



Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Московский государственный технический университет
имени Н.Э. Баумана
(национальный исследовательский университет)»
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

ФАКУЛЬТЕТ Информатика и системы управления

КАФЕДРА Информационные системы и телекоммуникации

РАСЧЕТНО-ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА К КУРСОВОЙ РАБОТЕ

НА ТЕМУ:

Разработка модуля измерения температуры

Студент ИУ3-62Б
(Группа)

(Подпись, дата)

Е.М. Балтин
(И.О.Фамилия)

Руководитель курсовой работы

(Подпись, дата)

В.И. Оганов
(И.О.Фамилия)

Консультант

(Подпись, дата)

В.И. Оганов
(И.О.Фамилия)

2021 г.

Оглавление

1. Введение	4
1.1 Анализ требований	5
2. Теоретическая часть.....	6
2.1 Измерение температуры при помощи платинового ТСП.....	6
2.2 Аналого-цифровое преобразование сигнала.....	8
3. Расчётно-конструкторская часть.....	10
3.1 Описание работы разработанной схемы	10
3.2 Датчики и эталонные сопротивления.....	11
3.3 Расчёт разрядности и выбор АЦП	18
3.4 Расчёт тепловых шумов	25
3.5 Четырёхпроводная схема подключения.....	26
3.6 Подавление наводок.....	27
3.6.1 Выбор моделей конденсаторов и резисторов фильтров	31
3.7 Источники тока	32
3.7.1 Выбор ОУ для источников тока.....	36
3.7.2 Расчёт делителя опорного напряжения для источников тока	37
3.7.3 Выбор резисторов для источников тока	44
3.8 Питание схемы.....	45
3.8.1 Расчёт тока потребления схемы.....	45
3.8.2 Выбор регулятора напряжения	47
3.9 I ² C-интерфейс.....	51
3.10 Обработка результата преобразования	52
4. Моделирование	54
5. Вывод.....	56
Список литературы	57

1. Введение

Термометр (термопреобразователь) сопротивления (ТС) – это термометр, как правило, в металлическом или керамическом корпусе, чувствительный элемент которого представляет собой резистор, выполненный из металлической проволоки или пленки и имеющий известную зависимость электрического сопротивления от температуры.

Используется такой термометр для измерения температуры в жидких и газообразных средах, в нагревательной технике, климатической и холодильной, а также в машиностроении, печестроении и т.п.

По-другому такие термометры еще называют терморезисторами, так как основным чувствительным компонентом такого термометра является именно резистор, который изготавливается из различных материалов, что позволяет определить техпараметры термометра сопротивления, к примеру, область применения прибора или диапазон его рабочих температур.

Принцип действия такого термометра заключается в изменении электрического сопротивления сплавов, чистых металлов (т.е. без примесей) и полупроводников под действием температуры.

Самыми распространенными термометрами сопротивления являются те, в которых установлены резисторы из платины. Это объясняется рядом преимуществ, которыми владеет этот материал. Во-первых, плюсом является высокий температурный коэффициент сопротивления, что значительно облегчает работу с таким термометром. Во-вторых, преимуществом платинового резистора является высокая стойкость платины к окислению, что обеспечивает долгий срок службы прибора.

Проволочные платиновые терморезисторы отличаются минимальной погрешностью, именно поэтому такие агрегаты часто используют как инструмент для проверки (эталон). Кроме этого, они используются на промышленных объектах, для чего производятся во взрывозащитном исполнении.

Плёночные термометры отличаются особой повышенной вибропрочностью и меньшим диапазоном рабочих измеряемых температур. Так, максимум

воспринимаемых температур для пленочных чувствительных элементов платиновых термисторов составляет $+600\text{ }^{\circ}\text{C}$, а проволочных - $+660\text{ }^{\circ}\text{C}$.

1.1 Анализ требований

Техническим заданием является разработка модуля измерения температуры, к которому предъявляются следующие требования:

- термопреобразователи сопротивления - Pt100 и Pt1000 (выбирается переключкой);
- схема подключения термометров - 4-х проводная;
- диапазон измерения температуры - от -50 до $500\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- точность измерения температуры - не хуже $\pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- информационный интерфейс для передачи результатов измерения - I2C;
- напряжение питания – от 12 до 24 В.

В результате проектирования устройства требуется:

- разработать и описать функциональную схему устройства;
- разработать электрическую принципиальную схему устройства;
- выполнить расчет основных каскадов принципиальной схемы;
- описать работу устройства по функциональной схеме;
- выполнить моделирование устройства;
- осуществить выбор элементной базы и разработать перечень элементов.

2. Теоретическая часть

2.1 Измерение температуры при помощи платинового ТСП

Используемые аббревиатуры и термины:

НСХ – номинальная статическая характеристика.

ЧЭ – чувствительный элемент (термопреобразователя).

Параметры металлических термопреобразователей: [1]

- 1) **R₁₀₀** – значение сопротивления по номинальной статической характеристике при 100°C;
- 2) **R₀** – значение сопротивления по номинальной статической характеристике при 0°C;
- 3) **α** – температурный коэффициент термопреобразователя сопротивления, определяемый по формуле $\alpha = \frac{R_{100} - R_0}{R_0 \cdot 100^\circ\text{C}}$ и округляемый до пятого знака после запятой;
- 4) **допуск** – максимально допустимое отклонение от номинальной статической характеристики, выраженное в градусах Цельсия.

Классы допусков термопреобразователей сопротивления: [2]

Класс допуска	Допуск, °C	Диапазон измерений, °C			
		Платиновый ТС, ЧЭ		Медный ТС, ЧЭ	Никелевый ТС, ЧЭ
		Проволочный ЧЭ	Пленочный ЧЭ		
AA	$\pm(0,1 + 0,0017 t)$	От -50 до +250	От 0 до +150	-	-
A	$\pm(0,15 + 0,002 t)$	От -100 до +450	От -30 до +300	От -50 до +120	-
B	$\pm(0,3 + 0,005 t)$	От -196 до +660	От -50 до +500	От -50 до +200	-
C	$\pm(0,6 + 0,01 t)$	От -196 до +660	От -50 до +600	От -180 до +200	От -60 до +180
Примечание - t - абсолютное значение температуры, °C, без учета знака.					

Таблица 1 – Классы допусков и диапазоны измерений для термопреобразователей сопротивления и чувствительных элементов по ГОСТ 6651-2009

Необходимо отметить, что производитель, согласно п. 5.7 ГОСТ 6651, имеет право расширить диапазон измерений и установить допуски вне диапазона измерений по своим ТУ. (п. 5.7 Допуски для платиновых ТС при температурах вне

диапазона измерений, указанного в таблице, должны быть установлены техническими документами на ТС конкретного типа.)

Таким образом, для получения устройства на базе платинового ЧЭ для измерения температуры с точностью $0,5^{\circ}\text{C}$ в диапазоне от -50 до 500°C можно использовать проволоочный ЧЭ класса А с расширенным диапазоном (выбор датчиков см. п. 3.2).

Зная значение сопротивления термометра (которое нужно предварительно измерить), можно вычислить значение температуры.

Для $R_t/R_0 < 1$ ($t < 0^{\circ}\text{C}$) приближенная обратная функция для НСХ, позволяющая проводить расчет температуры по показаниям термометра сопротивления с точностью $0,002^{\circ}\text{C}$, следующая: [3]

$$t = \sum_{i=1}^4 D_i * \left(\frac{R_t}{R_0} - 1 \right)^i$$

Для $R_t/R_0 \geq 1$ ($t \geq 0^{\circ}\text{C}$), обратная функция для НСХ следующая:

$$t = \frac{\sqrt{A^2 - 4B(1 - \frac{R_t}{R_0})} - A}{2B}$$

где t – температура чувствительного элемента (по МТШ-90), $^{\circ}\text{C}$;

R_t – сопротивление при температуре t , Ом;

R_0 – номинальное сопротивление при 0°C , Ом;

Значения постоянных для ТС с различным α следующие:

Постоянная	$\alpha = 0,00385^{\circ}\text{C}^{-1}$	$\alpha = 0,00391^{\circ}\text{C}^{-1}$
A	$3,9083 * 10^{-3}^{\circ}\text{C}^{-1}$	$3,9690 * 10^{-3}^{\circ}\text{C}^{-1}$
B	$-5,775 * 10^{-7}^{\circ}\text{C}^{-2}$	$-5,841 * 10^{-7}^{\circ}\text{C}^{-2}$
D ₁	$255,819^{\circ}\text{C}$	$251,903^{\circ}\text{C}$
D ₂	$9,14550^{\circ}\text{C}$	$8,80035^{\circ}\text{C}$
D ₃	$-2,92363^{\circ}\text{C}$	$-2,91506^{\circ}\text{C}$
D ₄	$1,79090^{\circ}\text{C}$	$1,67611^{\circ}\text{C}$

Таблица 2 – Значения постоянных для платиновых термопреобразователей сопротивления

Интерполяционные зависимости сопротивления термометра от температуры и соответствующие коэффициенты (проверено для $\alpha = 0,00385 \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$) в стандартах DIN EN 60751 ^[4] и ГОСТ 6651-2009 совпадают. Значит, будут совпадать и обратные уравнения. В устройстве можно использовать удовлетворяющий стандарту DIN EN 607 ЧЭ с $\alpha = 0,00385 \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ или отечественный.

2.2 Аналого-цифровое преобразование сигнала

Аналого-цифровое преобразование сигнала с резистивных датчиков осуществляется схемой, которая фактически стала стандартной.

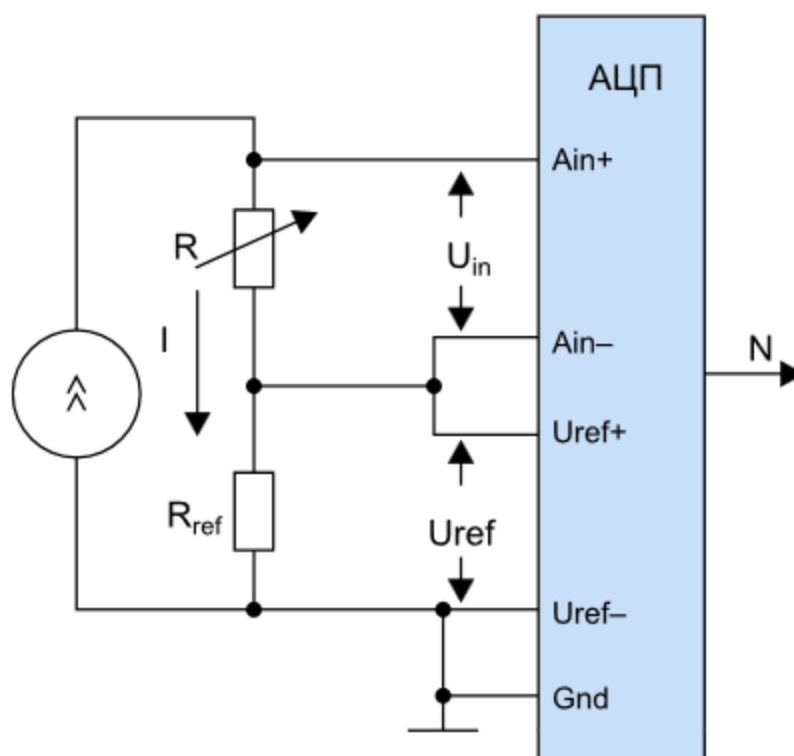


Рисунок 2.2.1 – Логометрическая схема измерения сопротивления резистивного датчика с источником тока

Последовательное включение датчика и эталонного резистора, с которого снимается опорное напряжение АЦП U_{ref} , обеспечивает так называемый логометрический способ преобразования ^[5] (или ratiometric), при котором результат преобразования N пропорционален частному от деления U_{in}/U_{ref} (см. рис. 1):

$$N = \frac{k_{yc}}{2^n - 1} * \frac{U_{in}}{U_{ref}} = \frac{k_{yc}}{2^n - 1} * \frac{I * R_D}{I * R_{ref}} = \frac{k_{yc}}{2^n - 1} * \frac{R_D}{R_{ref}}$$

Где n – эффективная разрешающая способность АЦП; k_{yc} – коэффициент усиления встроенного или внешнего усилителя; R_D – сопротивление датчика, зависящее от температуры; R_{ref} – сопротивление эталонного резистора; I – выходной ток внешнего источника тока; U_{in} – падение напряжения на R_D , вызванное протеканием тока I ; U_{ref} – падение напряжения на эталонном сопротивлении, вызванное протеканием тока I ; N – выходной код АЦП.

3. Расчётно-конструкторская часть

3.1 Описание работы разработанной схемы

Обратимся к функциональной схеме. Питание в диапазоне от 12 до 24 В поступает на источник опорного напряжения, в котором преобразуется в стабильные 5 В. Далее при помощи переключки (джампера) выход ИОН коммутируется на одну из измерительных схем (для Pt1000 или Pt100). Стабильные 5 В в источнике тока используются как для питания ОУ, так и как управляющее напряжение для задания тока. Также от ИОН питается АЦП. Источник тока работает на нагрузку, состоящую из последовательно подключённого термосопротивления (датчика) и образцового (эталонного) сопротивления.

При прохождении тока через эти сопротивления на них появляются разности потенциалов (по закону Ома, $U=I \cdot R$), которые и являются входными сигналами для АЦП. Один входной сигнал – это разность ($U_{IN+} - U_{IN-} = I \cdot R_{\text{ДАТЧ}}$), а другой - разность ($U_{\text{REF}} - \text{GND} = I \cdot R_{\text{ЭТАЛ}}$). Выходной код АЦП пропорционален отношению первого сигнала ко второму. Поэтому точность измерения зависит не от точности тока, а от точности сопротивлений $R_{\text{ДАТЧ}}$ и $R_{\text{ЭТАЛ}}$.

Внутри АЦП сигнал проходит сигма-дельта модуляцию, после чего цифровой код передаётся по последовательному синхронному I²C-интерфейсу для дальнейшей обработки и вычисления значения температуры.

3.2 Датчики и эталонные сопротивления

В качестве датчика Pt100 был выбран ТСП-0193 производителя ООО «Теплоприбор-Сенсор»:



Рисунок 3.2.1 – Внешний вид датчика ТСП-0193

Его разновидности могут иметь следующие характеристики ^[6]:

Тип ТС	Обозначение типа ТС	R_0 , Ом	α , °C ⁻¹	Класс допуска	
				для ТС	для ЧЭ
Платиновый	П	50, 100	0,00391	АА	АА
				А, 1/2В	А, 1/2В
		50, 100, 500, 1000		В	В

Таблица 3 – Характеристики ТСП-0193

2.3 Рабочий диапазон измеряемых температур, °C

класса допуска АА

от –50 до + 250

класса допуска А (от -50 °C до +450 °C),

от –50 до + 500

1/2В (св.+450 °C до+500 °C)

класса допуска В

от – 196 до + 500

от – 196 до + 660

Рисунок 3.2.2 – Скриншот характеристик ТСП-0193

Класс допуска	Допуск, °C
AA	$\pm(0,1+0,0017 t)$
A	$\pm(0,15+0,002 t)$
1/2B	$\pm(0,15+0,0025 t)$
B	$\pm(0,3+0,005 t)$

Таблица 4 – Допуски, соответствующие классам допуска

В данной работе используется вариант со следующими параметрами:

$$R_0 = 100 \text{ Ом (Pt100)}$$

$$\alpha = 0,00391 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

Класс допуска:

A (от -50 °C до +450 °C) с допуском $\pm(0,15 + 0,002|t|)$

1/2 B (св. +450 °C до +500 °C) с допуском $\pm(0,15 + 0,0025|t|)$

Рабочий диапазон измеряемых температур:

От -50 °C до +500 °C

Максимальный измерительный ток датчика $I_{\text{изм}} = 5,0 \text{ мА}$.

