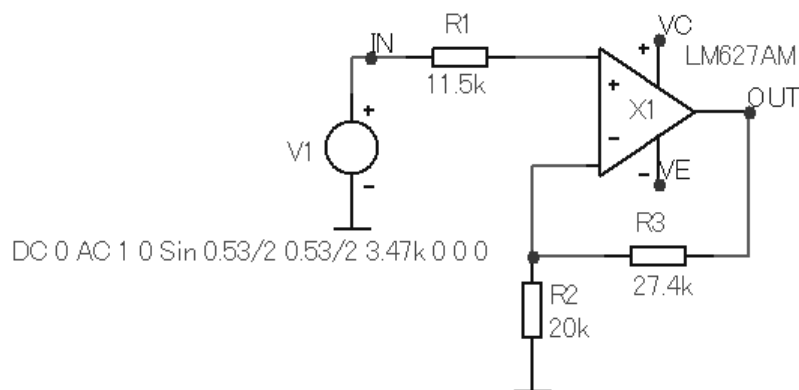


Рис. 8.2. Схема моделирования ввода напряжения U_{DC3}

На рис. 8.3 изображены результаты моделирования во временной области.

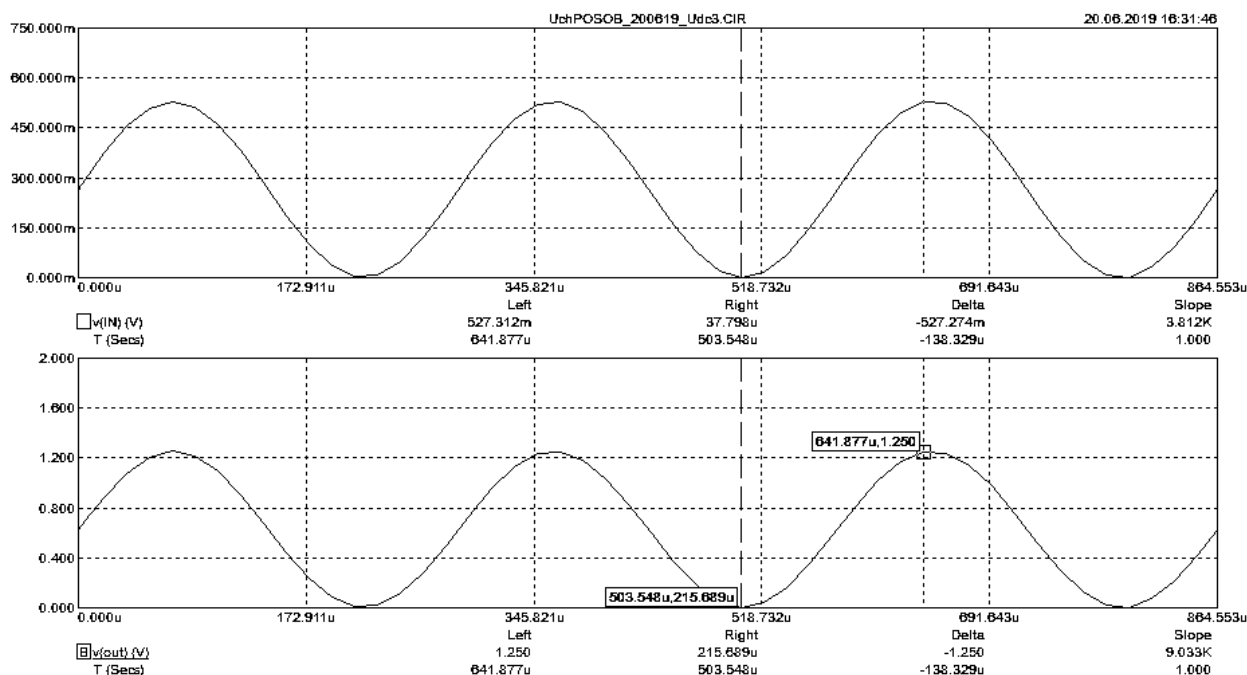


Рис. 8.3. Результаты моделирования во временной области

9 Проектирование схемы ввода сигнала однополярного напряжения U_{DC4} при воздействии высокочастотных помех

Максимальная величина напряжения $U_{DC4m}=13$ мВ. Верхняя частота в спектре напряжения $f_{max}=2,47$ кГц. Нижняя частота в спектре высокочастотной помехи (noise) $f_{n_min}=25$ кГц.

Определим коэффициент передачи фильтра нижних частот:

$$K_{LPF}=U_{INADCm}/U_{DC4m}=1,25 \text{ В}/13 \text{ мВ}=96,15. \quad (9.1)$$

Требуется использовать две ступени фильтрации каждая с коэффициентами передачи:

$$K_{LPF1}=K_{LPF2}=\text{SQRT}(K_{LPF})=9,81. \quad (9.2)$$

Для реализации таких величин коэффициентов передач необходимо использовать ФНЧ второго порядка структуры Рауха – на инвертирующих операционных блоках [1, 2, 3]. Выбираем фильтр по подходу к аппроксимации АЧХ – фильтр Баттерворта, две ступени фильтрации. Для расчёта используются обобщённые коэффициенты [3]. Для первой ступени фильтрации $b1=0,7654$; $c1=1$. Для второй ступени фильтрации $b2=1,8478$; $c2=1$.

Принципиальная схема ввода сигнала датчика с выходом однополярного напряжения при воздействии помех изображена на рис. 9.1.

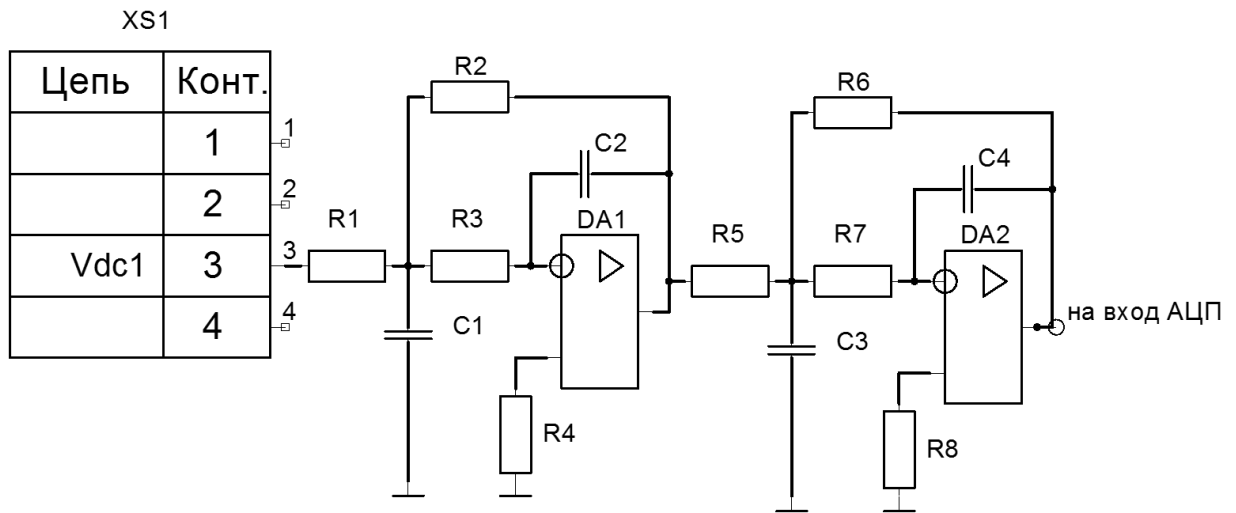


Рис. 9.1. Схема ввода однополярного напряжения U_{DC4} при воздействии помех

Определим частоту среза ФНЧ:

$$f_c = 2f_{\max} = 2 \cdot 2,47 \text{ кГц} = 4,94 \text{ кГц}. \quad (9.3)$$

Выполняем расчёт первой ступени фильтрации на ИМС DA1.

В первую очередь вычисляется ёмкость конденсатора C1 по формуле:

$$C1 \approx \frac{10}{f_c [\text{kHz}]} [\text{nF}]. \quad (9.4)$$

$$C1 = 10 \text{ нФ} / 4,94 = 2,024 \text{ нФ}.$$

Номинальная ёмкость конденсатора C1 по ряду E24: $C1 = 2 \text{ нФ}$.

Вычисляется значение ёмкости конденсатора C2:

$$C2 < b1 \cdot b1 \cdot C1 / (4 \cdot c1 \cdot (|K_{LPF1}| + 1)). \quad (9.5)$$

$$C2 < 0,7654 \cdot 0,7654 \cdot 2 \text{ н} / (4 \cdot 1 \cdot (9,81 + 1)) = 27,097 \text{ п}.$$

Номинальная ёмкость конденсатора C2 с учётом условия по ряду E24:

$$C2 = 24 \text{ пФ}.$$

Вычисляется значение сопротивления резистора R2 и выбирается ближайшее номинальное значение из ряда E96 [1].

$$R2 = (|K_{LPF1}| + 1) / (\pi \cdot f_c \cdot C1) / (b1 + \sqrt{b1 \cdot b1 - 4 \cdot c1 \cdot (|K_{LPF1}| + 1) \cdot C2 / C1}). \quad (9.6)$$

$$R2 = (9,81 + 1) / (\pi \cdot 4,94 \text{ к} \cdot 2 \text{ н}) / (0,7654 + \sqrt{0,7654 \cdot 0,7654 - 4 \cdot 1 \cdot (9,81 + 1) \cdot 24 \text{ п} / 2 \text{ н}}) = 340,06 \text{ кОм}.$$

Номинальное значение сопротивления резистора R2 по ряду E96:

$$R2 = 340 \text{ кОм}.$$

Вычисляется значение сопротивления резистора R1 и выбирается ближайшее номинальное значение из ряда E96.

$$R1 = R2 / |K_{LPF1}|; \quad (9.7)$$

$$R1 = 340 \text{ к} / 9,81 = 34,659 \text{ кОм}.$$

Номинальное значение сопротивления резистора R1 по ряду E96:
R1=34,8 кОм.