Для выбора эталонного (reference) сопротивления необходимо рассчитать такие параметры, как номинал, допуск и максимальную мощность.

Рассчитаем необходимый номинал эталонного сопротивления:

Номинал соответствует максимальному сопротивлению датчика, которое соответствует максимальной температуре (чем выше температура, тем выше сопротивление датчика). Рассчитаем сопротивление датчика при 500 °C, используя полиномы из паспорта на датчик (соответствуют ГОСТ 6651-2009):

2.7 Формулы для расчёта НСХ указаны ниже:

$\alpha, \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	Диапазон измерений, °C	Формула для расчёта НСХ	Значения постоянных A, B, C
0,00391	от -196 до 0	$R_t = R_0\{1 + At + Bt^2 + C(t - 100 \text{ } ^\circ\text{C})t^3\}$	$A = 3,9690 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ $B = -5,841 \times 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^{-2}$ $C = -4,330 \times 10^{-12} \text{ } ^\circ\text{C}^{-4}$
	от 0 до +660	$R_t = R_0\{1 + At + Bt^2\}$	

Таблица 5 – Формулы для расчёта сопротивления датчика по НСХ

$$R_t(500\text{ }^{\circ}\text{C}) = R_0 * (1 + A * t + B * t^2) = [R_0 = 100\text{ Ом}] =$$

$$= 100 * (1 + 3,969 * 10^{-3} * 500 - 5,841 * 10^{-7} * 500^2) = 283,8475\text{ Ом}$$

Номинал эталонного резистора должен быть больше либо равен 283,8475 Ом.

Рассчитаем максимальную мощность эталонного резистора:

Максимальный ток датчика 5,0 мА. Чтобы избежать саморазогрева, возьмём значение рабочего тока меньше. Нужно отметить, что при очень маленьком значении отношение сигнал/шум будет низким. Выберем меньше максимального, и чтобы мощность при 500 °С была меньше 1 мВт. Выбрано 1,5 мА:

$$P_{max} = I_{изм}^2 * R_t = (1,5 * 10^{-3})^2 * 284 = 0,639\text{ мВт}$$

Для работы необходим резистор с максимальной мощностью > 0,639 мВт.

Рассчитаем необходимый допуск эталонного резистора:

Найдём относительную ошибку измерения температуры этим датчиком (для выбора резистора, расчёт ошибки всего модуля произведён далее в работе):

$$\delta_{ТСП} = \frac{\text{допуск}}{\text{рабочий диапазон}} = \frac{0,15}{500 - (-50)} = \frac{0,15}{550} = 2,73 * 10^{-4} = 0,0273\% \approx 0,03\%$$

Максимальная абсолютная ошибка по ТЗ равна 0,5 °С (отн. ошибка 0,091%).

Корень из суммы квадратов ошибок (допусков, шумов) датчика, эталонного сопротивления, АЦП должен быть меньше 0,091%. Для оценки достаточного допуска эталонного сопротивления воспользуемся тем, что сумма модулей чисел будет больше или равна корню из суммы квадратов этих чисел. Значит, если сумма модулей ошибок меньше 0,091%, то и корень из суммы квадратов меньше.

$$\sqrt{\delta_{ТСП}^2 + \delta_{\text{этал.сопр.}}^2 + \delta_{\text{АЦП,шумы}}^2} \leq |\delta_{ТСП}| + |\delta_{\text{этал.сопр.}}| + |\delta_{\text{АЦП,шумы}}| \leq 0,091\%$$

Оставим на ошибки АЦП и шумы запас в 0,05% относительной ошибки.

Тогда:

$$|\delta_{ТСП}| + |\delta_{\text{этал.сопр.}}| + |\delta_{\text{АЦП,шумы}}| = 0,091\%$$

$$0,03\% + |\delta_{\text{этал.сопр.}}| + 0,05\% = 0,091\%$$

$$|\delta_{\text{этал.сопр.}}| = 0,091\% - 0,08\%$$

$$|\delta_{\text{этал.сопр.}}| = 0,011\%$$

Получаем, что допуск резистора должен быть не больше 0,011%.

По трём параметрам подходит резистор C2-29C-0,125^[7]:

- Доступный номинал из ряда E192: 284 Ом
- Номинальная мощность 125 мВт
- Доступный допуск по документации производителя: 0,01%

Вид	Номинальная мощность рассеяния, Вт	Диапазон сопротивлений, Ом, по ряду E192	Допускаемое отклонение сопротивления, ± %
C2-29C-0,125	0,125	10 – 19,8	0,05; 0,1; 0,25; 0,5
		20 – 98,8	0,02; 0,05; 0,1; 0,25; 0,5
		100 – 1×10 ⁵	0,01; 0,02; 0,05; 0,1; 0,25; 0,5
		св. 1×10 ⁵ – 1×10 ⁶	0,05; 0,1; 0,25; 0,5

Рисунок 3.2.3 – Документация на C2-29C-0,125

В качестве датчика Pt1000 был выбран 700-102BAA-B00 производителя Honeywell:



Рисунок 3.2.4 – Внешний вид ЧЭ 700-102BAA-B00

Он имеет следующие характеристики^[8]:

Catalog Listing	Nominal Resistance @ 0 °C	Temp. Coefficient	Temp. Range (°C)	Tolerance	Termination
700-102BAA-B00	1000 Ω	3850 ppm/K	-70 to 500	DIN EN 60751, class A (R ₀ : ±0.06 %)	Bare Pt-clad Ni wire, adjacent leads

Рисунок 3.2.5 – Скриншот из документации на 700-ю серию ТСП Honeywell

$R_0 = 1000 \text{ Ом (Pt1000)}$

$\alpha = 0,00385 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$

Класс допуска:

A с допуском $\pm 0,06\% * R_0$ (допуск в градусах $\pm 0,15 \text{ } ^\circ\text{C}$)

Рабочий диапазон измеряемых температур:

От $-70 \text{ } ^\circ\text{C}$ до $+500 \text{ } ^\circ\text{C}$

	700-*
Self heating	0.4 K/mW at 0 °C
Measuring current	100 Ω: 0.3 mA to 1.0 mA 1000 Ω: 0.1 mA to 0.3 mA

Рисунок 3.2.6 – Скриншот из документации на 700-ю серию ТСП Honeywell

Максимальный ток: 0,3 мА.

Саморазогрев: 0,4 градуса на 1 мВт

Саморазогрев датчика:

Максимальный ток датчика 0,3 мА. Если сделать данное значение меньшим, отношение сигнал/шум будет недостаточным для того, чтобы эффективно измерять температуру. Рассмотрим работу при максимальном токе и найдём ошибку, вызываемую саморазогревом датчика:

$$P_0 = I_{\text{изм}}^2 * R_0 = (0,3 * 10^{-3})^2 * 10^3 = 0,09 \text{ мВт}$$

$$\Delta_{\text{самораз.}} = P_{0, \text{мВт}} * 0,4 = 0,09 * 0,4 = 0,036 \text{ } ^\circ\text{C}$$

При допуске датчика 0,150 °C общая ошибка составляет 0,186 °C. Видно, что мы можем использовать ток 0,3 мА.

Аналогично предыдущим расчётам, необходимо рассчитать номинал, мощность и допуск эталонного резистора для данного датчика.

Рассчитаем необходимый номинал эталонного сопротивления:

Рассчитаем сопротивление датчика при 500 °C, используя полиномы из зарубежного стандарта DIN EN 60751.

For the temperature range -200 ... 0 °C the following applies, irrespective of the resistor design:

$$R_t = R_0 [1 + At + Bt^2 + C(t - 100 \text{ } ^\circ\text{C}) \cdot t^3]$$

For the temperature range 0 ... 600 °C the following applies:

$$R_t = R_0 [1 + At + Bt^2]$$

Legend:

t = Temperature in °C

R_t = Resistance in ohms at the measured temperature

R₀ = Resistance in ohms at t = 0 °C (e.g. 100 ohms)

For the calculation, the following constants apply

$$A = 3.9083 \cdot 10^{-3} \text{ (} ^\circ\text{C}^{-1} \text{)}$$

$$B = -5.7750 \cdot 10^{-7} \text{ (} ^\circ\text{C}^{-2} \text{)}$$

$$C = -4.1830 \cdot 10^{-12} \text{ (} ^\circ\text{C}^{-4} \text{)}$$

Рисунок 3.2.7 – Скриншот из статьи «Operating limits and tolerances of platinum resistance thermometers per DIN EN IEC 60751»

$R_t(500\text{ }^{\circ}\text{C}) = R_0 * (1 + A * t + B * t^2) = [R_0 = 1000\text{ Ом}] =$
 $= 1000 * (1 + 3,9083 * 10^{-3} * 500 - 5,775 * 10^{-7} * 500^2) = 2809,775\text{ Ом}$
 Номинал эталонного резистора должен быть больше либо равен 2809,775 Ом.

Расчёт максимальной мощности эталонного резистора:

$$P_{max} = I_{изм}^2 * R_0 = (0,3 * 10^{-3})^2 * 2840 = 0,2556\text{ мВт} \approx 0,26\text{ мВт}$$

Расчёт необходимого допуска эталонного резистора:

Ошибка ТСП с учётом саморазогрева = 0,186 °C

Относительная ошибка ТСП с учётом саморазогрева:

$$\delta_{ТСП} = \frac{\text{ошибка ТСП}}{\text{рабочий диапазон}} = \frac{0,186}{500 - (-50)} = \frac{0,186}{550} = 3,382 * 10^{-4} = 0,03382\% \approx$$

$$\approx 0,034\%$$

См. расчёт для ТСП-0193 (сумма модулей берётся как худший случай),
оставим запас на ошибки АЦП и шумы в 0,045%

$$|\delta_{ТСП}| + |\delta_{\text{этал.сопр.}}| + |\delta_{\text{АЦП,шумы}}| = 0,091\%$$

$$0,034\% + |\delta_{\text{этал.сопр.}}| + 0,045\% = 0,091\%$$

$$|\delta_{\text{этал.сопр.}}| = 0,091\% - 0,079\%$$

$$|\delta_{\text{этал.сопр.}}| = 0,012\%$$

Получаем, что допуск резистора должен быть не больше 0,012%.

По трём параметрам подходит резистор C2-29C-0,125^[7]:

- Доступный номинал из ряда E192: 2840 Ом
- Номинальная мощность 125 мВт
- Доступный допуск по документации производителя: 0,01%

Вид	Номинальная мощность рассеяния, Вт	Диапазон сопротивлений, Ом, по ряду E192	Допускаемое отклонение сопротивления, ± %
C2-29C-0,125	0,125	10 – 19,8	0,05; 0,1; 0,25; 0,5
		20 – 98,8	0,02; 0,05; 0,1; 0,25; 0,5
		100 – 1×10 ⁵	0,01; 0,02; 0,05; 0,1; 0,25; 0,5
		св. 1×10 ⁵ – 1×10 ⁶	0,05; 0,1; 0,25; 0,5

Рисунок 3.2.8 – Документация на C2-29C-0,125

3.3 Расчёт разрядности и выбор АЦП

В пункте 3.2 на ошибки АЦП и шумы был оставлен запас 0,05% для Pt100 и 0,045% для Pt1000 (см. расчёт необходимого допуска эталонного резистора).

Значит, необходимо выбрать АЦП, общая ошибка которого (с учётом систематических и случайных ошибок, а также ошибки квантования, которая зависит от разрядности) будет меньше 0,045%.

Параметры выбора:

- **Разрядность** – влияет на ошибку квантования, а также в данной работе особенностью выбранной схемы является наличие постоянной составляющей в коде АЦП, что снижает эффективную разрядность;
- **Питание** – необходимость во внешнем преобразователе напряжения или ИОН, потребляемый ток;
- Наличие встроенного **I2C интерфейса**;
- Величина **RMS-шума**;
- **Интегральная нелинейность** – представляет собой максимальное отклонение любого кода от прямой линии, проведенной через крайние точки передаточной функции АЦП. Крайними точками являются: нулевая, находящаяся на 0.5LSB ниже точки появления первого кода, и последняя — на 0.5LSB выше граничного кода шкалы^[9].



Рисунок 3.3.1 – Отклонения выходного кода АЦП от идеальной характеристики

- Дифференциальная нелинейность** (иногда называемая дифференциальной ошибкой линейности) – представляет собой разницу между измеренной (реальной) и идеальной шириной 1 кванта (1 МЗР) АЦП. Если ширина 1 кванта точно равна 1 МЗР, то дифференциальная нелинейность равна 0. Если дифференциальная нелинейность больше 1 МЗР (то есть ширина кванта больше 1,5 МЗР), преобразование может перестать быть монотонным. Это значит, что значение выхода при увеличении входного сигнала может становиться меньше (в АЦП или ЦАП). Для АЦП это также означает возможность пропуска некоторых кодов, то есть 1 или несколько из возможных 2^N кодов никогда не будут выведены^[10].

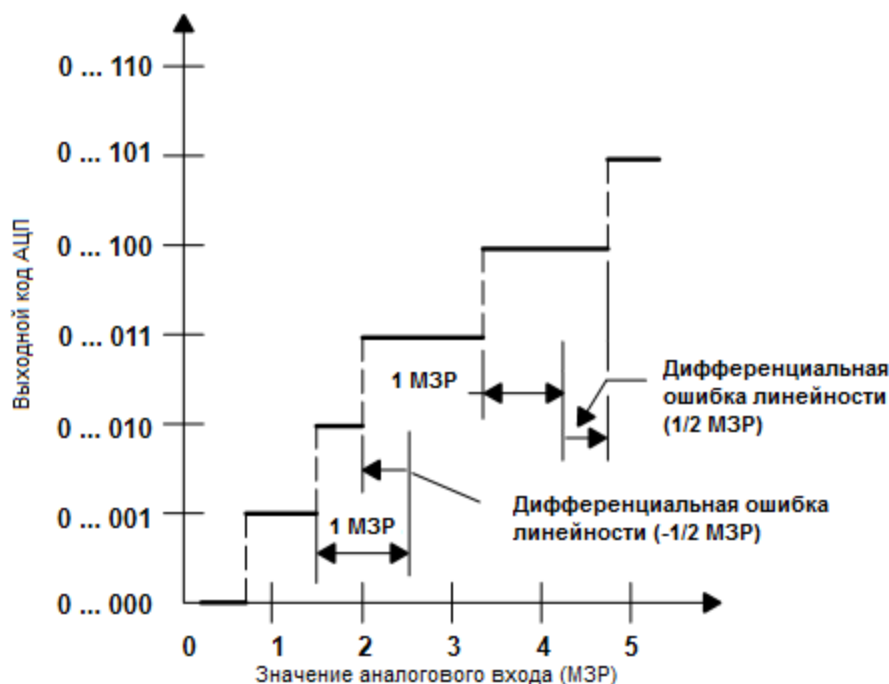


Рисунок 3.3.2 – Дифференциальная нелинейность реальной передаточной характеристики АЦП

- Ошибка смещения** – систематическая ошибка, по величине равная выходному коду АЦП при нулевом входном сигнале;
- Ошибка усиления** – систематическая ошибка (определяемая при нулевой ошибке смещения), равная отклонению реальной

передаточной характеристики от идеальной при максимальном значении выходного кода (111..111) (full-scale).