Вычисляется значение сопротивления резистора R3 и выбирается ближайшее номинальное значение из ряда E96.

$$R3=1/(c1*C1*C2*R2*(2*\pi*f_c)^2); \quad (9.8)$$

$$R3=1/(1*2n*24p*340k*(2*\pi*4.94k)^2)=63,601кОм.$$

Номинальное значение сопротивления резистора R3 по ряду E96:
R3=63,4 кОм.

Для уменьшения погрешности рекомендуется вычислять значение сопротивления резистора R4 по формуле:

$$R4=R3+R1*R2/(R1+R2); \quad (9.9)$$

$$R4=63,4к+34,8к*340к/(34,8к+340к)=94.97кОм.$$

Номинальное значение сопротивления резистора R4 по ряду E96:
R4=95,3 кОм.

Расчёт второй ступени фильтрации на ИМС DA2. Коэффициенты для второй ступени фильтра: b2=1,8478; c2=1.

В первую очередь вычисляется ёмкость конденсатора C3 по формуле:

$$C3 \approx \frac{10}{f_c [\text{kHz}]} [\text{nF}]. \quad (9.10)$$

$$C3=10\text{нФ}/4,94=2,024\text{нФ}.$$

Номинальная ёмкость конденсатора C3 по ряду E24: C3=2нФ.

Вычисляется значение ёмкости конденсатора C4:

$$C4 < b2*b2*C1/(4*c2*(|K_{LPF2}|+1))=1,8478*1,8478*2\text{н}/(4*1*(9,81+1))=157.926 \text{ п}.$$

Номинальная ёмкость конденсатора C4 с учётом условия по ряду E24:
C4=150 пФ.

Вычисляется значение сопротивления резистора R6 и выбирается ближайшее номинальное значение из ряда E96.

$$R6=(|K_{LPF2}|+1)/(\pi*f_c*C3)/(b2+\sqrt{b2*b2-4*c2*(|K_{LPF2}|+1)*C4/C3}); \quad (9.11)$$

$$R6=(9.81+1)/(\pi*4.94к*2\text{н})/(1.8478+\sqrt{1.8478*1.8478-4*1*(9.81+1)*150\text{п}/2\text{н}})=153.98кОм.$$

Номинальное значение сопротивления резистора R6 по ряду E96:
R6= 154 кОм.

Вычисляется значение сопротивления резистора R5 и выбирается ближайшее номинальное значение из ряда E96.

$$R5=R6/|K_{LPF2}|; \quad (9.12)$$

$$R5=154 \text{ к}/9,81=15,7 \text{ кОм}.$$

Номинальное значение сопротивления резистора R5 по ряду E96:
 $R5=15,8 \text{ кОм}$.

Вычисляется значение сопротивления резистора R7 и выбирается ближайшее номинальное значение из ряда E96.

$$R7=1/(c2*C1*C2* R6*(2*\pi*f_c)^2); \quad (9.13)$$

$$R7=1/(1*2n*150p*154k*(2*\pi*4.94k)^2)=22.47\text{кОм}.$$

Номинальное значение сопротивления резистора R7 по ряду E96:
 $R7=22,6 \text{ кОм}$.

Для уменьшения погрешности рекомендуется вычислять значение сопротивления резистора R8 по формуле:

$$R8=R7+R5*R6/(R5+R6); \quad (9.14)$$

$$R8=22,6 \text{ кОм}+15,8 \text{ кОм}*154 \text{ кОм}/(15,8 \text{ кОм}+154 \text{ кОм})=36.93\text{кОм}.$$

Номинальное значение сопротивления резистора R8 по ряду E96:
 $R8=36.5 \text{ кОм}$.

Схема моделирования ввода однополярного напряжения U_{DC4} при воздействии помех изображена на рис. 9.2.

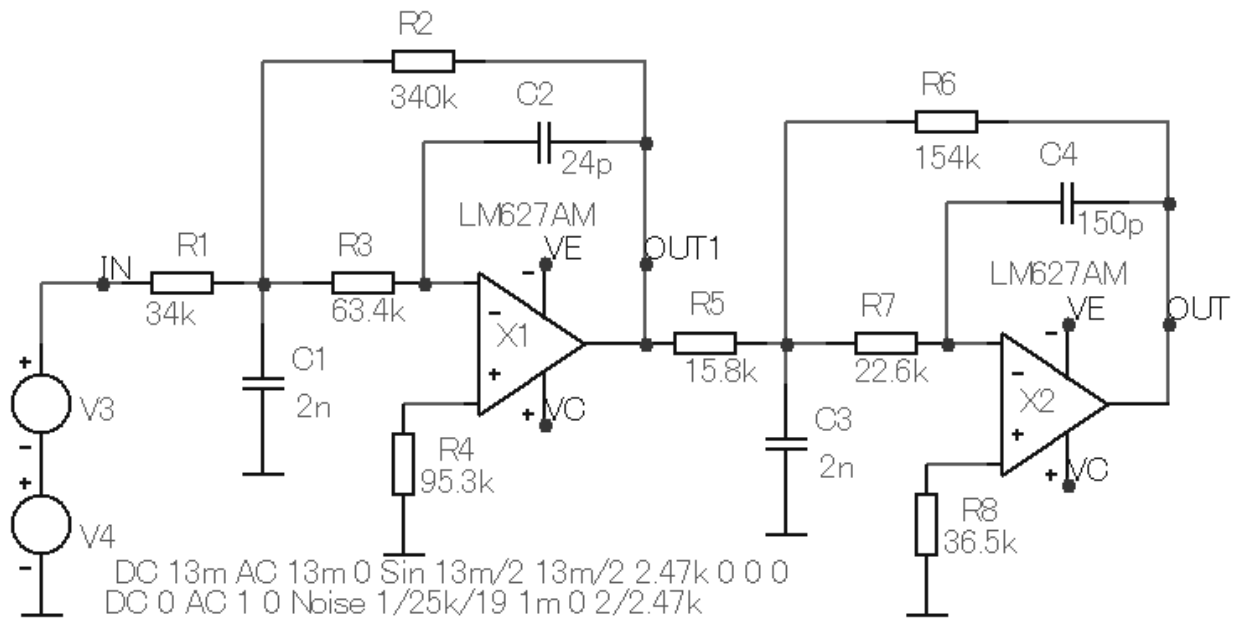


Рис. 9.2. Схема моделирования ввода однополярного напряжения U_{DC4} при воздействии помех

Результаты моделирования в частотной области, логарифмическая амплитудно-частотная характеристика (ЛАХ), представлены на рис. 9.3. Правый курсор установлен на частоту среза $f_c=4,931 \text{ кГц}$. На низкой частоте коэффициент передачи модели фильтра нижних частот составляет $K_{LPF}=95,22$.

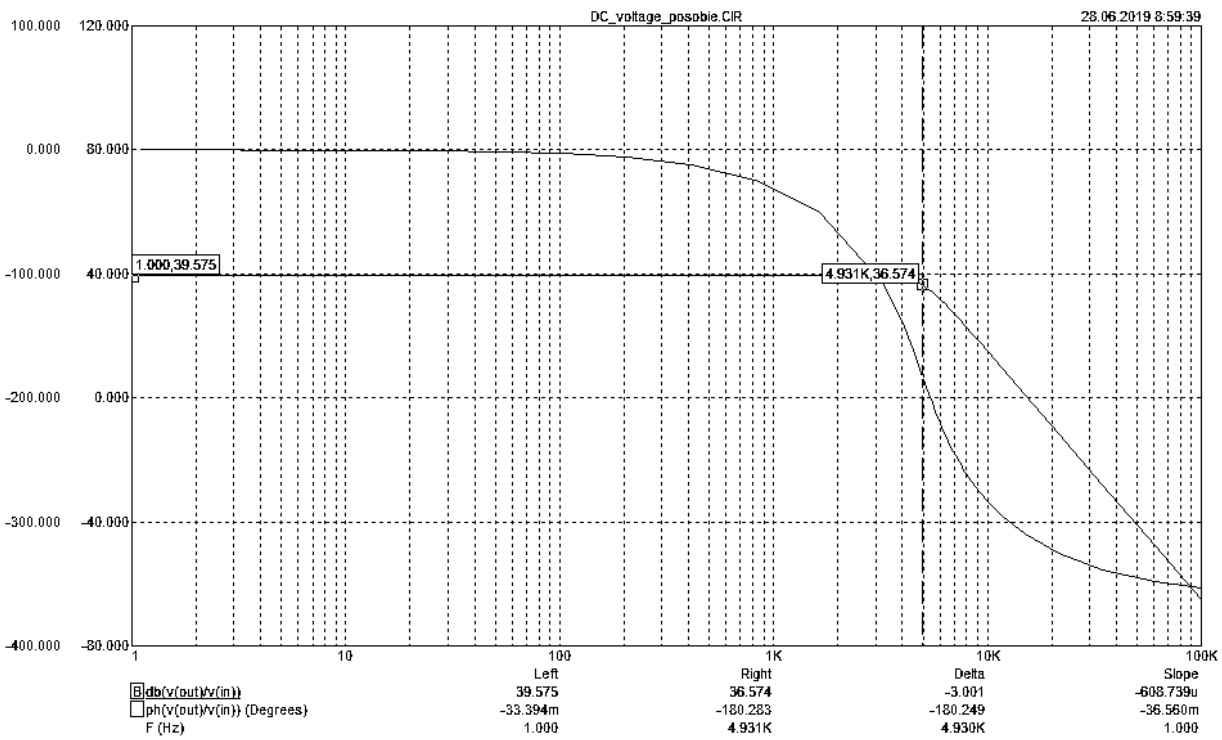


Рис. 9.3. Результаты моделирования фильтра нижних частот в частотной области

На рис. 9.4 представлены результаты моделирования во временной области. На выходе модели фильтра нижних частот имеем однополярный сигнал напряжения при отсутствии помех.

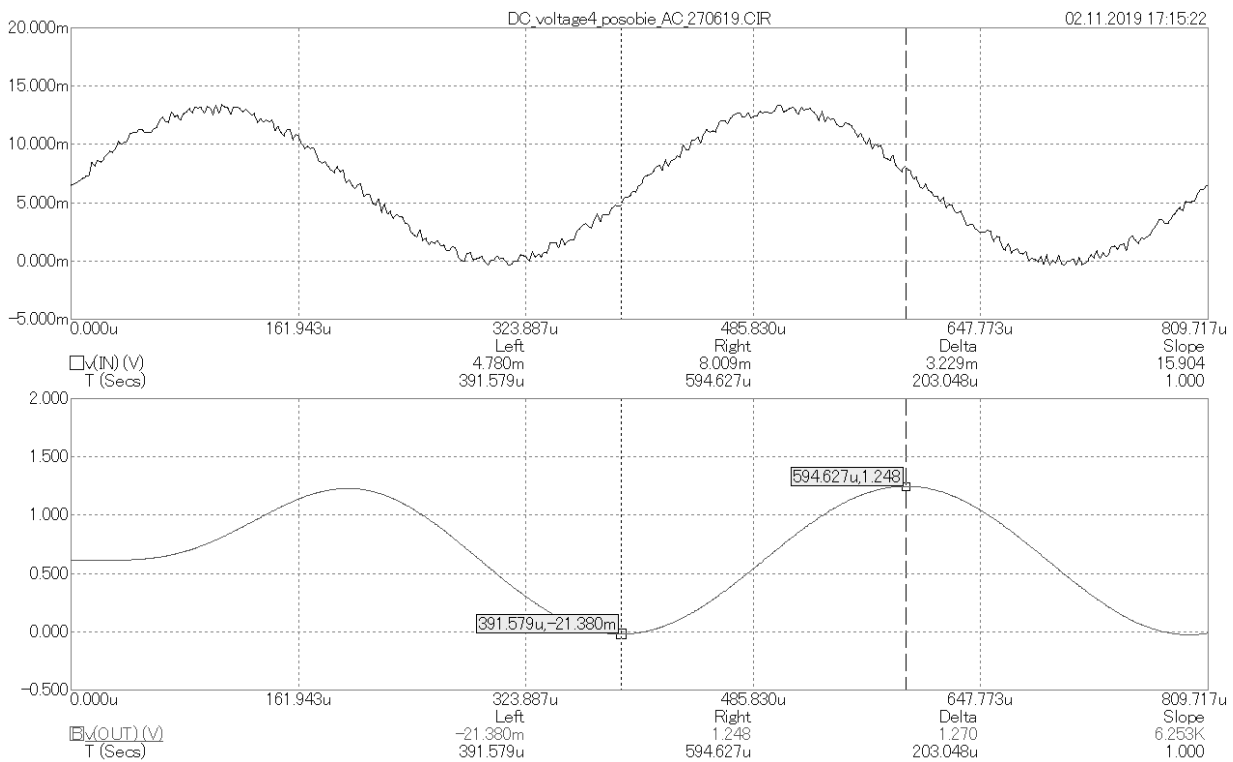


Рис. 9.4. Результаты моделирования фильтра нижних частот во временной области

10 Проектирование схемы ввода сигнала переменного (разнополярного) напряжения U_{AC1}

Переменное напряжение с выхода датчика частотой 330Гц имеет амплитуду $U_{AC1m}=5,9$ мВ.

Полный размах переменного напряжения (pick-pick):

$$U_{1P_P}=2*U_{AC1m}=2*5,9\text{мВ}=11,8 \text{ мВ}. \quad (10.1)$$

На выходе схемы сопряжения должно быть напряжение $U_{INADCm}=1,25$ В.

Коэффициент передачи схемы сопряжения:

$$K_{AC}=U_{INADCm}/U_{1P_P}=1,25 \text{ В}/11,8 \text{ мВ}=105,93.$$

Необходимо использовать два масштабных инвертирующих операционных блока с равными коэффициентами передачи первого операционного блока $|K_{AC1}|$ и по первому входу второго операционного блока $|K_{AC21}|$ [1, 2],

$$|K_{AC1}| = |K_{AC21}| = \sqrt{K_{AC}} = \sqrt{105,93} = 10,29.$$

Для получения на выходе второго операционного блока однополярного напряжения необходимо реализовать инвертирующий суммирующий операционный блок, на второй вход которого подать напряжение питания отрицательного знака $V_{EE}=-5$ В. Коэффициент передачи по второму входу второго суммирующего операционного блока:

$$K_{AC22}=(U_{ВХАЦПm}/2)/V_{EE}=(1,25 \text{ В}/2)/5 \text{ В}=0,125. \quad (10.2)$$

Принципиальная электрическая схема ввода разнополярного (переменного) напряжения изображена на рис. 10.1.

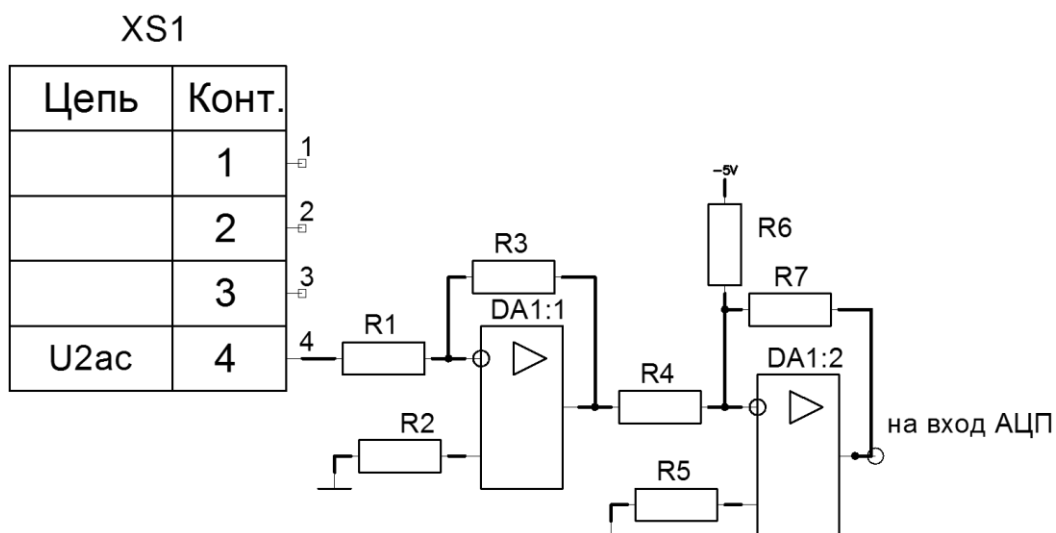


Рис. 10.1.Схема ввода переменного (разнополярного) напряжения в АЦП

Сопротивления резисторов в цепях обратных связей первого и второго операционных блоков выбираем равными $R3=R7=200$ кОм.

Сопротивление резистора R1 определим из выражения:

$$R1=R3/K_{AC1}=200 \text{ кОм}/10,29=19,44 \text{ кОм}.$$

Сопротивление резистора R1 по ряду E96 составляет: R1=19,6 кОм.

Сопротивление резистора R2=(R1*R3)/(R1+R3);

$$R2=(19,6 \text{ кОм}*200 \text{ кОм})/(19,6 \text{ кОм}+200 \text{ кОм})=17,85 \text{ кОм}.$$

Сопротивление резистора R2 по ряду E96 составляет: R2=17,8 кОм.

Сопротивление резистора R4 определим из выражения:

$$R4=R7/K_{AC21}.$$

Сопротивления резисторов R1=R4=19,6 кОм.

Сопротивление резистора R6 определим из выражения:

$$R6=R7/ K_{AC22}=200 \text{ кОм}/0,125=1600 \text{ кОм}=1,6 \text{ Мом}.$$

Сопротивление резистора R6 по ряду E96 составляет: R6=1,62 Мом.