- **Общая некомпенсированная ошибка** – ошибка, являющаяся комбинацией ошибок квантования, смещения, усиления, и интегральной и дифференциальной нелинейностей. Другими словами, это максимальное отклонение реальной передаточной характеристики от идеальной при любом входном напряжении.

Первичный выбор АЦП можно произвести на основе суммы общей некомпенсированной ошибки и RMS-шума. Правильность выбора будет подкреплена расчётами далее.

Был выбран LTC2483^[11].

LTC2483 имеет следующие характеристики (макс. значения):

- **Разрядность:**
16 бит
- **Ошибки:**
Интегральная нелинейность 10 ppm от U_{ref} ;
Ошибка смещения 2,5 мкВ;
Ошибка усиления (Positive/Negative FSR) 25 ppm от U_{ref} ;
Общая некомпенсированная ошибка 15 ppm от U_{ref} ;
- **Шумы:**
RMS-шум (или выходной шум) 0,6 мкВ;
Шум квантования $U_{ref}/2^{17}$;
- **Минимальный измеряемый диапазон (U_{ref}):**
От 0 до 100 мВ;
- **Максимальный измеряемый диапазон (U_{ref}):**
От 0 до $U_{пит}$;
- **Питание:** напряжение от 2,7 до 5,5 В, ток максимум 250 мкА;
- **I2C-интерфейс;**
- **Токи утечки:** ± 10 нА для $U_{ВХ\pm}$ и ± 100 нА для $U_{REF\pm}$

1) Эталонное напряжение

Для вычисления ошибок и шумов нужно найти U_{ref} для каждого из датчиков:

$$U_{refPt100} = I_{изм} * R_{этал} = 1,5 \text{ мА} * 284 \text{ Ом} = 0,426 \text{ В} > \text{минимума } 100 \text{ мВ}$$

$$U_{refPt1000} = I_{изм} * R_{этал} = 0,3 \text{ мА} * 2840 \text{ Ом} = 0,852 \text{ В} > \text{минимума } 100 \text{ мВ}$$

Питание далее выберем не менее 0,852 В.

Вывод: АЦП по диапазону эталонного напряжения подходит для измерения.

2) Суммарная ошибка

Для Pt100:

$$\delta_{общ.нескомп.} = 0,0015\%$$

$$\delta_{квант} = \frac{U_{refPt100}}{2^{17} * U_{refPt100}} = \frac{1}{2^{17}} = 3,815 * 10^{-4}\% \quad - \quad \text{ВХОДИТ} \quad \text{В} \quad \text{общую}$$

нескомпенсированную ошибку (см. определение выше).

$$\delta_{RMS} = \frac{0,6 * 10^{-6} \text{ В}}{U_{refPt100}} = \frac{0,6 * 10^{-6} \text{ В}}{0,426 \text{ В}} = 1,4 * 10^{-4}\%$$

В сумме получается $0,0015\% + 0,00014\% = 0,00164\%$. Данное значение меньше 0,05% (см. расчёт допуска эталонного резистора, там был оставлен такой запас), значит АЦП подходит по сумме общей нескомпенсированной ошибки и RMS-шума, что позволяет нам перейти к дальнейшим расчётам.

Для Pt1000:

Меняется только δ_{RMS} :

$$\delta_{RMS} = \frac{0,6 * 10^{-6} \text{ В}}{U_{refPt1000}} = \frac{0,6 * 10^{-6} \text{ В}}{0,852 \text{ В}} = 0,7 * 10^{-4}\%$$

В сумме получается $0,0015\% + 0,00007\% = 0,00157\%$. Данное значение меньше 0,045% (см. расчёт допуска эталонного резистора), АЦП подходит по сумме общей нескомпенсированной ошибки и RMS-шума, что позволяет нам перейти к дальнейшим расчётам.

Из-за особенностей схемы часть диапазона измерения, от 0 до выходного кода АЦП при измерении сопротивления датчика при температуре в $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$, не используется при измерениях.



Рисунок 3.3.3 – Диапазон изменения сопротивления датчика

Расчёт сопротивления датчика Pt100 при $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ (см. п. 3.2 табл. 5):

Общие формулы:

$$R_t = R_0 * (1 + A * t + B * t^2 + C * (t - 100\text{ }^{\circ}\text{C}) * t^3)$$

$$A = 3,969 * 10^{-3} * ^{\circ}\text{C}^{-1};$$

$$B = -5,841 * 10^{-7} * ^{\circ}\text{C}^{-2};$$

$$C = -4,33 * 10^{-12} * ^{\circ}\text{C}^{-4};$$

Сам расчёт:

$$R_t = 100 * (1 + 3,969 * 10^{-3} * ^{\circ}\text{C}^{-1} * (-50) + (-5,841 * 10^{-7} * ^{\circ}\text{C}^{-2}) * 250 + (-4,33 * 10^{-12} * ^{\circ}\text{C}^{-4}) * (-50 - 100) * (-50)^3) = 80\text{ Ом}$$

Расчёт напряжения датчика Pt100 при $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$:

$$U_t(-50^{\circ}\text{C}) = I_{\text{изм}} * R_t = 1,5 * 10^{-3} * 80 = 0,120\text{ В}$$

Расчёт эффективной разрешающей способности АЦП для Pt100:

Обозначим D_{max} – выходной код АЦП при 500°C , D_{min} – при $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$, N – разрядность АЦП ($N = 16$). Тогда^[12]:

$$D_{\text{max}} = \frac{R_t(500^{\circ}\text{C})}{R_{\text{этал}}} * (2^N - 1) = \frac{283,8475}{284} * (2^{16} - 1) = 65499,81 \approx 65500$$

$$D_{\text{min}} = \frac{R_t(-50^{\circ}\text{C})}{R_{\text{этал}}} * (2^N - 1) = \frac{80}{284} * (2^{16} - 1) = 18460,76 \approx 18461$$

Из 2^{16} кодов используется следующее количество:

$$D_{\text{max}} - (D_{\text{min}} - 1) = 65500 - 18460 = 47040$$

Ошибка квантования равна $\frac{1}{2}$ МЗР. В данном случае нас интересует ошибка измерения именно в диапазоне от -50 до 500 градусов Цельсия. Поэтому и ошибку квантования мы рассчитываем для этого диапазона:

$$\delta_{\text{квант.}} = \frac{0,5}{D_{\text{max}} - (D_{\text{min}} - 1)} = \frac{0,5}{47040} = 0,001063\%$$

Расчёт общей ошибки АЦП для Pt100:

Ошибки смещения, усиления – систематические, поэтому алгебраически суммируются. Ошибки квантования, интегральная и дифференциальная нелинейность (отсутствующая в документации на данный АЦП), а также RMS-шум – случайные ошибки, нужно вычислить корень из суммы их квадратов. Полученный корень нужно сложить с суммой систематических ошибок:

$$\begin{aligned} \delta_{\text{АЦП}} &= \sqrt{\delta_{\text{квант.}}^2 + \delta_{\text{интегр.нелин.АЦП}}^2 + \delta_{\text{RMS-шум}}^2 + \delta_{\text{смещения}} + \delta_{\text{усиления}} =} \\ &= \left[\delta_{\text{смещения}} = \frac{2,5 * 10^{-6} \text{ В}}{U_{\text{ref}}} = \frac{2,5 * 10^{-6} \text{ В}}{0,426 \text{ В}} = 5,869 * 10^{-4} \% \right] = \\ &= \sqrt{(0,001063\%)^2 + 10^{-6}\%^2 + (1,4 * 10^{-4}\%)^2 + 5,869 * 10^{-4}\%} \\ &+ 25 * 10^{-4}\% = 0,00417\% \end{aligned}$$

$0,00417\% < 0,05\%$, из чего следует, что АЦП проходит по точности.

Расчёт сопротивления датчика Pt1000 при -50 °C (см. п. 3.2 рис. 8):

Общие формулы:

$$R_t = R_0 * (1 + A * t + B * t^2 + C * (t - 100 \text{ °C}) * t^3)$$

$$A = 3,9083 * 10^{-3} * \text{°C}^{-1};$$

$$B = -5,7750 * 10^{-7} * \text{°C}^{-2};$$

$$C = -4,1830 * 10^{-12} * \text{°C}^{-4};$$

Сам расчёт:

$$\begin{aligned} R_t &= 1000 * (1 + 3,9083 * 10^{-3} * \text{°C}^{-1} * (-50) + (-5,7750 * 10^{-7} * \text{°C}^{-2}) * \\ &* 250 + (-4,1830 * 10^{-12} * \text{°C}^{-4}) * (-50 - 100) * (-50)^3) = 803,063 \text{ Ом} \end{aligned}$$

Расчёт напряжения датчика Pt1000 при -50 °C:

$$U_t(-50^{\circ}\text{C}) = I_{\text{изм}} * R_t = 0,3 * 10^{-3} * 803,063 = 0,241 \text{ В}$$

Расчёт эффективной разрешающей способности АЦП для Pt1000:

Обозначим D_{max} – выходной код АЦП при 500°C, D_{min} – при -50 °C, N – разрядность АЦП ($N = 16$). Тогда:

$$D_{\text{max}} = \frac{R_t(500^{\circ}\text{C})}{R_{\text{этал}}} * (2^N - 1) = \frac{2809,775}{2840} * (2^{16} - 1) = 64837,54 \approx 64838$$

$$D_{\text{min}} = \frac{R_t(-50^{\circ}\text{C})}{R_{\text{этал}}} * (2^N - 1) = \frac{803,063}{2840} * (2^{16} - 1) = 18531,24 \approx 18531$$

Из 2^{16} кодов используется следующее количество:

$$D_{\text{max}} - (D_{\text{min}} - 1) = 64838 - 18530 = 46308$$

Ошибка квантования равна $\frac{1}{2}$ МЗР. В данном случае нас интересует ошибка измерения именно в диапазоне от -50 до 500 градусов Цельсия. Поэтому и ошибку квантования мы рассчитываем для этого диапазона:

$$\delta_{\text{квант.}} = \frac{0,5}{D_{\text{max}} - (D_{\text{min}} - 1)} = \frac{0,5}{46308} = 0,00108\%$$

Расчёт общей ошибки АЦП для Pt1000:

Ошибки смещения, усиления – систематические, поэтому алгебраически суммируются. Ошибки квантования, интегральная и дифференциальная нелинейность (отсутствующая в документации на данный АЦП), а также RMS-шум – случайные ошибки, нужно вычислить корень из суммы их квадратов. Полученный корень нужно сложить с суммой систематических ошибок:

$$\begin{aligned} \delta_{\text{АЦП}} &= \sqrt{\delta_{\text{квант.}}^2 + \delta_{\text{интегр.нелин.АЦП}}^2 + \delta_{\text{RMS-шум}}^2 + \delta_{\text{смещения}} + \delta_{\text{усиления}}} = \\ &= \left[\delta_{\text{смещения}} = \frac{2,5 * 10^{-6}}{U_{\text{ref}}} = \frac{2,5 * 10^{-6}}{0,852} = 2,934 * 10^{-4}\% \right] = \\ &= \sqrt{(0,00108\%)^2 + 10^{-6}\%^2 + (0,7 * 10^{-4}\%)^2 + 2,934 * 10^{-4}\% +} \\ &+ 25 * 10^{-4}\% = 0,00387\% \end{aligned}$$

$0,00387\% < 0,045\%$, из чего следует, что АЦП проходит по точности.

3.4 Расчёт тепловых шумов

Рассчитаем значение шума сопротивлений по формуле Найквиста^[13].

$$k = 1,380649 \cdot 10^{-23} \frac{\text{Дж}}{\text{К}} - \text{постоянная Больцмана}$$

$$T_{Rt} = 500 + 273,15 = 773,15 \text{ К} - \text{макс. темп. среды вокруг ТСП, в К.}$$

$$T_{R\text{этал}} = 25 + 273,15 = 298,15 \text{ К} - \text{температура комнаты с } R_{\text{этал}}, \text{ в К.}$$

$$\Delta f = 1 \text{ Гц} - \text{взято мин. значение частоты, так как частота не меняется}$$

Pt100:

$$U_{\text{тш } Rt} = \sqrt{4k \cdot T_{Rt} \cdot R_t \cdot \Delta f} = \sqrt{4k \cdot 773,15 \cdot 283,8475 \cdot 1} = 3,481 \cdot 10^{-9} \text{ В} - \text{значение теплового шума датчика Pt100.}$$

$$\delta_{\text{тш } Rt} = \frac{U_{\text{тш } Rt}}{U_{Rt}} = \frac{3,481 \cdot 10^{-9} \text{ В}}{I_{\text{изм}} \cdot R_t} = \frac{3,481 \cdot 10^{-9} \text{ В}}{1,5 \cdot 10^{-3} \text{ А} \cdot 283,8475 \text{ Ом}} = \frac{3,481 \cdot 10^{-9}}{0,426} = 8,171 \cdot 10^{-7} \%$$

$$U_{\text{тш } R\text{этал}} = \sqrt{4k \cdot T_{R\text{этал}} \cdot R_t \cdot \Delta f} = \sqrt{4k \cdot 298,15 \cdot 284 \cdot 1} = 2,162 \cdot 10^{-9} \text{ В} - \text{значение теплового шума образцового сопротивления для Pt100.}$$

$$\delta_{\text{тш } R\text{этал}} = \frac{U_{\text{тш } R\text{этал}}}{U_{R\text{этал}}} = \frac{2,162 \cdot 10^{-9} \text{ В}}{I_{\text{изм}} \cdot R_{\text{этал}}} = \frac{2,162 \cdot 10^{-9} \text{ В}}{1,5 \cdot 10^{-3} \text{ А} \cdot 284 \text{ Ом}} = \frac{2,162 \cdot 10^{-9}}{0,426} = 5,075 \cdot 10^{-7} \%$$

Pt1000:

$$U_{\text{тш } Rt} = \sqrt{4k \cdot T_{Rt} \cdot R_t \cdot \Delta f} = \sqrt{4k \cdot 773,15 \cdot 2809,775 \cdot 1} = 1,095 \cdot 10^{-8} \text{ В} - \text{значение теплового шума датчика для Pt1000.}$$

$$\delta_{\text{тш } Rt} = \frac{U_{\text{тш } Rt}}{U_{Rt}} = \frac{1,095 \cdot 10^{-8} \text{ В}}{I_{\text{изм}} \cdot R_t} = \frac{1,095 \cdot 10^{-8} \text{ В}}{0,3 \cdot 10^{-3} \text{ А} \cdot 2809,775 \text{ Ом}} = \frac{1,095 \cdot 10^{-8}}{0,843} = 1,299 \cdot 10^{-6} \%$$

$$U_{\text{тш } R\text{этал}} = \sqrt{4k \cdot T_{R\text{этал}} \cdot R_t \cdot \Delta f} = \sqrt{4k \cdot 298,15 \cdot 2840 \cdot 1} = 6,838 \cdot 10^{-9} \text{ В} - \text{значение теплового шума образцового сопротивления для Pt1000.}$$

$$\delta_{\text{тш } R\text{этал}} = \frac{6,838 \cdot 10^{-9} \text{ В}}{I_{\text{изм}} \cdot R_{\text{этал}}} = \frac{6,838 \cdot 10^{-9} \text{ В}}{0,3 \cdot 10^{-3} \text{ А} \cdot 2840 \text{ Ом}} = \frac{6,838 \cdot 10^{-9}}{0,852} = 8,026 \cdot 10^{-7} \%$$

Вывод: относительные ошибки, вызванные тепловыми шумами резисторов, на несколько порядков меньше других ошибок, и практически не оказывают влияния на результат измерения, значит, ими можно пренебречь.