Сопротивление резистора R5 определим из выражения:

$$R5=(((R4*R7)/(R4+R7))*R6)/(((R4*R7)/(R4+R7))+R6);$$

$$R5=(((19,6 \text{ кОм}*200 \text{ кОм})/(19,6 \text{ кОм}+200 \text{ кОм}))*1,62 \text{ Мом})/$$
$$/(((19,6 \text{ кОм}*200 \text{ кОм})/(19,6 \text{ кОм}+200 \text{ кОм}))+1,62 \text{ Мом})=17,66 \text{ кОм}.$$

Сопротивление резистора R5 по ряду E96 составляет: R5=17,8 кОм.

На рис. 10.2 изображена схема моделирования ввода переменного (разнополярного) в микросхему аналого-цифрового преобразователя.

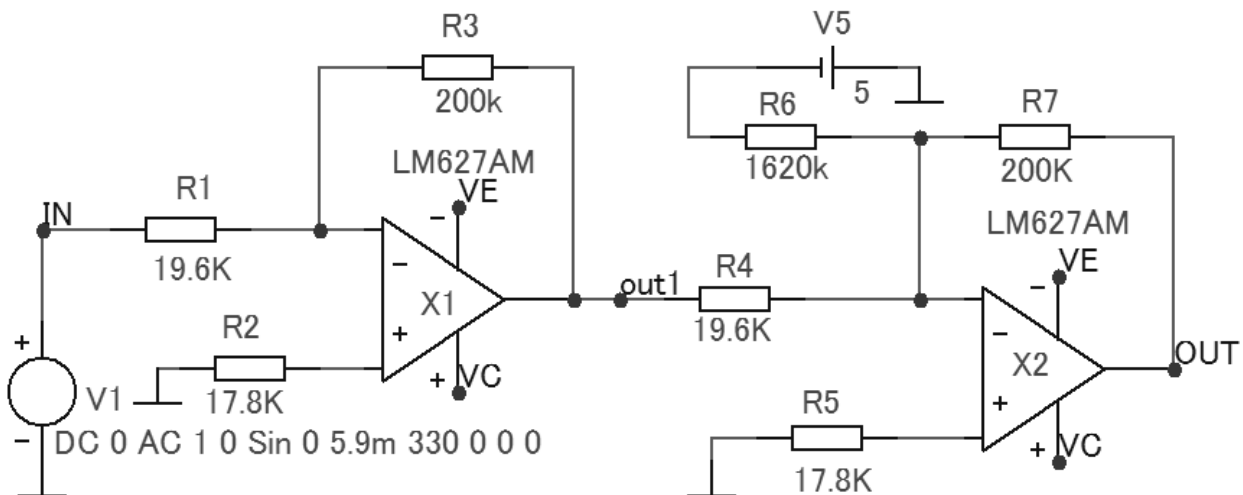


Рис. 10.2. Схема моделирования ввода переменного напряжения в АЦП

Входное напряжение изменяется в соответствии с выражением:

$$V(1)=5.9\text{m}*\text{SIN}(2*\text{PI}*330*t).$$

На рис. 10.3 изображены результаты моделирования схемы ввода переменного напряжения в аналого-цифровой преобразователь.

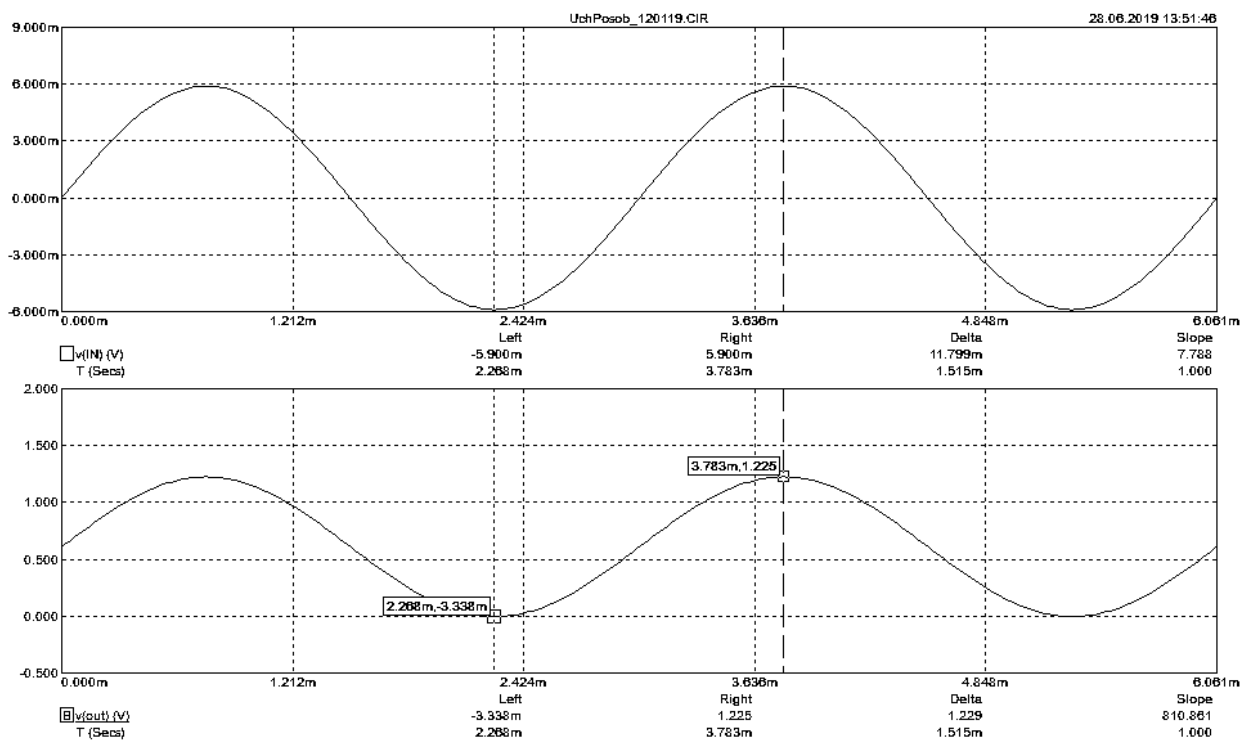


Рис. 10.3. Результаты моделирования схемы ввода переменного напряжения

Курсоры на временных диаграммах подтверждают выполнение поставленной задачи.

11 Проектирование схемы ввода сигнала переменного (разнополярного) напряжения U_{AC2}

Переменное напряжение с выхода датчика имеет максимальную амплитуду

$$U_{AC2m}=0,59В.$$

Частота переменного напряжения 470Гц.

Полный размах переменного напряжения (pick-pick):

$$U_{2P_P}=2*U_{AC2m}=2*0,59В=1,18В. \quad (11.1)$$

На выходе схемы ввода сигнала должно быть напряжение $U_{INADCm}=1,25 В$.

Коэффициент передачи схемы сопряжения:

$$K_{AC}=U_{INADCm}/U_{2P_P}=1,25В/1,18В=1,0593. \quad (11.2)$$

Следует использовать суммирующий неинвертирующий операционный блок на два входа для получения однополярного напряжения на входе микросхемы аналого-цифрового преобразователя. Схема ввода переменного напряжения U_{AC2} изображена на рис. 11.1.

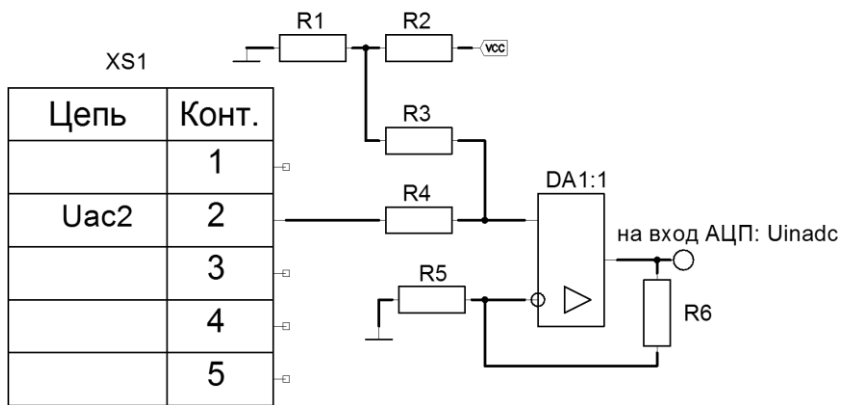


Рис. 11.1. Схема ввода напряжения U_{AC2} в аналого-цифровой преобразователь

Напряжение на входе АЦП формируется в соответствии с формулой:

$$U_{IN_ADC} = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{R6}{R5} \right) \left(U_{2P_P} + \left(\frac{R1}{R1+R2} \right) VCC \right). \quad (11.3)$$

Напряжение $VCC=15V$. Должно выполняться равенство для общего коэффициента передачи

$$1,0593 = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{R6}{R5} \right). \quad (11.4)$$

Определяем величину отношения

$$R6/R5 = 2 \cdot 1,0593 - 1 = 1,1186.$$

Задаёмся величиной сопротивления резистора $R5=100k\Omega$. Сопротивление резистора $R6=111,8k\Omega$. По ряду E96 сопротивление резистора $R6=113k\Omega$. Значение коэффициента

$$\frac{1}{2} \left(1 + \frac{R6}{R5} \right) = (1 + 113k/100k)/2 = 1,065. \quad (11.5)$$

Для второго слагаемого в формуле (11.3) должно выполняться равенство

$$\frac{1}{2} \left(1 + \frac{R6}{R5} \right) \left(\left(\frac{R1}{R1+R2} \right) VCC \right) = 0,59. \quad (11.6)$$

$$\left(\frac{R1}{R1+R2} \right) VCC = 0,554. \quad (11.7)$$

Напряжение $VCC=15V$. Задаёмся током делителя напряжения равным 1 миллиамперу. Сопротивление резисторов $(R1+R2)=15k\Omega$. Сопротивление резистора $R1=0,554k\Omega$. По ряду E96 выбираем сопротивление резистора $R1=562\Omega$. Сопротивление резистора $R2=15k\Omega - 0,562k\Omega = 14,38k\Omega$. По ряду E96 сопротивление резистора $R2=14,3k\Omega$. Для уменьшения погрешности должно выполняться равенство:

$$R3/2 = R4/2 = R5 \cdot R6 / (R5 + R6) = 100k \cdot 113k / (100k + 113k) = 53,0516k.$$

Получаем $R3=R4=2 \cdot 53,0516k = 106,1033k$. По ряду E96 выбираем сопротивление резисторов $R3=R4=107k$.

На рис. 11.2 представлена схема моделирования ввода напряжения U_{AC2} .

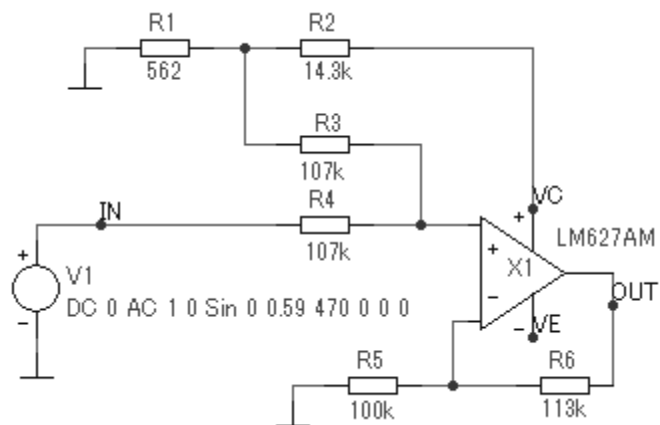


Рис. 11.2. Схема моделирования ввода напряжения U_{AC2}

На рис. 11.3 представлены расчёты номинальных значений сопротивлений резисторов в схеме моделирования.

$$\begin{aligned}
 U_{ac2m} &= 0.59; \\
 f &= 470\text{Hz}; \\
 U_{2p_p} &= 2 * U_{ac2m} = 2 * 0.59 = 1.18; \\
 K_{ac2} &= U_{inadc} / U_{2p_p} = 1.25 / 1.18 = 1.0593; \\
 U_{inadc} &= (1 + R_6 / R_5) * (U_{2p_p} + (R_1 / (R_1 + R_2)) * V_{CC}) / 2; \\
 V_{CC} &= 15; \\
 1.0593 &= (1 + R_6 / R_5) / 2; \\
 R_6 / R_5 &= 2 * 1.0593 - 1 = 1.1186; \\
 R_5 &= 100\text{k}; \quad R_6 = R_5 * 1.1186 = 100\text{k} * 1.1186 = 111.8\text{k}; \\
 E96: \quad R_6 &= 113\text{k}; \\
 (1 + R_5 / R_6) / 2 &= (1 + 113\text{k} / 11\text{k}) / 2 = 1.065; \\
 (1 + R_6 / R_5) * (R_1 / (R_1 + R_2)) * V_{CC} / 2 &= U_{2p_p} / 2; \\
 V_{CC} &= 15; \quad I_{divid} = 1\text{m}; \\
 (R_1 + R_2) &= 15\text{k}; \\
 R_1 * V_{CC} / (R_1 + R_2) &= 0.554; \\
 R_1 &= 554; \\
 E96: \quad R_1 &= 549; \\
 R_2 &= 15\text{k} - 549 = 14.451\text{k}; \\
 E96: \quad R_2 &= 14.3\text{k}; \\
 R_3 / 2 = R_4 / 2 = R_5 * R_6 / (R_5 + R_6) &= 100\text{k} * 113\text{k} / (100\text{k} + 113\text{k}) = 53.0516\text{K}; \\
 R_3 = R_4 = 2 * 53.0516\text{K} &= 106.1033\text{K}; \\
 E96: \quad R_3 = R_4 &= 107\text{k};
 \end{aligned}$$

Рис. 11.3. Расчёты номинальных значений сопротивлений резисторов в схеме моделирования ввода напряжения U_{AC2}

Входное напряжение схемы $V(1) = 0,59 * \text{SIN}(2 * \text{PI} * 470 * t)$. На рис. 11.4 изображены результаты моделирования во временной области схемы ввода напряжения U_{AC2} . Курсоры установлены на максимум и минимум сигнала на выходе схемы и подтверждают выполнение задачи.

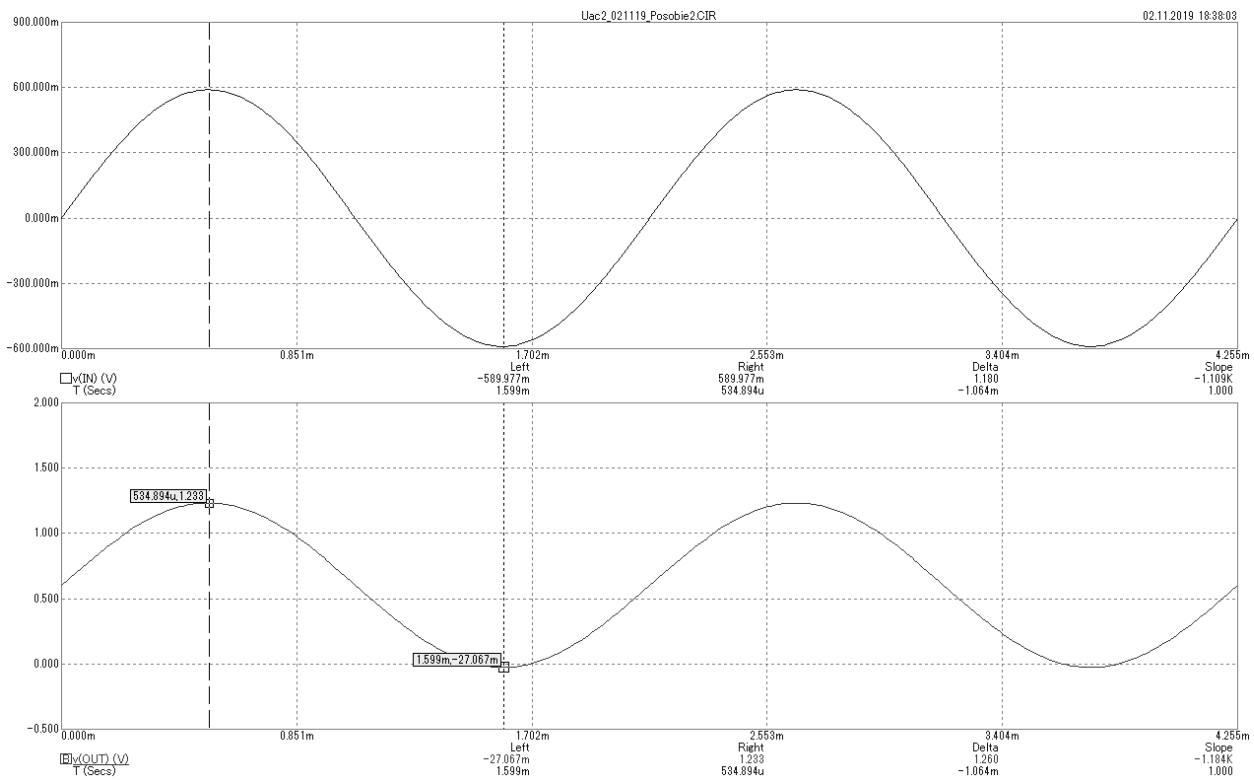


Рис. 11.4 . Результаты моделирования схемы ввода напряжения U_{AC2}

12 Проектирование схемы ввода сигнала переменного (разнополярного) напряжения U_{AC3}

Переменное напряжение с выхода датчика имеет максимальную амплитуду

$$U_{AC3m} = 59V. \quad (12.1)$$

Частота переменного напряжения 60Гц.

Полный размах переменного напряжения (pick-pick):

$$U_{3P_P} = 2 * U_{AC3m} = 2 * 59V = 118V. \quad (12.2)$$

На выходе схемы ввода сигнала должно быть напряжение $U_{INADCm} = 1,25V$.

Следует использовать резисторные делители напряжения и суммирующий неинвертирующий операционный блок на два входа для получения однополярного напряжения на входе микросхемы аналого-цифрового преобразователя.

Схема ввода переменного напряжения U_{AC3} изображена на рис. 12.1.