3.5 Четырёхпроводная схема подключения

Согласно техническому заданию, в работе нужно реализовать 4-проводную схему подключения. Она используется, если чувствительный элемент и остальная схема удалены друг от друга. Для того, чтобы сопротивление проводов не влияло на результат измерения, в такой схеме отдельная пара проводов подключается к АЦП и отвечает за измерение напряжения на выводах ЧЭ. Другая пара проводов подключается к источнику тока или напряжения и отвечает за возбуждение ЧЭ.

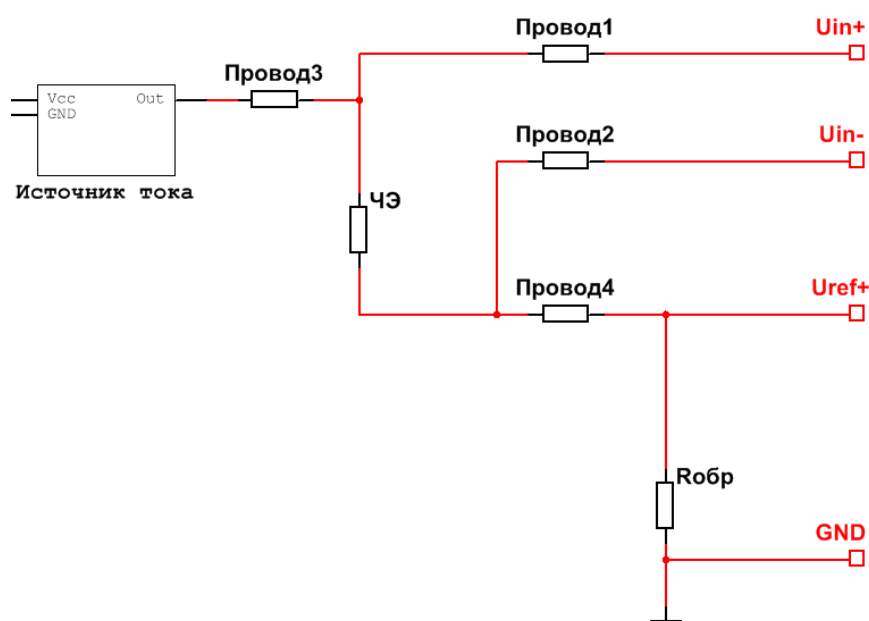


Рисунок 3.5.1 – Четырёхпроводная схема подключения

Для реализации линии связи используют экранированный кабель МКЭШ 5х0,35 или 5х0,75. Максимальное расстояние ограничено сопротивлением каждой жилы: не более 15 Ом. Поэтому, чем длиннее линия связи, тем больше диаметр сечения кабеля.

1. Если расстояние < 20 метров, то кабель с диаметром 0,35 мм
2. Если расстояние от 20 метров до 100 метров, то кабель 0,75 мм.

В качестве разъёма можно использовать GX16 (M16-04FC «мама» и M16-04MC «папа»).

3.6 Подавление наводок

Для подавления синфазной помехи от промышленных линий питания (50 Гц), действующей одинаково на дифференциальные пары линий (U_{BX+} и U_{BX-} , U_{REF+} и U_{REF-}), необходимо предусмотреть RC-фильтры.^[14] С запасом на шумы около 0,04%, необходимо предусмотреть, чтобы нестабильные токи утечки, протекая через резисторы фильтров, не генерировали ошибки больше 0,01%. Также для больших номиналов резисторов будет генерироваться большой тепловой шум, поэтому лучше выбрать резисторы номиналом менее 3 кОм.

$I_{DC_LEAK}(IN^+)$	IN^+ DC Leakage Current	Sleep Mode, $IN^+ = GND$	●	-10	1	10	nA
$I_{DC_LEAK}(IN^-)$	IN^- DC Leakage Current	Sleep Mode, $IN^- = GND$	●	-10	1	10	nA
$I_{DC_LEAK}(V_{REF})$	REF^+ , REF^- DC Leakage Current	Sleep Mode, $V_{REF} = V_{CC}$	●	-100	1	100	nA

Рисунок 3.6.1 – Токи утечки входов АЦП

Рассмотрим случай, когда токи утечки разнонаправленны. Допустим, в U_{REF+} втекает ток +100 нА, ток утечки конденсатора $I_{ут}$, а из U_{REF-} вытекает ток -100 нА, ток утечки нижнего конденсатора $I_{ут}$ (так как конденсаторы предполагаются одинаковые, токи утечки компенсируют друг друга).

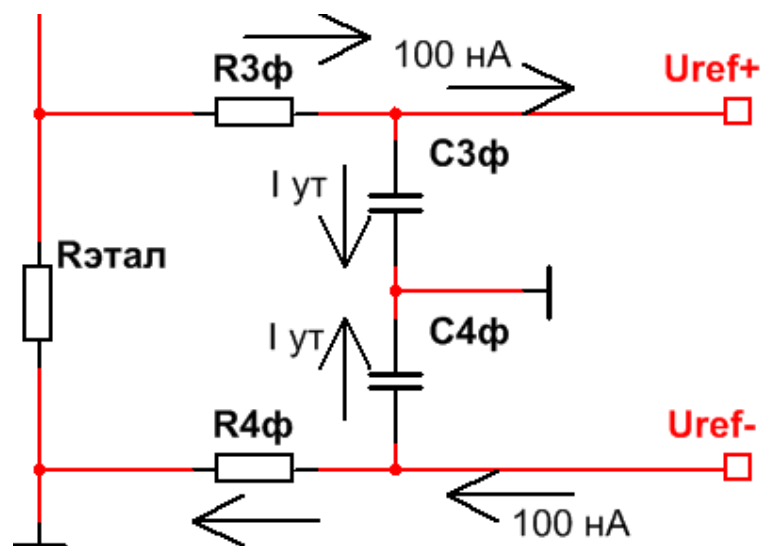


Рисунок 3.6.2 – Токи утечки входов АЦП

По 1-му правилу Кирхгофа ток через $R_{3\Phi}$ будет равен сумме токов, вытекающих из узла ($100 \text{ нА} + I_{ут}$). Ток через $R_{4\Phi}$ равен ($100 \text{ нА} - I_{ут}$). При равенстве $R_{3\Phi} = R_{4\Phi}$ абсолютная погрешность будет равна:

$$\Delta U_{\text{этал}} = (100 \text{ нА} + I_{ут}) * R_{3\Phi} + (100 \text{ нА} - I_{ут}) * R_{4\Phi} = [R_{3\Phi} = R_{4\Phi}] = \\ = 200 \text{ нА} * R_{3\Phi}$$

А относительная:

$$\delta_{\text{этал}} = \frac{\Delta U_{\text{этал}}}{U_{\text{этал}}}$$

Для Pt100:

$$\delta_{\text{этал}} = \frac{(200 \text{ нА} * R_{3\Phi})}{0,426 \text{ В}} \leq 0,01\% - \delta_{\text{вх}}$$

Для Pt1000:

$$\delta_{\text{этал}} = \frac{(200 \text{ нА} * R_{3\Phi})}{0,852 \text{ В}} \leq 0,01\% - \delta_{\text{вх}}$$

$\delta_{\text{вх}}$ – обозначение ошибки, вызванной втеканием тока 10 нА во вход $U_{\text{ВХ+}}$, при токе утечки конденсатора $I_{ут}$, а также вытеканием тока 10 нА из входа $U_{\text{ВХ-}}$ при токе утечки конденсатора $I_{ут}$ (конденсаторы одинаковые), при минимальном входном сигнале (при $-50 \text{ }^{\circ}\text{C}$ это $0,241 \text{ В}$ для Pt1000 и $0,120 \text{ В}$ для Pt100).

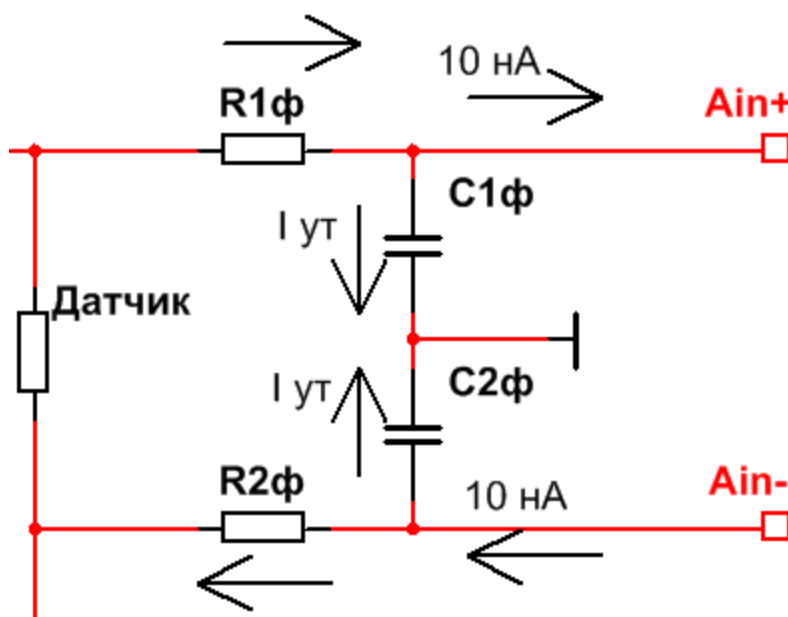


Рисунок 3.6.3 – Токи утечки входов АЦП

$$\Delta U_{\text{вх}} = 10 \text{ нА} * R_{1\Phi} + 10 \text{ нА} * R_{2\Phi} = [R_{1\Phi} = R_{2\Phi}] = 20 \text{ нА} * R_{1\Phi}$$

Для Pt100:

$$\delta_{\text{вх}} = \frac{(20 \text{ нА} * R_{1\Phi})}{U_{\text{вх}}} = \frac{(20 \text{ нА} * R_{1\Phi})}{0,120 \text{ В}}$$

Для Pt1000:

$$\delta_{\text{вх}} = \frac{(20 \text{ нА} * R_{1\Phi})}{U_{\text{вх}}} = \frac{(20 \text{ нА} * R_{1\Phi})}{0,241 \text{ В}}$$

Для того, чтобы влияние помех сказывалось в равной степени на напряжении как датчика, так и эталонного сопротивления, необходимо, чтобы номиналы резисторов фильтров совпадали: $R_{1\Phi} = R_{2\Phi} = R_{3\Phi} = R_{4\Phi}$.

Сумма ошибок напряжений входа и эталонного напряжения, вызванная токами утечек, должна быть меньше 0,01%:

Для Pt100:

$$\frac{(200 \text{ нА} * R_{3\Phi})}{0,426 \text{ В}} + \frac{(20 \text{ нА} * R_{1\Phi})}{0,120 \text{ В}} \leq 0,01\%$$

Для Pt1000:

$$\frac{(200 \text{ нА} * R_{3\Phi})}{0,852 \text{ В}} + \frac{(20 \text{ нА} * R_{1\Phi})}{0,241 \text{ В}} \leq 0,01\%$$

Так как $R_{1\Phi} = R_{3\Phi}$:

Для Pt100:

$$R_{1\Phi} * \left(\frac{(200 \text{ нА})}{0,426 \text{ В}} + \frac{(20 \text{ нА})}{0,120 \text{ В}} \right) \leq 0,01\%$$

$$R_{1\Phi} = \frac{(0,01\% = 10^{-4})}{\left(\frac{(200 \text{ нА})}{0,426 \text{ В}} + \frac{(20 \text{ нА})}{0,120 \text{ В}} \right)} = 157,196 \text{ Ом (подходит 150 Ом)}$$

Для Pt1000:

$$R_{3\Phi} * \left(\frac{(200 \text{ нА} * R_{3\Phi})}{0,852 \text{ В}} + \frac{(20 \text{ нА} * R_{1\Phi})}{0,241 \text{ В}} \right) \leq 0,01\%$$

$$R_{3\Phi} = \frac{(0,1\% = 10^{-4})}{\left(\frac{(200 \text{ нА})}{0,852 \text{ В}} + \frac{(20 \text{ нА})}{0,241 \text{ В}} \right)} = 314,733 \text{ Ом (подходит 316 Ом)}$$

Промышленная частота 50 Гц. Частота среза даёт ослабление сигнала в -3 дБ, и, так как это пассивные фильтры первого порядка, далее идёт падение -20 дБ/дек. Выберем частоту среза равной 5 Гц. Тогда помеха будет ослаблена на 23 дБ. Найдём необходимую ёмкость конденсаторов:

$$f_{\text{ср}} = 5 \text{ Гц}$$

$$C_{\text{ф Pt100}} = \frac{1}{2\pi * f_{\text{ср}} * R_{\text{ф}}} = \frac{1}{2\pi * 5 * 150} = 212,2 \text{ мкФ}$$

$$C_{\text{ф Pt1000}} = \frac{1}{2\pi * f_{\text{ср}} * R_{\text{ф}}} = \frac{1}{2\pi * 5 * 316} = 100,7 \text{ мкФ}$$

Подойдут конденсаторы с бóльшим номиналом, поскольку так частота среза будет меньше.

Рассмотрим влияние наводки $U_0 = 100 \text{ мВ}$ 50 Гц на измерения. Обозначим U_1 размах наводки после прохождения фильтра. Для 50 Гц ослабление 23 дБ.

$$-23 \text{ дБ} = 20 * \lg\left(\frac{U_1}{U_0}\right)$$

$$-23 \text{ дБ} = 20 * \lg\left(\frac{U_1}{0,1}\right)$$

$$-\frac{23}{20} = \lg\left(\frac{U_1}{0,1}\right)$$

$$\frac{U_1}{0,1} = 10^{-\frac{23}{20}}$$

$$U_1 = 0,1 * 10^{-\frac{23}{20}} \text{ В} = 0,1 * 10^{-3} \text{ В} = 1 * 10^{-4} \text{ В}$$

На наводку остаётся 0,03% относительной ошибки.

Для Pt100:

$$\delta_{\text{наводки}} = \frac{1 * 10^{-4} \text{ В}}{0,426 \text{ В}} = 0,024\%$$

Для Pt1000:

$$\delta_{\text{наводки}} = \frac{1 * 10^{-4} \text{ В}}{0,852 \text{ В}} = 0,012\%$$

Вывод: наводка достаточно эффективно фильтруется при помощи RC-фильтров.

3.6.1 Выбор моделей конденсаторов и резисторов фильтров

Были выбраны керамические конденсаторы X5R 22206D107KAT2A^[18].

Они имеют следующие характеристики:

- **Номинальное напряжение** 6,3 В

(макс. напряжение в схеме – у Pt1000 на 500 °С, при токе 0,3 мА на последовательном соединении датчика и эталонного резистора падает 1,7 В)

- **Номинальная ёмкость** 100 мкФ (в случае с Pt100 ставятся два конденсатора параллельно и ток утечки увеличивается вдвое)

- **Допуск** $\pm 10\%$

- **Сопротивление изоляции** ($500 \text{ МОм} / 107 \text{ мкФ} = 4,67 \text{ МОм}$)

- **Макс. ток утечки** $I_{\text{УТ}} = 6 \text{ В} / 4,67 \text{ МОм} = 1,3 \text{ мкА}$

- **Код заказа: 12066D107KAT2A**

Были выбраны резисторы С2-29С-0,125^[7]:

- **Номинальное сопротивление** (фильтр Pt100) 150 Ом, (Pt1000) 316 Ом.

- **Допуск** $\pm 0,1\%$

- **Макс. мощность** 125 мВт

Расчёт мощности, рассеиваемой на резисторах

Пренебрегаем токами утечки входов АЦП ($100 \text{ нА} \ll 1,3 \text{ мкА}$).