Напряжение на входе микросхемы АЦП формируется в соответствии с формулой:

$$U_{INADCm} = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{R8}{R7} \right) \left(U_{3P_P} * \left(\frac{R6}{R6+R4} \right) + \left(\frac{R3}{R1+R3} \right) * VCC \right). \quad (12.3)$$

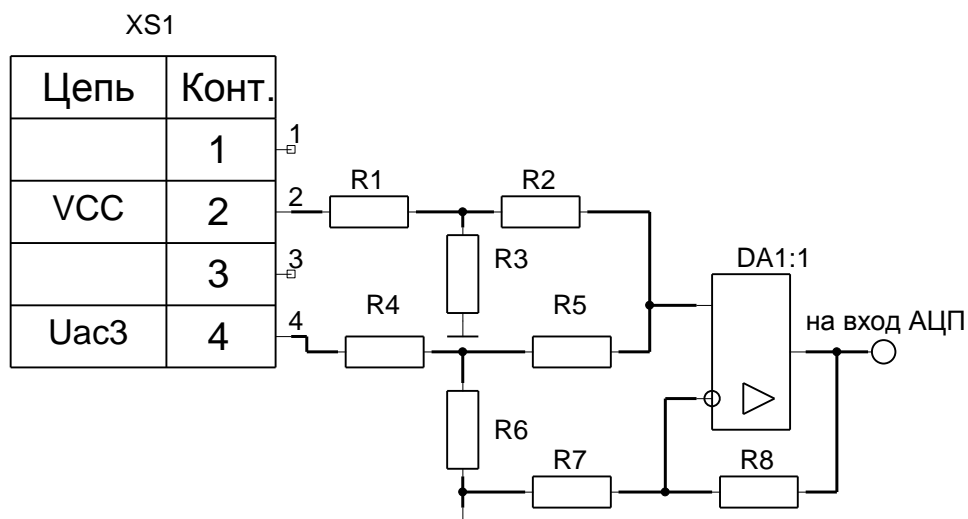


Рис. 12.1. Схема ввода переменного напряжения U_{AC3}

Напряжение $VCC=15V$. Должно выполняться равенство для произведения

$$1 = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{R8}{R7} \right). \quad (12.4)$$

Определяем величину отношения

$$R8/R7=1.$$

Коэффициент передачи схемы делителя напряжения $R4, R6$:

$$K_{AC} = U_{INADCm} / U_{3P-P} = 1,25V / 118V = 0,010593 = \frac{R6}{R4 + R6}. \quad (12.5)$$

Получаем $\frac{R4}{R6} = 93,4$. Задаём значение сопротивления резистора $R6=1k\Omega$.

Сопротивление резистора $R4=93,4k\Omega$. Выбираем по ряду E96 значение сопротивление резистора $R4=93,1k\Omega$.

Для схемы делителя напряжения $R1, R3$ должно выполняться равенство

$$\left(\frac{R3}{R1 + R3} \right) * VCC = U_{INADCm} / 2. \quad (12.6)$$

Получаем $\left(\frac{R3}{R1 + R3} \right) = 1,25 / 2 / 15 = 0,04167$. В результате $\frac{R1}{R3} = 23$. Задаём зна-

чение сопротивления резистора $R3=1k\Omega$. Сопротивление резистора $R1=23k\Omega$. Выбираем по ряду E96 значение сопротивление резистора $R1=23,2k\Omega$. Задаём значение сопротивлений резисторов $R2=R5=100k\Omega$.

Для уменьшения погрешности необходимо выполнение условия:

$$\frac{R2 * R5}{R2 + R5} = \frac{R7 * R8}{R7 + R8}. \quad (12.7)$$

Сопротивления резисторов $R7=R8=50k\Omega$. По ряду E96 номинальные значения сопротивлений резисторов $R7=R8=49,9k\Omega$.

На рис. 12.2 изображена схема моделирования ввода переменного напряжения U_{AC3} .

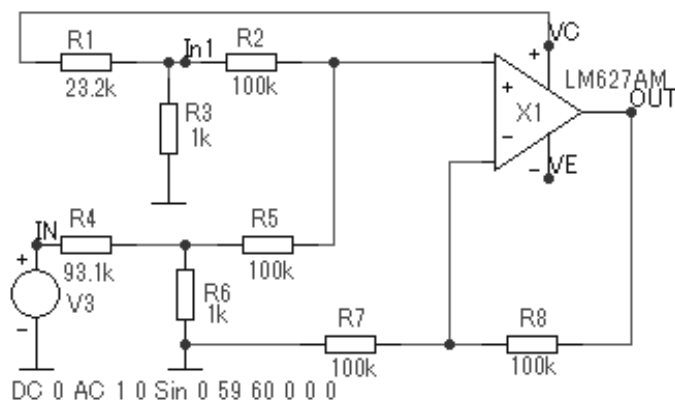


Рис. 12.2. Схема моделирования ввода переменного напряжения U_{AC3}

Входное напряжение формируется источником в соответствии с выражением: $V3=59*\text{SIN}(2*\text{PI}*60*t)$. На рис. 12.3 представлены результаты моделирования во временной области схемы ввода напряжения U_{AC3} .

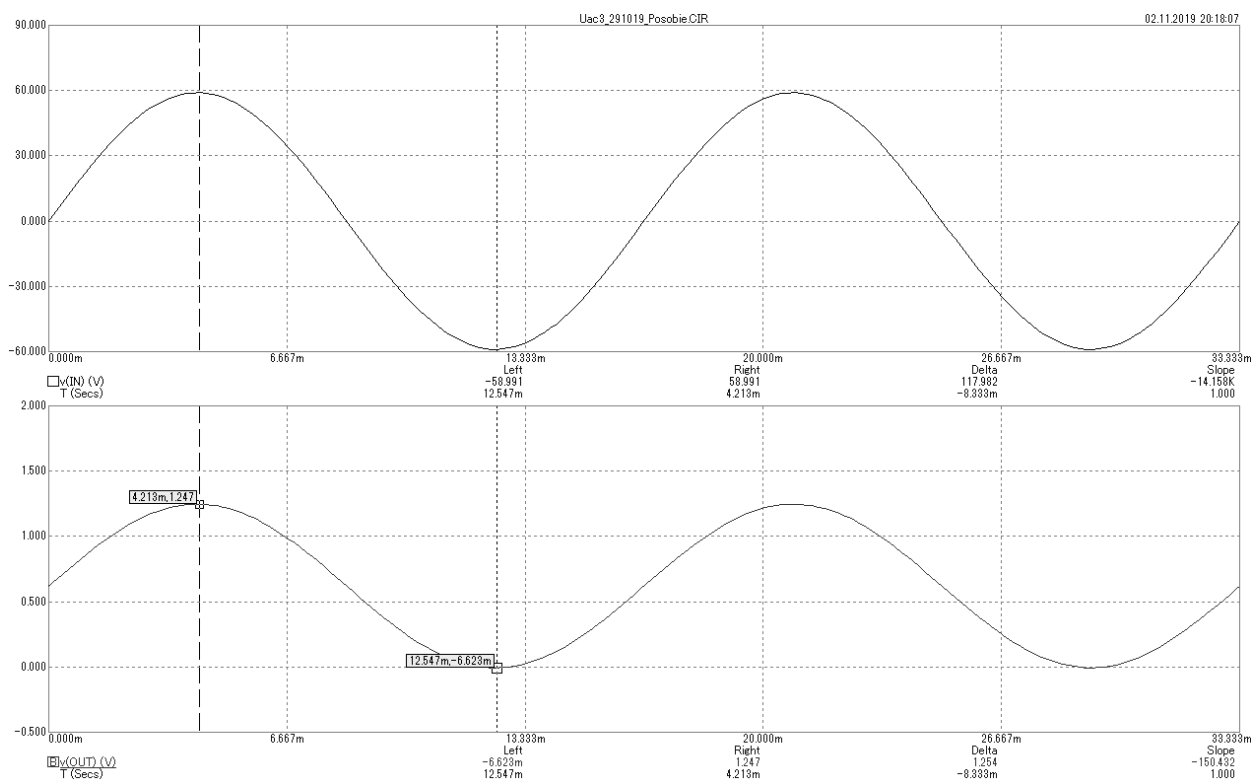


Рис. 12.3. Результаты моделирования схемы ввода переменного напряжения U_{AC3}

Курсоры, установленные на временной диаграмме, подтверждают выполнение задания.

13 Моделирование источника сигнала помехи в OrCAD

Источник сигнала помехи представляет собой генератор гауссовского шума, среднеквадратическое значение которого равно уменьшенной в $15 \div 20$ раз амплитуде сигнала, заданного на входе устройства, а время корреляции в 20 раз меньше периода нижней частоты сигнала помехи. Поэтому его можно считать белым шумом в пределах полосы пропускания ФНЧ.

Включение источника шума осуществляется с помощью независимого генератора напряжения типа VPWL_File или тока IPWL_File из библиотеки символов Source.olb.

Процедура включения источника шума на вход устройства ввода содержит следующие этапы:

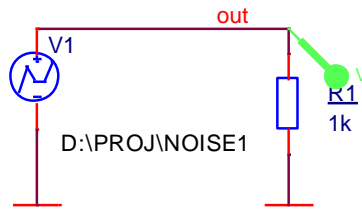
- 1) Определяется время корреляции шума по формуле $T_{кор} = 1 / f_{n_min} / 20$, где f_{n_min} - нижняя частота в спектре высокочастотной помехи.
- 2) Определяется амплитуда сигнала помехи по формуле $A_{мп} = A_m / 20$, где A_m - амплитуда тока или напряжения указанная в задании.
- 3) На вход схемы ввода включается независимый источник – формирователь шума с параметрами (открыть окно свойств источника VPWL_File или IPWL_File):

- **AC** = 1, для анализа по переменному току;
- **TSF** (Time_Scale_Factor) = $\langle T_{кор} \rangle$;
- **VSF** (Value_Scale_Factor) = $\langle A_{мп} \rangle$;
- **File** = путь к noise1.

Здесь noise1 – файл отсчетов гауссовского шума с единичной дисперсией, следующих с периодом, равным 1сек. Файл д.б. помещен в вашем рабочем каталоге. Пример пути расположения файла noise1 для проекта в папке PROJ на диске D:

D:\PROJ\noise1

Пример схемы источника напряжения помехи и настройка свойств источника для $A_m = 2В$ и $f_{n_min} = 33,3кГц$ показаны на рисунке 13.1.



	REPEAT_VALUE	FILE	Source Part	TSF	VSF
1		D:\PROJ\NOISE1	VPWL_FILE.Normal	1.5u	0.1m

Рисунок 13.1 - Схема и настройки источника напряжения помехи

Временная диаграмма на выходе источника напряжения помехи показана на рисунке 13.2. Величина резистора R1 указана условно.

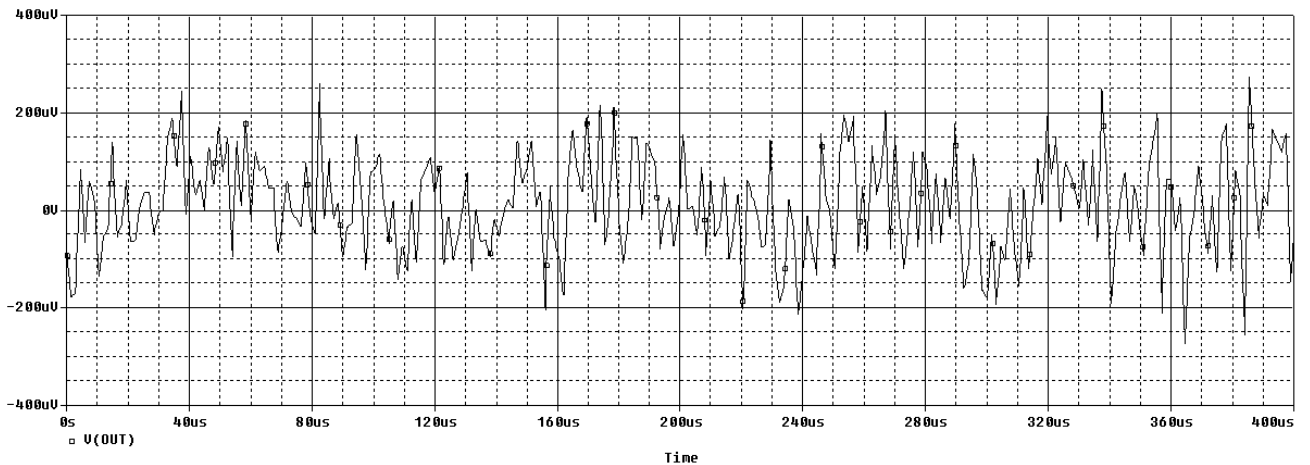
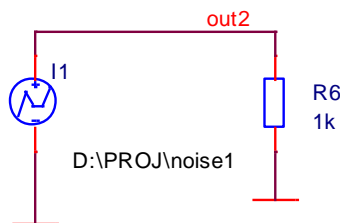


Рисунок 13.2 – Временная диаграмма сигнала помехи

Пример схемы источника тока помехи и настройка свойств источника для $A_m = 1,4\text{mA}$ и $f_{n_min} = 45\text{кГц}$ показаны на рисунке 13.3.



	Location X-Coordinate	Location Y-Coordinate	REPEAT_VALUE	FILE	Source Part	TSF	VSF
60							
1	240	60		D:\PROJ\noise1	IPWL_FILE.Normal	1.11u	0.07m

Рисунок 13.3 - Схема и настройки источника тока помехи

Временная диаграмма на выходе источника напряжения помехи показана на рисунке 13.4. Величина резистора R6 рассчитывается индивидуально по варианту.

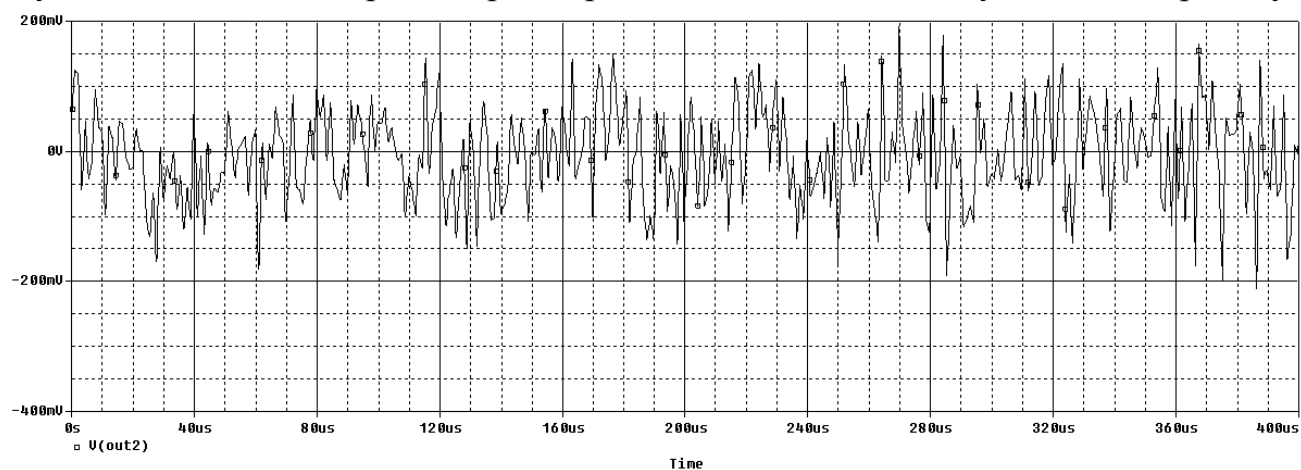


Рисунок 13.4 – Временная диаграмма сигнала помехи

14 ВАРИАНТЫ ЗАДАНИЙ

Варианты заданий указаны в таблице 14.1.

Таблица 3.1

Варианты заданий на ввод сигналов тока и напряжений

Вариант №;	Тип АЦП;	Диапазон изменения U_{INADC}	Входной сигнал 1	Входной сигнал 2	Схема ФНЧ	Тип аппроксимации
1	2	3	4	5	6	7
1	MAX114	от 0В до 1,25В	$I_1=0\div 250\text{мА}$; $f_{\text{max}}=1\text{ кГц}$.	$U_{\text{DC4}}=0\div 25\text{мВ}$ $f_{\text{max}}=2,47\text{кГц}$; $f_{\text{п min}}=28\text{ кГц}$.	МОС	Чебышев 0,5дБ
2	ADC10064	от 0В до 2,5В	$U_{\text{DC1}}=$ от 0В до 15В; $f_{\text{max}}=5,3\text{ кГц}$.	$I_2=0\div 2,2\text{мА}$; $f_{\text{max}}=5,1\text{ кГц}$; $f_{\text{п min}}=53\text{ кГц}$.	ИНУН	Баттерворт
3	ADS7842	от 0В до 1,5В	$U_{\text{AC1m}}=$ 0÷6мВ; $f_{\text{max}}=330\text{ Гц}$	$U_{\text{DC2}}=0\div 2,5\text{В}$; $f_{\text{max}}=4,73\text{кГц}$; $f_{\text{п min}}=62\text{ кГц}$.	ИНУН	Чебышев 1дБ
4	ADC10154	от 0В до 5В	$I_2=0\div 2\text{мА}$; $f_{\text{max}}=5\text{ кГц}$; $f_{\text{п min}}=40\text{ кГц}$.	$U_{\text{AC2m}}=0\div 0,9\text{В}$ $f_{\text{max}}=470\text{ Гц}$	ИНУН	Бессель
5	AD7862	от 0В до 3,3В	$U_{\text{DC4}}=0\div 15\text{мВ}$ $f_{\text{max}}=2,4\text{ кГц}$; $f_{\text{п min}}=20\text{ кГц}$.	$U_{\text{DC3}}=0\div 0,53\text{ В}$; $f_{\text{max}}=3,47\text{ кГц}$;	МОС	Баттерворт
6	AD7934	от 0В до 4В	$U_{\text{DC2}}=0\div 2\text{В}$; $f_{\text{max}}=4,7\text{ кГц}$; $f_{\text{п min}}=50\text{ кГц}$.	$U_{\text{AC2m}}=0\div 0,35\text{В}$ $f_{\text{max}}=450\text{ Гц}$	МОС	Чебышев 2дБ
7	MAX114	от 0В до 1,5В	$U_{\text{DC4}}=0\div 10\text{мВ}$ $f_{\text{max}}=2,4\text{кГц}$; $f_{\text{п min}}=33\text{ кГц}$.	$I_1=0\div 200\text{мА}$; $f_{\text{max}}=1,5\text{ кГц}$.	МОС	Баттерворт
8	ADC10064	от 0В до 5,5В	$I_2=0\div 1,1\text{мА}$; $f_{\text{max}}=5,2\text{ кГц}$; $f_{\text{п min}}=35\text{ кГц}$.	$U_{\text{DC1}}=$ от 0В до 20В; $f_{\text{max}}=6\text{ кГц}$.	ИНУН	Чебышев 3дБ
9	ADS7842	от 0В до 3В	$U_{\text{DC2}}=0\div 1,5\text{В}$; $f_{\text{max}}=5\text{кГц}$; $f_{\text{п min}}=50\text{ кГц}$.	$U_{\text{AC3m}}= 0\div 40\text{В}$; $f_{\text{max}}=60\text{ Гц}$	ИНУН	Чебышев 1дБ
10	ADC10154	от 0В до 2В	$U_{\text{AC2m}}=0\div 0,75\text{ В}$ $f_{\text{max}}=390\text{ Гц}$	$I_2=0\div 2,4\text{мА}$; $f_{\text{max}}=5,9\text{ кГц}$; $f_{\text{п min}}=57\text{ кГц}$.	ИНУН	Бессель
11	AD7862	от 0В до 3,3В	$U_{\text{DC3}}=0\div 0,6\text{ В}$ $f_{\text{max}}=3,95\text{ кГц}$;	$U_{\text{DC4}}=0\div 19\text{мВ}$ $f_{\text{max}}=2,7\text{ кГц}$; $f_{\text{п min}}=22\text{ кГц}$.	МОС	Баттерворт
12	AD7934	от 0В до 4В	$U_{\text{AC2m}}=0\div 0,44\text{ В}$ $f_{\text{max}}=510\text{ Гц}$	$U_{\text{DC2}}=0\div 2,6\text{В}$; $f_{\text{max}}=4,75\text{ кГц}$; $f_{\text{п min}}=37\text{ кГц}$.	МОС	Чебышев 0,5дБ