Пренебрегаем наводкой 100 мВ 50 Гц.

Pt100:

$$P_{\phi} = (1,3 \text{ мкА} + 1,3 \text{ мкА})^2 * 150 \text{ Ом} = 0,001 \text{ мкВт}$$

Pt1000:

$$P_{\phi} = (1,3 \text{ мкА})^2 * 316 \text{ Ом} = 0,00054 \text{ мкВт}$$

Расчёт частот среза фильтров с ошибкой ёмкости -10% (-10 мкФ)

$$f_{\text{ср pt100}} = \frac{1}{2\pi * C_{\phi} * R_{\phi}} = \frac{1}{2\pi * (2 * 90 * 10^{-6}) * 150} = 5,9 \text{ Гц}$$

$$f_{\text{ср pt1000}} = \frac{1}{2\pi * C_{\phi} * R_{\phi}} = \frac{1}{2\pi * (90 * 10^{-6}) * 316} = 5,6 \text{ Гц}$$

3.7 Источники тока

Прецизионный источник тока на двух операционных усилителях (так же называемый улучшенным источником тока Хауланда, поскольку от обычного ИТ Хауланда его отличает дополнительный операционный усилитель) является подходящим выбором для схем с низкими выходными токами (1,5 мА и 0,3 мА в этой работе).^[15]

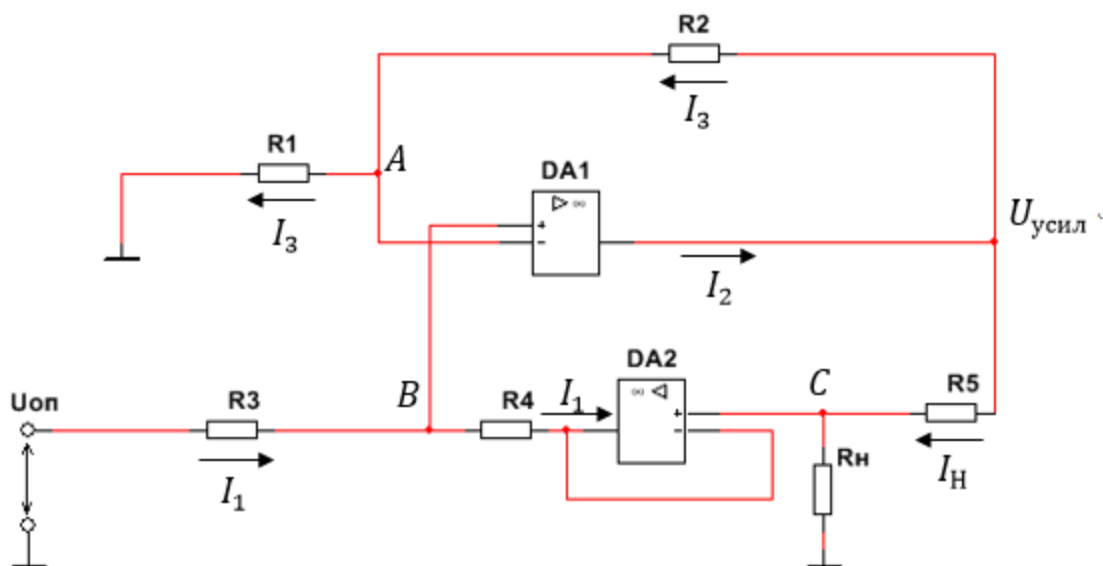


Рисунок 3.7.1 – Улучшенный источник тока Хауланда с буфером^[16]

Ток нагрузки, без учёта тока утечки входа ОУ DA2, равен току через резистор R5, который определяется напряжением на выходе усилителя DA1, напряжением на нагрузке и сопротивлением резистора:

$$I_H = I_{R5} = \frac{U_{\text{усил}} - U_{\text{нагр}}}{R_5} = \frac{U_{\text{усил}}}{R_5} - \frac{U_{\text{нагр}}}{R_5} \quad (1)$$

Относительно потенциала точки В операционный усилитель DA1 является неинвертирующим усилителем. Следуя формуле для расчёта напряжения на выходе такого усилителя, получаем:

$$U_{\text{усил}} = U_B * \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \quad (2)$$

Потенциал точки В определяется суммой падения напряжения на резисторе R4 (пренебрегая токами утечки, через R3 и R4 течёт одинаковый ток) и потенциала

на выходе DA2, который, согласно принципу виртуального короткого замыкания входов ОУ, охваченного обратной связью, будет равен напряжению на нагрузке:

$$U_B = I_{R4} * R_4 + U_{\text{нагр}} = \left[I_{R4} = \frac{U_{\text{оп}} - U_{\text{нагр}}}{R_3 + R_4} \right] = \frac{U_{\text{оп}} - U_{\text{нагр}}}{R_3 + R_4} * R_4 + U_{\text{нагр}} \quad (3)$$

Подставим выражение (3) в (2) вместо U_B :

$$\begin{aligned} U_{\text{усил}} &= \left(\frac{U_{\text{оп}} - U_{\text{нагр}}}{R_3 + R_4} * R_4 + U_{\text{нагр}} \right) * \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) \\ U_{\text{усил}} &= \left(\frac{U_{\text{оп}}}{R_3 + R_4} * R_4 - \frac{U_{\text{нагр}}}{R_3 + R_4} * R_4 + U_{\text{нагр}} \right) * \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) \\ U_{\text{усил}} &= \left(\frac{U_{\text{оп}}}{R_3 + R_4} * R_4 - U_{\text{нагр}} * \left(\frac{R_4}{R_3 + R_4} - 1 \right) \right) * \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) \\ U_{\text{усил}} &= \frac{U_{\text{оп}}}{R_3 + R_4} * R_4 * \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) - U_{\text{нагр}} * \left(\frac{R_4 - R_3 - R_4}{R_3 + R_4} \right) * \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) \\ U_{\text{усил}} &= \frac{U_{\text{оп}}}{R_3 + R_4} * R_4 * \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) - U_{\text{нагр}} * \left(\frac{-R_3}{R_3 + R_4} \right) * \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) \\ U_{\text{усил}} &= \frac{U_{\text{оп}}}{R_3 + R_4} * R_4 * \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) + U_{\text{нагр}} * \left(\frac{R_3}{R_3 + R_4} \right) * \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) \end{aligned} \quad (4)$$

Подставим выражение (4) в (1) вместо $U_{\text{усил}}$:

$$\begin{aligned} I_H &= \frac{U_{\text{оп}}}{R_3 + R_4} * \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) * \frac{R_4}{R_5} + U_{\text{нагр}} * \left(\frac{R_3}{R_3 + R_4} \right) * \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) * \frac{1}{R_5} - \frac{U_{\text{нагр}}}{R_5} \\ I_H &= \frac{U_{\text{оп}}}{R_3 + R_4} * \left(\frac{R_1 + R_2}{R_1} \right) * \frac{R_4}{R_5} + U_{\text{нагр}} * \left(\frac{R_3}{R_3 + R_4} \right) * \left(\frac{R_1 + R_2}{R_1} \right) * \frac{1}{R_5} - \frac{U_{\text{нагр}}}{R_5} \\ I_H &= \frac{U_{\text{оп}}}{R_3 + R_4} * \left(\frac{R_1 + R_2}{R_1} \right) * \frac{R_4}{R_5} + U_{\text{нагр}} * \frac{R_3 * (R_1 + R_2)}{(R_3 + R_4) * R_1 * R_5} - \frac{U_{\text{нагр}}}{R_5} \\ I_H &= \frac{U_{\text{оп}}}{R_3 + R_4} * \left(\frac{R_1 + R_2}{R_1} \right) * \frac{R_4}{R_5} - U_{\text{нагр}} * \left(-\frac{R_3 * (R_1 + R_2)}{(R_3 + R_4) * R_1 * R_5} + \frac{1}{R_5} \right) \\ I_H &= \frac{U_{\text{оп}}}{R_3 + R_4} * \left(\frac{R_1 + R_2}{R_1} \right) * \frac{R_4}{R_5} - U_{\text{нагр}} * \left(\frac{-R_3 * (R_1 + R_2) + (R_3 + R_4) * R_1}{(R_3 + R_4) * R_1 * R_5} \right) \end{aligned} \quad (5)$$

Экв. схема неидеального источника тока следующая:

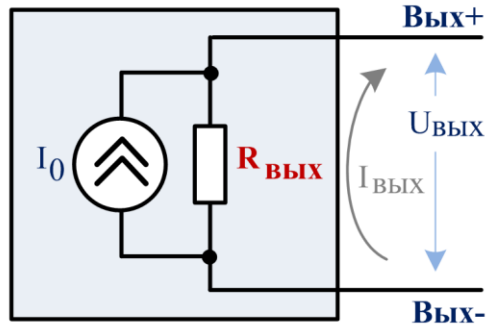


Рисунок 3.7.2 – Эквивалентная схема подключения ИТ к нагрузке

Идеальный источник тока с некоторым коэффициентом A преобразует опорное напряжение $U_{оп}$ в ток нагрузки I_H .

$$I_H = A * U_{оп}$$

Для неидеального источника часть тока «ответвляется» в паразитное выходное сопротивление. Таким образом выражение для тока нагрузки неидеального ИТ:

$$I_H = A * U_{оп} - \frac{U_{нагр}}{R_{вых}}$$

Соотнося выражение (5) для тока нагрузки улучшенного ИТ Хауленда с выражением выше, получаем выражение (6) для выходного сопротивления:

$$\begin{aligned} \frac{1}{R_{вых}} &= \frac{1}{R_5} - \frac{R_3 * (R_1 + R_2)}{(R_3 + R_4) * R_1 * R_5} \\ \frac{1}{R_{вых}} &= \frac{(R_3 + R_4) * R_1 - R_3 * (R_1 + R_2)}{(R_3 + R_4) * R_1 * R_5} \\ \frac{1}{R_{вых}} &= \frac{R_4 * R_1 - R_3 * R_2}{(R_3 + R_4) * R_1 * R_5} \\ R_{вых} &= \frac{(R_3 + R_4) * R_1 * R_5}{R_4 * R_1 - R_3 * R_2} \end{aligned} \quad (6)$$

Чтобы I_H был независим от $U_{нагр}$, мы должны обеспечить $R_{вых} \rightarrow \infty$.

Понятно, что в реальности это недостижимо, поскольку резисторы имеют определённый допуск, но это позволит пользоваться формулой для идеального случая, имея в виду, что реальное значение тока будет отклоняться.

Для этого необходимо, чтобы знаменатель выражения для $R_{\text{вых}}$ стремился к нулю:

$$R_2 * R_3 = R_1 * R_4 \text{ или, что то же самое } \frac{R_2}{R_1} = \frac{R_4}{R_3}$$

Тогда ток нагрузки будет близок к идеальному случаю:

$$\begin{aligned} I_H &= \frac{U_{\text{оп}}}{R_3 + R_4} * \left(\frac{R_1 + R_2}{R_1} \right) * \frac{R_4}{R_5} = \frac{U_{\text{оп}}}{R_3 + R_4} * \left(\frac{R_1 R_4 + R_2 R_4}{R_1} \right) * \frac{1}{R_5} = \\ &= \frac{U_{\text{оп}}}{R_3 + R_4} * \left(\frac{R_2 * R_3 + R_2 R_4}{R_1} \right) * \frac{1}{R_5} = U_{\text{оп}} * \frac{R_2}{R_1 * R_5} \end{aligned}$$

Определим номиналы схемы.

Пусть $\frac{R_2}{R_1} = \frac{R_4}{R_3} = \frac{1}{3}$ для того, чтобы напряжение на выходе DA1 не превышало напряжение питания ($U_{\text{усил}} = U_{\text{оп}} * (1 + 1/3)$, $U_{\text{оп}}$ выберем $1/2(U_{\text{пит}})$, тогда $U_{\text{усил}} = 2/3 * U_{\text{пит}}$).

Тогда:

$$I_H = U_{\text{оп}} * \frac{R_2}{R_1 * R_5} = U_{\text{оп}} * \frac{1}{3 * R_5}$$

Отсюда:

Для Pt1000:

$$R_5 = \frac{U_{\text{оп}}}{3 * I_H} = [U_{\text{оп}} = 2,5 \text{ В}; I_H = 0,3 \text{ мА}] = \frac{2,5 \text{ В}}{3 * 0,3 * 10^{-3} \text{ А}} = 2,778 \text{ кОм}$$

(подойдёт 2,8 кОм, неточность тока нивелируется методом измерения)

Для Pt100:

$$R_5 = \frac{U_{\text{оп}}}{3 * I_H} = [U_{\text{оп}} = 2,5 \text{ В}; I_H = 1,5 \text{ мА}] = \frac{2,5 \text{ В}}{3 * 1,5 * 10^{-3} \text{ А}} = 555,56 \text{ Ом}$$

(подойдёт 556 Ом)

Выберем номиналы R_1, R_2, R_3, R_4 :

$$R_1 = 300 \text{ кОм}; R_2 = 100 \text{ кОм}$$

$$R_3 = 300 \text{ кОм}; R_4 = 100 \text{ кОм}$$

3.7.1 Выбор ОУ для источников тока

В качестве операционных усилителей выбрана микросхема с двумя ОУ LMV822M^[17]. Характеристики:

- **Напряжение питания** от 2,5 В до 5,5 В;
- **Напряжение на одном выводе микросхемы (common mode):**
При питании 5 В, от -0,2 В до ($U_{\text{пит}} - 1 = 4$ В);
- **Диапазон дифференциального напряжения между входами ОУ:**
При питании 5В, от - $U_{\text{пит}} = -5$ В до $U_{\text{пит}} = 5$ В;
- **Диапазон выходного напряжения усилителя:**
При питании 5В, от 300 мВ до ($U_{\text{пит}} - 400 \text{ мВ} = 4,6$ В);
- **Потребление тока:**
При питании 5В и без нагрузки, $I_{\text{собств}}$ макс. 600 мкА;
Для двух ОУ получается 1,2 мА;

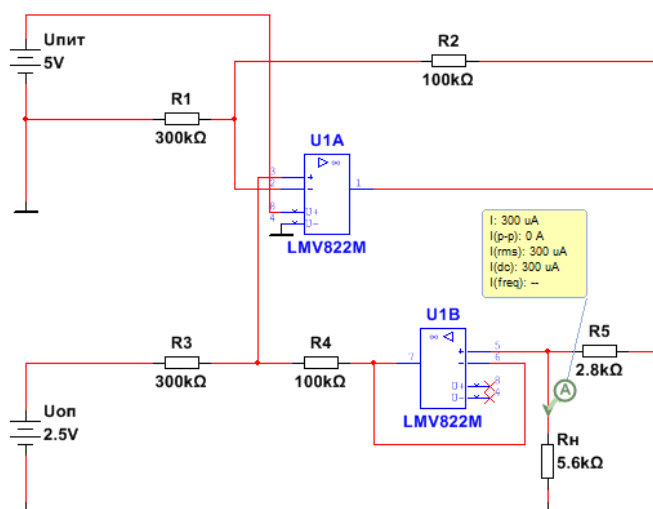


Рисунок 3.7.3 – Схема источника тока в Multisim (Pt1000) и её моделирование

3.7.2 Расчёт делителя опорного напряжения для источников тока

Как указывалось ранее и показано на рис. 18, для работы источнику тока необходимо опорное напряжение 2,5 В. Благодаря тому, что изменение тока одинаково влияет на U_{REF} и U_{BX} , точность задания тока не влияет на точность измерения. Вместо отдельной микросхемы для получения U_{OP} можно использовать резистивный делитель, рассчитанный с учётом двух крайних значений входного импеданса схемы – при $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ и при $500\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Рассмотрим нижний участок схемы на рис. 18, но заменим U_{OP} источником питания 5 В с резистивным делителем. Током утечки, ответвляющимся в верхний ОУ, можно пренебречь.

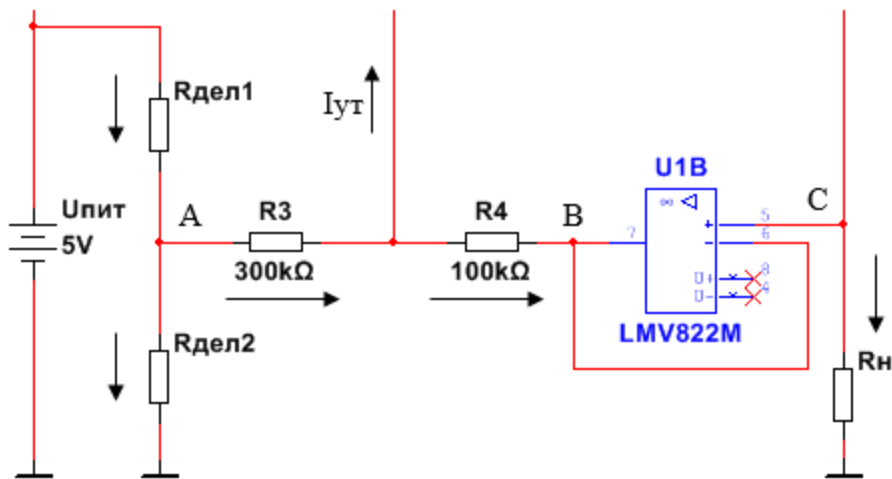


Рисунок 3.7.4 – Нижняя часть схемы ИТ (для Pt100 и Pt1000)

$$I_{ут} = 0;$$

$$I_{R3} = I_{R4} = I_{BX} \text{ (для схемы справа от делителя этот ток будет входным);}$$

$$U_B = U_C \text{ по принципу виртуального КЗ, } U_C = I_H * R_H \rightarrow U_B = I_H * R_H;$$

$$U_A = U_{OP}, \text{ то есть два разных обозначения управляющего напряжения ИТ;}$$

$$I_{BX} = \frac{U_A - U_B}{R_3 + R_4} = \frac{U_A - U_B}{400 * 10^3} = \frac{U_A - I_H * R_H}{400 * 10^3};$$

Обозначим R_{BX} – входное сопротивление схемы относительно земли.

$$R_{BX} = \frac{U_A}{I_{BX}}$$

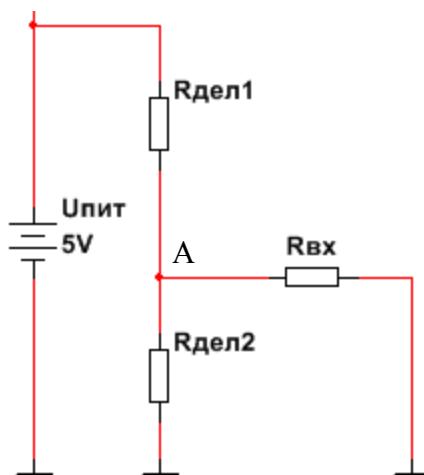


Рисунок 3.7.5 – Эквивалентная схема нижней части схемы ИТ (для Pt100 и Pt1000)

Для Pt1000:

Пусть допустимы небольшие изменения тока максимум на $\pm 5\%$ при достижении максимума и минимума температуры. Для Pt1000 это соответствует значениям 285..315 мкА.

Переведём значения тока в значения $U_{оп}$:

$$U_{оп}(285 \text{ мкА}) = 3 * I_H R_5 = 3 * 285 \text{ мкА} * 2,778 \text{ кОм} = 2,375 \text{ В}$$

$$U_{оп}(315 \text{ мкА}) = 3 * I_H R_5 = 3 * 315 \text{ мкА} * 2,778 \text{ кОм} = 2,625 \text{ В}$$

Получили, что опорное напряжение может меняться от 2,375 В до 2,625 В.

Чем выше R_H (сумма $R_{датчика}$ или R_t и $R_{ЭТАЛ}$), тем выше потенциал точек С и В, а значит, меньше ток между точками А и В, что соответствует более высокому входному сопротивлению схемы. Значит, выше и потенциал точки А (управляющего опорного напряжения, $U_{оп}$) и больше ток ИТ.

Наоборот, меньшему значению R_t будет соответствовать просадка напряжения делителя (меньше управляющее напряжение и меньше ток ИТ).

$$R_t(-50^\circ\text{C}) = 803,063 \text{ Ом}$$

$$R_H = R_t(-50^\circ\text{C}) + R_{ЭТАЛ} = 803,063 \text{ Ом} + 2840 \text{ Ом} = 3643 \text{ Ом}$$

$$I_{\text{ВХ мал.}} = \frac{U_A - I_H * R_H}{400 * 10^3} = \frac{2,375 - 285 * 10^{-6} * 3643}{400 * 10^3} = 3,342 \text{ мкА}$$

$$R_t(500^\circ\text{C}) = 2809,775 \text{ Ом}$$

$$R_H = R_t(500^\circ\text{C}) + R_{\text{ЭТАЛ}} = 2809,775 \text{ Ом} + 2840 \text{ Ом} = 5650 \text{ Ом}$$

$$I_{\text{ВХ бол.}} = \frac{U_A - I_H * R_H}{400 * 10^3} = \frac{2,625 - 315 * 10^{-6} * 5650}{400 * 10^3} = 2,113 \text{ мкА}$$

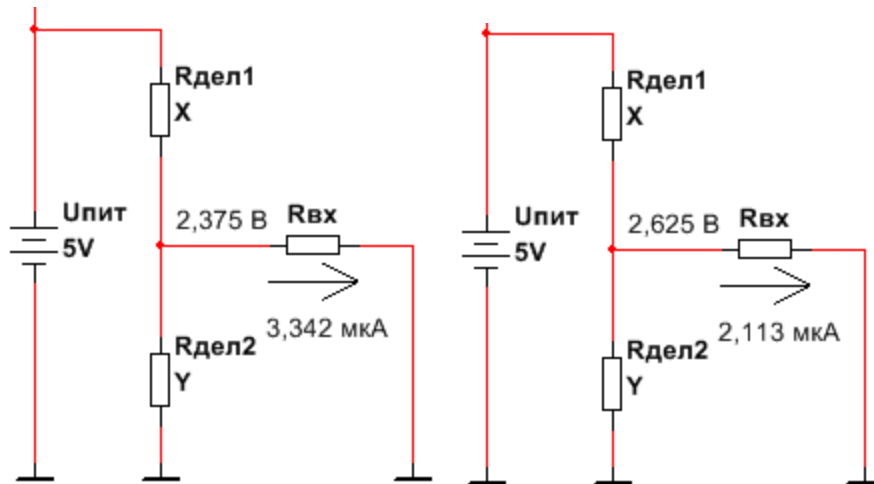


Рисунок 3.7.6 – Эквивалентные схемы нижней части схемы ИТ для составления уравнений (Pt1000)

$$\begin{cases} \frac{5 - 2,375}{x} = 3,342 * 10^{-6} + \frac{2,375}{y} \mid *xy \\ \frac{5 - 2,625}{x} = 2,113 * 10^{-6} + \frac{2,625}{y} \mid *xy \end{cases}$$

$$\begin{cases} 2,625y = 3,342 * 10^{-6} * xy + 2,375x \\ 2,375y = 2,113 * 10^{-6} * xy + 2,625x \end{cases}$$

$$\begin{cases} 2,625y = x * (3,342 * 10^{-6} * y + 2,375) \\ 2,375y = 2,113 * 10^{-6} * xy + 2,625x \end{cases}$$

$$\begin{cases} x = \frac{2,625y}{3,342 \cdot 10^{-6} \cdot y + 2,375} \\ 2,375y = 2,113 \cdot 10^{-6} \cdot xy + 2,625x \end{cases}$$

Подставим x во второе уравнение системы:

$$2,375y = 2,113 \cdot 10^{-6} \cdot \left(\frac{2,625y}{3,342 \cdot 10^{-6} \cdot y + 2,375} \right) \cdot y + 2,625 \cdot \left(\frac{2,625y}{3,342 \cdot 10^{-6} \cdot y + 2,375} \right)$$

Домножим всё на $(3,342 \cdot 10^{-6} \cdot y + 2,375)$:

$$2,375y \cdot (3,342 \cdot 10^{-6} \cdot y + 2,375) = 2,113 \cdot 10^{-6} \cdot 2,625y^2 + 2,625^2 y$$

Видно, что один из корней $y=0$, нам не подходит, поскольку номинал нижнего резистора не может быть равен 0. Сократим на y :

$$2,375 \cdot (3,342 \cdot 10^{-6} \cdot y + 2,375) = 2,113 \cdot 10^{-6} \cdot 2,625y + 2,625^2$$

$$2,375 \cdot 3,342 \cdot 10^{-6} \cdot y + 2,375^2 = 2,113 \cdot 10^{-6} \cdot 2,625y + 2,625^2$$

$$7,937 \cdot 10^{-6} y + 5,641 = 5,547 \cdot 10^{-6} y + 6,891$$

$$2,39 \cdot 10^{-6} y = 1,25$$

$$y = 523 \text{ кОм}$$

Подставим в выражение для x:

$$x = \frac{2,625 \cdot 523 \cdot 10^3}{3,342 \cdot 10^{-6} \cdot 523 \cdot 10^3 + 2,375} = 333 \text{ кОм (332 кОм E192)}$$

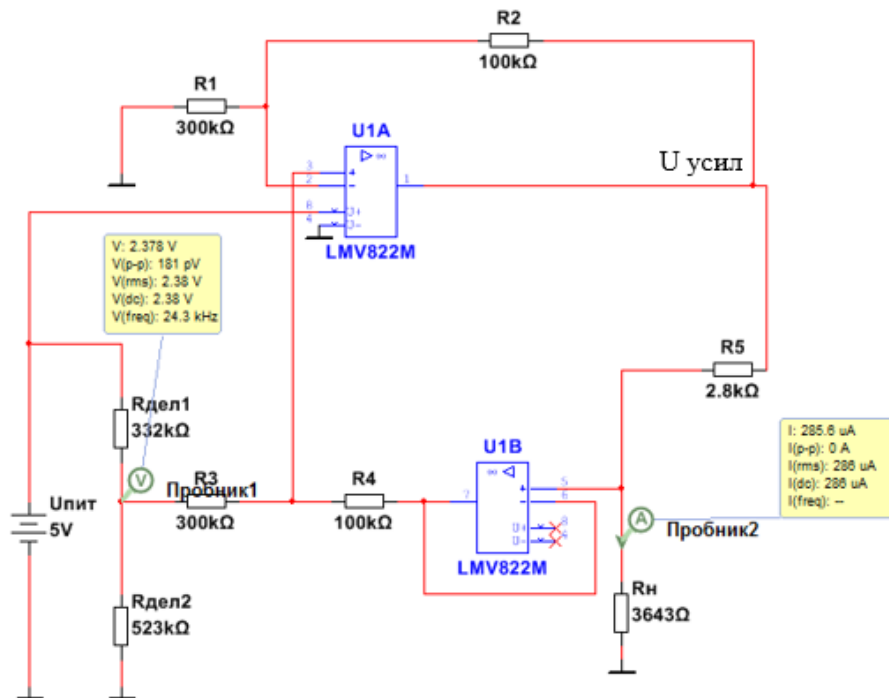


Рисунок 3.7.7 – Схема ИТ в Multisim и её моделирование для -50°C (Pt1000)

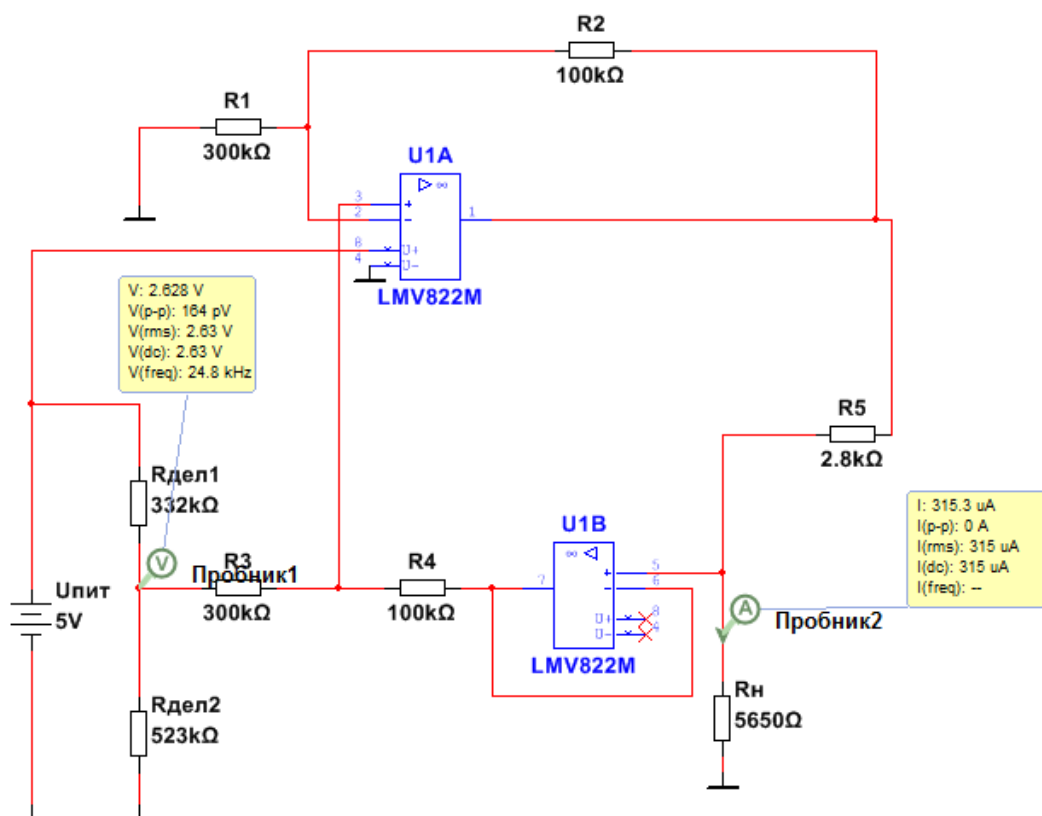


Рисунок 3.7.8 – Схема ИТ в Multisim и её моделирование для 500°C (Pt1000)

Для Pt100:

Измерительный ток 1,5 мА, возьмём $\pm 2\%$ это 1,47..1,53 мА.

$$U_{\text{оп}}(1,47 \text{ мА}) = 3 * I_{\text{H}} R_5 = 3 * 1,47 \text{ мА} * 556 \text{ Ом} = 2,452 \text{ В}$$

$$U_{\text{оп}}(1,53 \text{ мА}) = 3 * I_{\text{H}} R_5 = 3 * 1,53 \text{ мА} * 556 \text{ Ом} = 2,552 \text{ В}$$

$$R_t(-50^\circ\text{C}) = 80 \text{ Ом}$$

$$R_{\text{H}} = R_t(-50^\circ\text{C}) + R_{\text{ЭТАЛ}} = 80 \text{ Ом} + 284 \text{ Ом} = 364 \text{ Ом}$$

$$I_{\text{ВХ мал.}} = \frac{U_A - I_{\text{H}} * R_{\text{H}}}{400 * 10^3} = \frac{2,452 - 1,47 * 10^{-3} * 364}{400 * 10^3} = 4,792 \text{ мкА}$$

$$R_t(500^\circ\text{C}) = 284 \text{ Ом}$$

$$R_{\text{H}} = R_t(500^\circ\text{C}) + R_{\text{ЭТАЛ}} = 284 \text{ Ом} + 284 \text{ Ом} = 568 \text{ Ом}$$

$$I_{\text{ВХ бол.}} = \frac{U_A - I_{\text{H}} * R_{\text{H}}}{400 * 10^3} = \frac{2,552 - 1,53 * 10^{-3} * 568}{400 * 10^3} = 4,207 \text{ мкА}$$