1	2	3	4	5	6	7
13	MAX114	от 0В до 5В	$U_{DC4}=0\div 20\text{МВ}$ $f_{\text{max}}=3\text{кГц}$; $f_{\text{п_min}}=35\text{кГц}$.	$I_1=0\div 300\text{МА}$; $f_{\text{max}}=2\text{кГц}$.	МОС	Баттерворт
14	ADC10064	от 0В до 2,5В	$I_2=0\div 1,9\text{МА}$; $f_{\text{max}}=5,6\text{кГц}$; $f_{\text{п_min}}=47\text{кГц}$.	$U_{DC1}=\text{от } 0\text{В до}$ 22В; $f_{\text{max}}=10\text{кГц}$.	ИНУН	Чебышев 1дБ
15	ADS7842	от 0В до 1,25В	$U_{DC2}=0\div 1,5\text{В}$; $f_{\text{max}}=3,6\text{кГц}$; $f_{\text{п_min}}=39\text{кГц}$.	$U_{AC1m}=0\div 8\text{МВ}$; $f_{\text{max}}=600\text{Гц}$	МОС	Бессель
16	ADC10154	от 0В до 3В	$U_{AC2m}=0\div 0,75$ В $f_{\text{max}}=430\text{Гц}$	$I_2=0\div 2,7\text{МА}$; $f_{\text{max}}=4\text{кГц}$; $f_{\text{п_min}}=40\text{кГц}$.	ИНУН	Чебышев 2дБ
17	AD7862	от 0В до 4В	$U_{AC3m}=\text{от } 0\div 45\text{В}$; $f_{\text{max}}=50\text{Гц}$	$U_{DC4}=0\div 25\text{МВ}$ $f_{\text{max}}=2,4\text{кГц}$; $f_{\text{п_min}}=39\text{кГц}$.	МОС	Баттерворт
18	AD7934	от 0В до 2В	$U_{AC2m}=0\div 0,8$ В $f_{\text{max}}=620\text{Гц}$	$U_{DC2}=0\div 2,7\text{В}$; $f_{\text{max}}=4,7\text{кГц}$; $f_{\text{п_min}}=36\text{кГц}$.	ИНУН	Чебышев 3дБ
19	MAX114	от 0В до 1,25В	$U_{DC4}=0\div 17\text{МВ}$ $f_{\text{max}}=2,7\text{кГц}$; $f_{\text{п_min}}=27\text{кГц}$.	$I_1=0\div 300\text{МА}$; $f_{\text{max}}=3\text{кГц}$.	МОС	Бессель
20	ADC10064	от 0В до 2,5В	$I_2=0\div 2\text{МА}$; $f_{\text{max}}=5,3\text{кГц}$; $f_{\text{п_min}}=54\text{кГц}$.	$U_{DC1}=\text{от } 0\text{В до}$ 10В; $f_{\text{max}}=3\text{кГц}$.	ИНУН	Баттерворт
21	ADS7842	от 0В до 1,5В	$U_{DC2}=0\div 1,2\text{В}$; $f_{\text{max}}=4,7\text{кГц}$; $f_{\text{п_min}}=50\text{кГц}$.	$U_{AC3m}=0\div 70\text{В}$; $f_{\text{max}}=50\text{Гц}$	ИНУН	Чебышев 1дБ
22	ADC10154	от 0В до 5В	$U_{AC2m}=0\div 0,33$ В $f_{\text{max}}=330\text{Гц}$	$I_2=0\div 2,6\text{МА}$; $f_{\text{max}}=3,6\text{кГц}$; $f_{\text{п_min}}=63\text{кГц}$.	ИНУН	Чебышев 0,5дБ
23	AD7862	от 0В до 3,3В	$U_{DC3}=0\div 0,8$ В; $f_{\text{max}}=4\text{кГц}$;	$U_{DC4}=0\div 30\text{МВ}$ $f_{\text{max}}=2,7\text{кГц}$; $f_{\text{п_min}}=27\text{кГц}$.	МОС	Баттерворт
24	AD7934	от 0В до 4В	$U_{AC2m}=0\div 0,46$ В $f_{\text{max}}=410\text{Гц}$	$U_{DC2}=0\div 3\text{В}$; $f_{\text{max}}=2,3\text{кГц}$; $f_{\text{п_min}}=58\text{кГц}$.	МОС	Чебышев 2дБ
25	ADC10064	от 0В до 2,5В	$I_2=0\div 1,3\text{МА}$; $f_{\text{max}}=3,8\text{кГц}$; $f_{\text{п_min}}=50\text{кГц}$.	$U_{DC1}=\text{от } 0\text{В до}$ 14В; $f_{\text{max}}=5,3\text{кГц}$.	ИНУН	Чебышев 1дБ
26	ADS7842	от 0В до 1,5В	$U_{DC2}=0\div 2,5\text{В}$; $f_{\text{max}}=7\text{кГц}$; $f_{\text{п_min}}=68\text{кГц}$.	$U_{AC3m}=0\div 43\text{В}$; $f_{\text{max}}=60\text{Гц}$	МОС	Баттерворт
27	ADC10154	от 0В до 5В	$U_{AC2m}=0\div 0,47$ В $f_{\text{max}}=470\text{Гц}$	$I_2=0\div 2,1\text{МА}$; $f_{\text{max}}=2\text{кГц}$; $f_{\text{п_min}}=25\text{кГц}$.	МОС	Бессель
28	ADS7842	от 0В до 1,5В	$U_{AC1m}=\text{от } 0\div 10\text{МВ}$; $f_{\text{max}}=660\text{Гц}$	$U_{DC2}=0\div 5\text{В}$; $f_{\text{max}}=4,7\text{кГц}$; $f_{\text{п_min}}=66\text{кГц}$.	ИНУН	Чебышев 2дБ

1	2	3	4	5	6	7
29	MAX114	от 0В до 1,25В	$I_1=0\div 150\text{мА};$ $f_{\text{max}}=10\text{ кГц.}$	$U_{\text{DC}4}=0\div 50\text{мВ}$ $f_{\text{max}}=2,47\text{кГц};$ $f_{\text{н_min}}=30\text{ кГц.}$	МОС	Чебышев 3дБ
30	ADC10154	от 0В до 2В	$U_{\text{AC}2\text{m}}=0\div 0,85$ В $f_{\text{max}}=500\text{ Гц}$	$I_2=0\div 3\text{мА};$ $f_{\text{max}}=7\text{ кГц};$ $f_{\text{н_min}}=75\text{ кГц.}$	ИНУН	Бессель

Список использованных источников

1. Панченко, А. А. Основы проектирования систем ввода аналоговых сигналов в микросхемы аналого-цифровых преобразователей [Текст]: учеб.-метод. пособие / А. А. Панченко. – Владивосток: Мор. гос. ун-т, 2019.– 41 с.
2. Волович Г. И. Схемотехника аналоговых и аналого-цифровых электронных устройств.– М.: Издательский дом «Додека-XXI», 2005. – 528 с.
3. Джонсон Д., Джонсон Дж., МурГ. Справочник по активным фильтрам/ [пер. с англ.]. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 160 с.
4. Павлов В. Н., Ногин В. Н. Схемотехника аналоговых электронных устройств: Учеб. для вузов. – М.: Горячая линия – Телеком, 2005. – 320 с.

Приложение А
(справочное)
Таблица А.1

Ряд Е96 номинальных значений сопротивлений резисторов

Ряд Е96	Ряд Е96	Ряд Е96	Ряд Е96
1	2	3	4
100	178	316	562
102	182	324	576
105	187	332	590
107	191	340	604
110	196	348	619
113	200	357	634
115	205	365	649
118	210	374	665
121	215	383	681
124	221	392	698
127	226	402	715
130	232	412	732
133	237	422	750
137	243	432	768
140	249	442	787
143	255	453	806
147	261	464	825
150	267	475	845
154	274	487	866
158	280	499	887
162	287	511	909
165	294	523	931
169	301	536	953
174	309	549	97