По аналогии с Pt1000 получаем, что:

$$x = \frac{2,552y}{4,792 * 10^{-6} * y + 2,452}$$

$$2,452 * 4,792 * 10^{-6} * y + 2,452^2 = 4,207 * 10^{-6} * 2,552y + 2,552^2$$

$$1,014 * 10^{-6} * y = 0,5$$

$$y = 493,1 \text{ кОм}$$

$$x = \frac{2,552 * 493,1 * 10^3}{4,792 * 10^{-6} * 493,1 * 10^3 + 2,452} = 261,4 \text{ кОм}$$

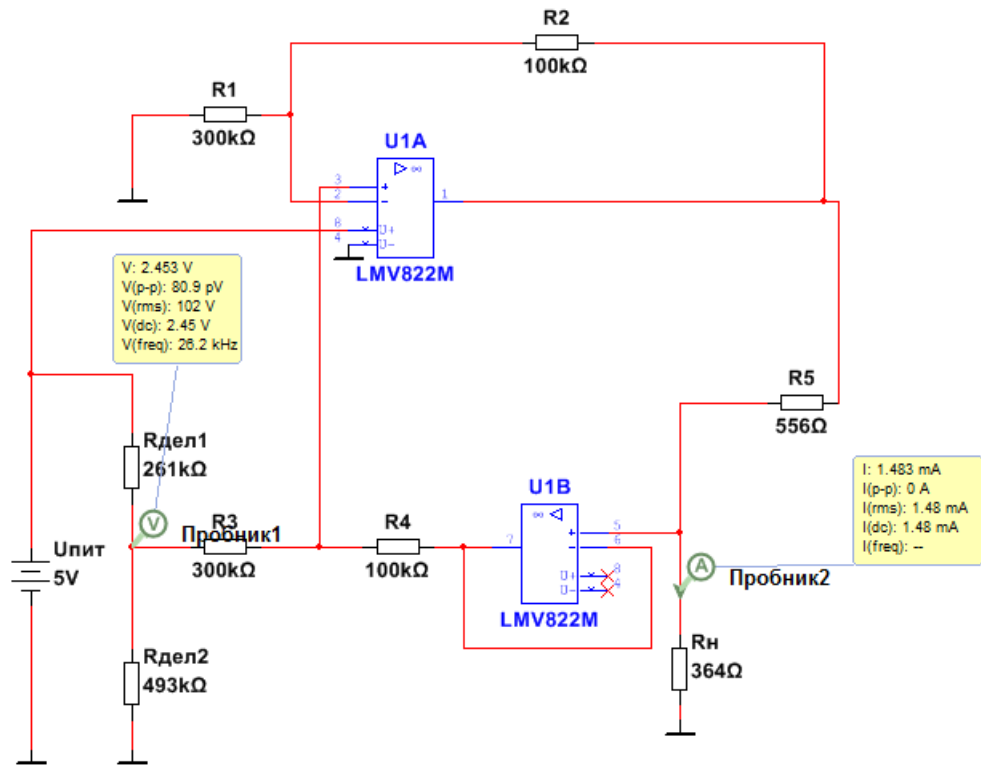


Рисунок 3.7.9 – Схема ИТ в Multisim и её моделирование для -50°C (Pt100)

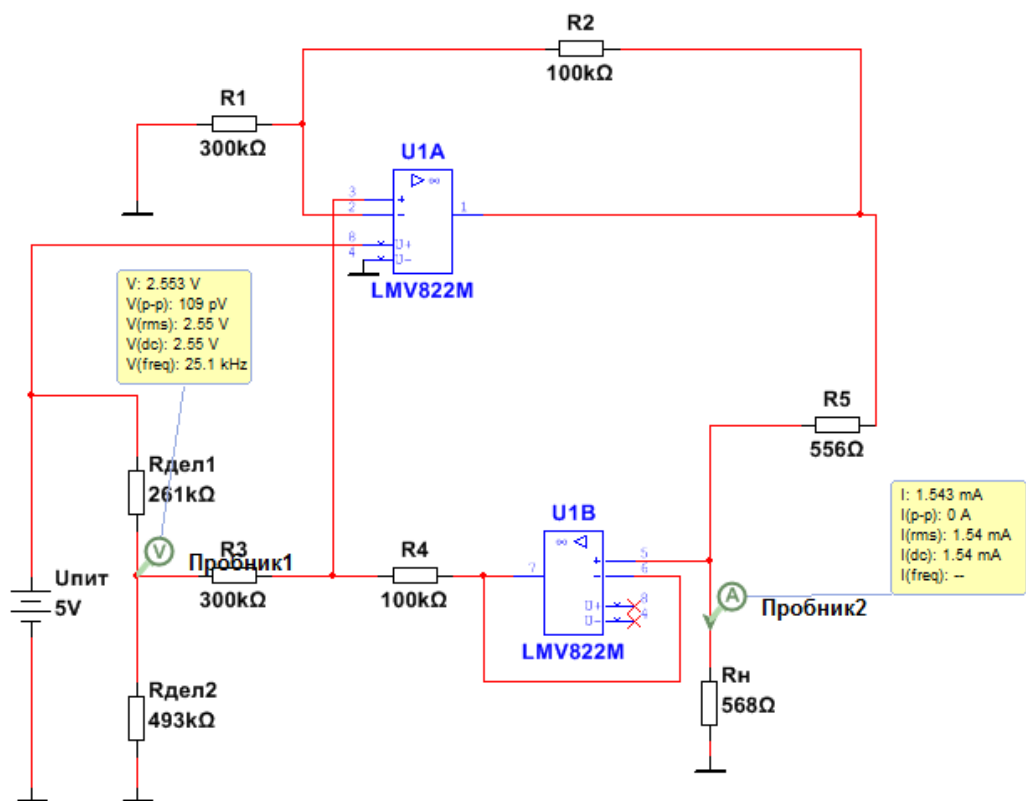


Рисунок 3.7.10 – Схема ИТ в Multisim и её моделирование для 500°C (Pt100)

3.7.3 Выбор резисторов для источников тока

Для того, чтобы рассогласование резисторов заметно не влияло на работу схемы, в прецизионном ИТ Хауленда рекомендуется использовать резисторы с допуском 0,1%.

Номиналы резисторов соответствуют ряду E192, значит могут быть так же использованы резисторы производства НПО «Эркон», как и до этого в работе.

Остаётся важным рассчитать токи в схемах источников тока и найти верхнюю оценку мощности резисторов. Обратимся к рисункам 22-25.

Общее:

$$P_{R1} = \frac{2,5^2 B^2}{300 \cdot 10^3 \text{ Ом}} = 0,021 \text{ мВт}$$

$$P_{R2} = \frac{5^2 B^2}{100 \cdot 10^3 \text{ Ом}} = 0,25 \text{ мВт}$$

$$P_{R3} = \frac{1 B^2}{300 \cdot 10^3 \text{ Ом}} = 0,0033 \text{ мВт}$$

$$P_{R4} = \frac{1 B^2}{100 \cdot 10^3 \text{ Ом}} = 10 \text{ мкВт}$$

Pt1000:

$$P_{R5} = \frac{5^2 B^2}{2800 \text{ Ом}} = 9 \text{ мВт}$$

$$P_{R_{\text{дел1}}} = \frac{2,5^2 B^2}{332 \cdot 10^3 \text{ Ом}} = 19 \text{ мкВт}$$

$$P_{R_{\text{дел2}}} = \frac{2,5^2 B^2}{523 \cdot 10^3 \text{ Ом}} = 12 \text{ мкВт}$$

Pt100:

$$P_{R5} = \frac{5^2 B}{556 \text{ Ом}} = 45 \text{ мВт}$$

$$P_{R_{\text{дел1}}} = \frac{2,5^2 B}{261 \cdot 10^3 \text{ Ом}} = 24 \text{ мкВт}$$

$$P_{R_{\text{дел2}}} = \frac{2,5^2 B}{493 \cdot 10^3 \text{ Ом}} = 13 \text{ мкВт}$$

Вывод: подходят С2-29С-0,062^[7] из E192, допуск 0,1%, мощность 62 мВт.

3.8 Питание схемы

3.8.1 Расчёт тока потребления схемы

Для каждого датчика схема состоит из следующих потребителей:

- Делителя источника тока, потребление которого состоит из тока делителя и тока схемы, подключенной к делителю;
- Верхнего операционного усилителя источника тока, который вместе с резисторами обратной связи, к нему подключенными, образует неинвертирующий усилитель и отдаёт ток в эти резисторы, отдаёт ток в нагрузку источника тока, а также потребляет собственный ток;
- Нижнего операционного усилителя, потребляющего собственный ток (нагрузка учтена как подключенная к делителю схема);
- АЦП со встроенным интерфейсом I2C.

В каждый момент времени работает только одна из схем (последовательность делителя, источника тока, датчика с эталонным сопротивлением, АЦП).

Pt1000: схема - см. рис. 22.

$$\text{Общий ток делителя: } I_{R_{\text{дел1}}} = \frac{(5-2,375) \text{ В}}{332 \text{ кОм}} = 7,9 \text{ мкА} \approx 8 \text{ мкА}$$

Потребление верхнего ОУ:

$$\begin{aligned} I_{\text{верх.ОУ}} &= I_{\text{ОС}} + I_{\text{ИТ}} + I_{\text{собств}} = \frac{U_{\text{усил}}}{R_2 + R_1} + 300 \text{ мкА} + 600 \text{ мкА} = \\ &= [U_{\text{усил}} = I_{\text{ИТ}} * (R_{\text{н}} + R_5)] = \frac{I_{\text{ИТ}} * (R_{\text{н}} + R_5)}{R_2 + R_1} + 900 \text{ мкА} = \\ &= \frac{285 \text{ мкА} * (3643 + 2800) \text{ Ом}}{100 \text{ кОм} + 300 \text{ кОм}} + 900 \text{ мкА} = 5 \text{ мкА} + 900 \text{ мкА} = 905 \text{ мкА} \end{aligned}$$

Потребление нижнего ОУ: $I_{\text{собств}} = 600 \text{ мкА}$

Потребление АЦП: $I_{\text{АЦП}} = 250 \text{ мкА}$

Суммарное потребление: $8 \text{ мкА} + 905 \text{ мкА} + 600 \text{ мкА} + 250 \text{ мкА} = 1,8 \text{ мА}$.

Pt100: схема - см. рис. 24.

$$\text{Общий ток делителя: } I_{R_{\text{дел1}}} = \frac{(5-2,452) \text{ В}}{261 \text{ кОм}} = 9,76 \text{ мкА} \approx 10 \text{ мкА}$$

Потребление верхнего ОУ:

$$\begin{aligned} I_{\text{верх.ОУ}} &= I_{\text{ОС}} + I_{\text{ИТ}} + I_{\text{собств}} = \frac{U_{\text{усил}}}{R_2 + R_1} + 1,5 \text{ мА} + 600 \text{ мкА} = \\ &= [U_{\text{усил}} = I_{\text{ИТ}} * (R_{\text{н}} + R_5)] = \frac{I_{\text{ИТ}} * (R_{\text{н}} + R_5)}{R_2 + R_1} + 2,1 \text{ мА} = \\ &= \frac{1,5 \text{ мА} * (364 + 556) \text{ Ом}}{100 \text{ кОм} + 300 \text{ кОм}} + 2,1 \text{ мА} = 3,45 \text{ мкА} + 2,1 \text{ мА} = 2,103 \text{ мА} \end{aligned}$$

Потребление нижнего ОУ: $I_{\text{собств}} = 600 \text{ мкА}$

Потребление АЦП: $I_{\text{АЦП}} = 250 \text{ мкА}$

Суммарное потребление: $10 \text{ мкА} + 2,1 \text{ мА} + 600 \text{ мкА} + 250 \text{ мкА} = 2,96 \text{ мА}$.

Вывод: в обоих случаях подойдёт линейный регулятор с выходным током не менее 3 мА.

3.8.2 Выбор регулятора напряжения

Диапазон входного напряжения по заданию: $U_{\text{вх.макс.}} = 24 \text{ В}$; $U_{\text{вх.мин.}} = 12 \text{ В}$.

Выходное напряжение: $U_{\text{вых}} = 5 \text{ В}$.

Выходной ток регулятора по расчётам выше: $I_{\text{вых}} = 3 \text{ мА}$.

Пренебрегая током в рабочей точке, регулятор должен рассеивать мощность^[20]:

$$P_d = (U_{\text{вх}} - U_{\text{вых}}) * I_{\text{вых}} = (24 \text{ В} - 5 \text{ В}) * 3 \text{ А} * 10^{-3} = 57 \text{ мВт}$$

При этом наибольшее допустимое рассеяние мощности определяется выражением:

$P_{Dmax} = (T_{Jmax} - T_A) / R_{\theta JA}$, где T_{Jmax} — максимальная допустимая температура р-п-перехода, °С; T_A — температура окружающей среды, °С; $R_{\theta JA}$ — тепловое сопротивление границы «р-п-переход — окружающая среда» для корпуса, °С/Вт.

Выбран TPS70950^[18]:

- Макс. входное напряжение: 30 В;
- Мин. входное напряжение: 2,7 В;
- Макс. выходной ток: 200 мА;
- Выходное напряжение: 5 В;
- Ток рабочей точки: 1 мкА;
- Макс. температура р-п перехода: 150°С;
- Тепловое сопротивление «р-п-переход — окружающая среда»: 212,1°С/Вт (корпус DBV);
- Погрешность выходного напряжения: $\pm 1\%$ ($U_{\text{вых}} > 3,3 \text{ В}$).

Докажем, что регулятор рассеет рабочую мощность 57 мВт (макс. рассеиваемая мощность должна быть больше). Температуру окружающей среды примем равной 25°С.

$$P_{Dmax} = \frac{T_{Jmax} - T_A}{R_{\theta JA}} = \frac{150^\circ\text{C} - 25^\circ\text{C}}{212,1} * \frac{\text{Вт}}{^\circ\text{C}} = 589,3 \text{ мВт}$$

Вывод: регулятор подходит по рассеиваемой мощности.

Рассмотрим влияние погрешности выходного напряжения на работу схемы.

Неточность управляющего напряжения источника тока

Как было рассмотрено ранее, точность тока не влияет на значения измерений (они зависят только от точности сопротивления ТСП и допуска эталонного резистора), но может привести к **саморазогреву** датчика (при увеличении тока) или **к выходу за минимум** входного напряжения АЦП (если ток будет очень маленький).

Формула тока из п. 3.7: $I_H = \frac{U_{оп}}{3 \cdot R_5}$

Тогда: $\Delta I_H = \frac{\Delta U_{оп}}{3 \cdot R_5} = [\Delta U_{оп} = \delta U_{оп} \cdot U_{оп}] = \frac{\delta U_{оп} \cdot U_{оп}}{3 \cdot R_5} = \delta U_{оп} \cdot I_H$

Значит, $\frac{\Delta I_H}{I_H} = \delta U_{оп}$, то есть относительная ошибка задания тока равняется относительной ошибке напряжения ($\pm 1\%$).

Из п. 3.7.2 относительная ошибка задания тока, связанная с делителем, равняется $\pm 2\%$ для Pt100 и $\pm 5\%$ для Pt1000. Значит, суммарная ошибка составляет $\pm 3\%$ для Pt100 и $\pm 6\%$ для Pt1000.

Минимальные токи равняются:

$$I_{\min pt100} = 0,97 \cdot 1,5 \text{ мА} = 1,455 \text{ мА}$$

$$I_{\min pt1000} = 0,94 \cdot 0,3 \text{ мА} = 0,282 \text{ мА}$$

Максимальные токи равняются:

$$I_{\max pt100} = 1,03 \cdot 1,5 \text{ мА} = 1,545 \text{ мА}$$

$$I_{\max pt1000} = 1,06 \cdot 0,3 \text{ мА} = 0,318 \text{ мА}$$

Влияние саморазогрева (см. п. 3.2):

Pt100:

$$P_{\max pt100} = I_{\text{изм}}^2 \cdot R_t = (1,545 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 284 = 0,678 \text{ мВт} < 1 \text{ мВт}$$

Pt1000:

$$P_0 pt1000 = I_{\text{изм}}^2 \cdot R_0 = (0,318 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 10^3 = 0,101 \text{ мВт}$$

$$\Delta_{\text{самораз.}} = P_{0,\text{мВт}} * 0,4 = 0,101 * 0,4 = 0,0404 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\text{Ошибка ТСП с учётом саморазогрева} = 0,19 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Относительная ошибка ТСП с учётом саморазогрева:

$$\delta_{\text{ТСП}} = \frac{\text{ошибка ТСП}}{\text{рабочий диапазон}} = \frac{0,19}{500 - (-50)} = \frac{0,19}{550} = 3,45 * 10^{-4} = 0,0345\%$$

$$\text{Должно выполняться: } |\delta_{\text{ТСП}}| + |\delta_{\text{этал.сопр.}}| + |\delta_{\text{АЦП,шумы}}| \leq 0,091\%$$

$$\delta_{\text{этал.сопр.}} = 0,01\%$$

$$\delta_{\text{АЦП,шумы}} = 0,045\%$$

$$0,0345\% + 0,01\% + 0,045\% \leq 0,091\%$$

$$0,0895\% \leq 0,091\%$$

Вывод: неточность задания тока усиливает саморазогрев ТСП не критично (точность схемы не перестаёт соответствовать заданной).

Влияние на минимальный сигнал (см. п. 3.3):

Эталонные напряжения должны превышать 100 мВ:

$$U_{\text{min этал } pt100} = I_{\text{min } pt100} * R_{\text{этал } pt100} = 1,41 \text{ мА} * 284 \text{ Ом} = 413,22 \text{ мВ}$$

$$U_{\text{min этал } pt1000} = I_{\text{min } pt1000} * R_{\text{этал } pt1000} = 0,273 \text{ мА} * 2840 \text{ Ом} = 800,9 \text{ мВ}$$

Вывод: неточность задания тока не делает измеряемые диапазоны меньше, чем диапазон от 0 до 100 мВ (минимальный для LTC2483).

Влияние на питание микросхем

С точностью $\pm 1\%$ питание может изменяться в диапазоне 4,95..5,05 В.

В схеме присутствуют АЦП LTC2483 и ОУ LMV822M.

Для LTC2483 (см. характеристики в п. 3.3) питание может изменяться от 2,7 В до 5,5 В без потери точности преобразования. Значит, изменение напряжения в диапазоне 4,95..5,05 точно не повлияет на питание АЦП.

Максимумы измеряемого и эталонного напряжения не должны превышать $U_{\text{пит}}$. В данной схеме это 426 мВ (Pt100) и 852 мВ (Pt1000). Эти значения в несколько раз меньше 4,95 В.

Для LMV822M^[17] питание может изменяться от 2,5 до 5,5 В. Максимальное выходное напряжение составляет ($U_{\text{пит}} - 1$ В). Значит, в источниках тока расчётное выходное напряжение ОУ не должно превышать 3,95 В. В п. 3.7 было задано такое усиление, чтобы выходное напряжение не превышало $2/3 * 5 \text{ В} = 3,33 \text{ В}$.

Вывод: неточность выходного напряжения регулятора не нарушает работу микросхем.

TPS7095 подходит для питания схемы.

Включение TPS7095

Для включения регулятора необходимо подать высокий уровень ($>0,9 \text{ В}$, как указано в документации) напряжения на пин EN (enable). Максимальное напряжение для этого пина составляет 6,5 В. Значит, входное напряжение 12..24 В нужно поделить в отношении 3:1, тогда напряжение пина будет составлять 3..6 В. Чтобы не расходовался излишний ток, делитель нужно сделать высокоомным.

Выбор резисторов для делителя:

- Номинал: $R_{\text{дел1}} = 3 \text{ МОм}$, $R_{\text{дел2}} = 1 \text{ МОм}$;

- Мощность:

$$\frac{U_{\text{вх}}^2}{R_{\text{дел1}}} = \frac{24^2 \text{ В}}{3 * 10^6 \text{ Ом}} = 192 \text{ мкВт}$$

$$\frac{U_{\text{вх}}^2}{R_{\text{дел2}}} = \frac{24^2 \text{ В}}{1 * 10^6 \text{ Ом}} = 576 \text{ мкВт};$$

- Допуск: достаточный (5%), чтобы вых. напряжение не превысило 6,5 В

$$I_{\text{дел}} = \frac{24 \text{ В}}{0,95 * 3 \text{ МОм} + 1,05 * 1 \text{ МОм}} = 6,154 \text{ мкА}$$

$$U_{\text{дел}} = I_{\text{дел}} * (1,05 * R_{\text{дел2}}) = 6,154 \text{ мкА} * (1,05 * 1 \text{ МОм}) = 6,46 \text{ В}$$

Выбраны резисторы CF-100^[21] 1 Вт, 5%.

3.9 I²C-интерфейс

АЦП LTC2483 передаёт результат преобразования через I²C-интерфейс. I²C-интерфейс это интерфейс с 2-проводной шиной (SCL и SDA), к которой одновременно может быть подключено несколько устройств. Благодаря тому, что провода в шине подсоединены к питанию через подтягивающие резисторы, устройства могут передавать сигналы (в т.ч. тактовый) другим устройствам, коммутируя их на землю. Данные могут передаваться со скоростью 100 кбит/с в стандартном режиме и с 400 кбит/с в быстром режиме.

Каждое устройство на шине хранит свой уникальный адрес и может работать как приёмник или передатчик. Также каждое устройство имеет статус master или slave. Master – это устройство, которое инициирует передачу данных по шине, генерируя тактовый сигнал на SCL, а slave – это устройство, к которому обращается по адресу master.

LTC2483 может работать только как slave. После того, как по проводу SDA будет передан правильный адрес, АЦП начнёт передавать результат последнего преобразования. По этой причине вывод SCL микросхемы работает только как вход, а SDA является двусторонним (приём адреса и передача данных).

Для старта передачи master должен передать задний фронт на SDA, пока SCL имеет высокий уровень. Данные передаются группами по 9 бит, из них 8 бит составляет посылка и 1 – это бит подтверждения, задний фронт, который передаёт получатель. Сначала master передаёт 7 бит адреса АЦП и 1 бит чтения/записи (он равен 1 для запроса на чтение результата). Если АЦП находится в процессе преобразования, он отправит NACK. Если нет, то АЦП начнёт передавать 24 бита из регистра вывода. Первый бит служит для индикации выхода за допустимый диапазон. Следующие 16 бит – это сам результат преобразования. Последние 7 бит остаются занулёнными.

Когда **передача закончена**, master передаёт передний фронт на SDA, пока SCL имеет высокий уровень.

3.10 Обработка результата преобразования

Результат преобразования представляет из себя число в прямом коде.

Для удобства его можно преобразовать в десятичную систему счисления.

Далее необходимо вычислить значение сопротивления датчика по формуле:

$$R_t = R_{\text{этал}} * \frac{D_{\text{вых}}}{2^{16}-1}$$

По нему вычисляется значение температуры, для этого используются формулы из п. 2.1.

Для Pt100 и Pt1000 кодом, соответствующим 0 °С, является:

$$D_0 = \frac{100}{284} * (2^{16} - 1) = \frac{1000}{2840} * (2^{16} - 1) = 23075,7 \approx 23076$$

Если результат преобразования меньше этого числа, необходимо использовать формулу для отрицательного диапазона. Если больше, то для положительного.

Примеры расчёта:

Pt100:

1) Пусть $D_{\text{вых}} = 20000 < 23076$, значит это отрицательная температура.

$$R_t = R_{\text{этал}} * \frac{D_{\text{вых}}}{2^{16}-1} = 284 \text{ Ом} * \frac{20000}{65535} = 86,671 \text{ Ом}$$

$$t = \sum_{i=1}^4 D_i * \left(\frac{R_t}{R_0} - 1 \right)^i = \sum_{i=1}^4 D_i * \left(\frac{86,671}{100} - 1 \right)^i = -33,412 \text{ °С}$$

D ₁	251,903 °С
D ₂	8,80035 °С
D ₃	-2,91506 °С
D ₄	1,67611 °С

2) Пусть $D_{\text{вых}} = 40000 > 23076$, значит это положительная температура.

$$R_t = R_{\text{этал}} * \frac{D_{\text{вых}}}{2^{16}-1} = 284 \text{ Ом} * \frac{40000}{65535} = 173,3425 \text{ Ом}$$

$$t = \frac{\sqrt{A^2 - 4B(1 - \frac{R_t}{R_0})} - A}{2B} = \frac{\sqrt{A^2 - 4B(1 - \frac{173,3425}{100})} - A}{2B} = 190,107 \text{ } ^\circ\text{C}$$

A	$3,9690 * 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
B	$-5,841 * 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^{-2}$

Pt1000:

3) Пусть $D_{\text{БЫХ}} = 23000 < 23076$, значит это отрицательная температура.

$$R_t = R_{\text{этал}} * \frac{D_{\text{БЫХ}}}{2^{16}-1} = 2840 \text{ Ом} * \frac{23000}{65535} = 996,719 \text{ Ом}$$

$$t = \sum_{i=1}^4 D_i * \left(\frac{R_t}{R_0} - 1\right)^i = \sum_{i=1}^4 D_i * \left(\frac{996,719}{1000} - 1\right)^i = -0,839 \text{ } ^\circ\text{C}$$

D ₁	255,819 °C
D ₂	9,14550 °C
D ₃	-2,92363 °C
D ₄	1,79090 °C

4) Пусть $D_{\text{БЫХ}} = 45000 > 23076$, значит это положительная температура.

$$R_t = R_{\text{этал}} * \frac{D_{\text{БЫХ}}}{2^{16}-1} = 2840 \text{ Ом} * \frac{45000}{65535} = 1950,103 \text{ Ом}$$

$$t = \frac{\sqrt{A^2 - 4B(1 - \frac{R_t}{R_0})} - A}{2B} = \frac{\sqrt{A^2 - 4B(1 - \frac{1950,103}{1000})} - A}{2B} = 252,521 \text{ } ^\circ\text{C}$$

A	$3,9083 * 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
B	$-5,775 * 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^{-2}$

4. Моделирование

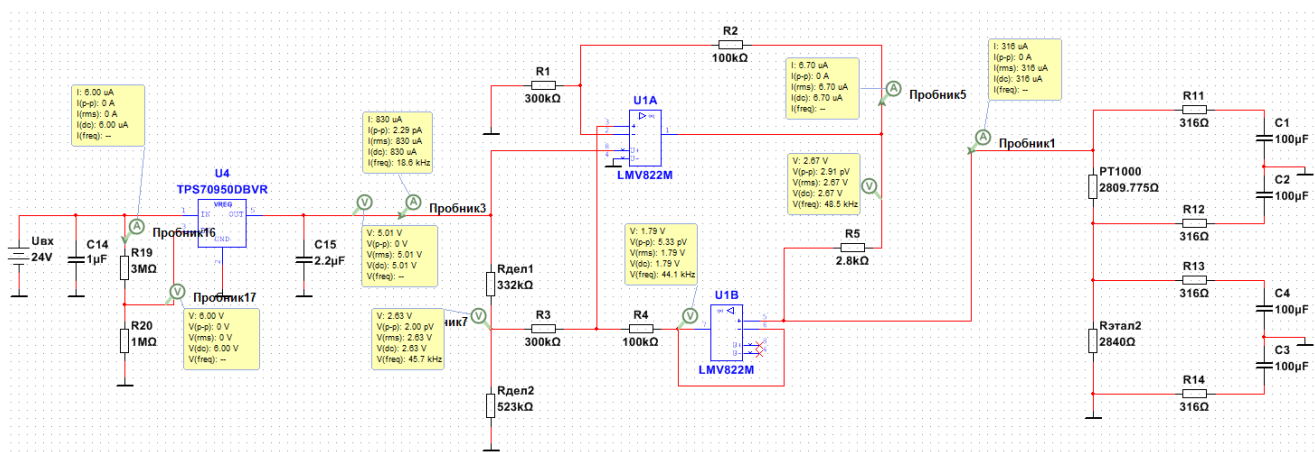


Рисунок 4.1 – Схема модуля температуры в Multisim и её моделирование для 500°C (Pt1000)

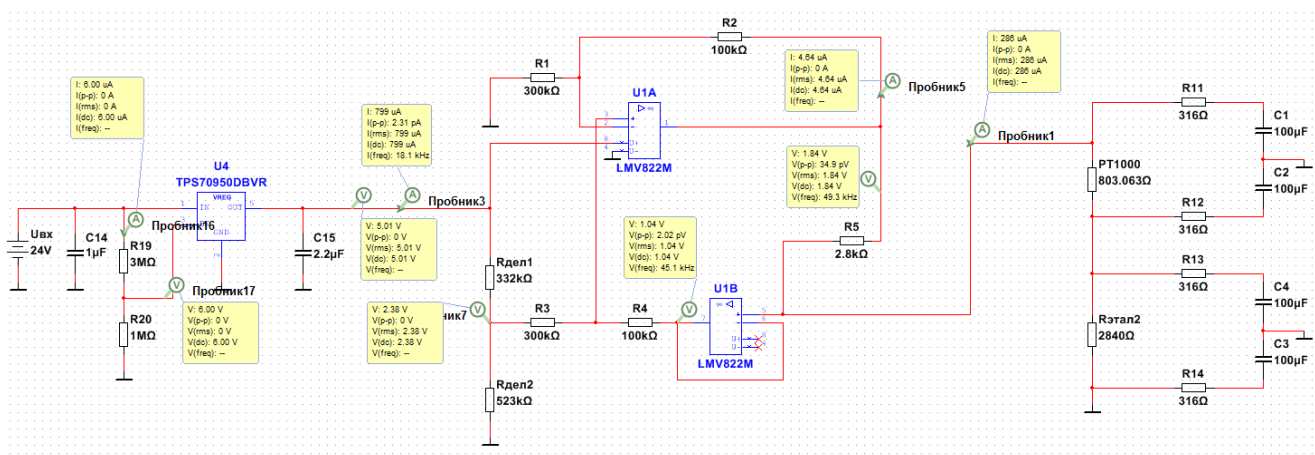


Рисунок 4.2 – Схема модуля температуры в Multisim и её моделирование для -50°C (Pt1000)

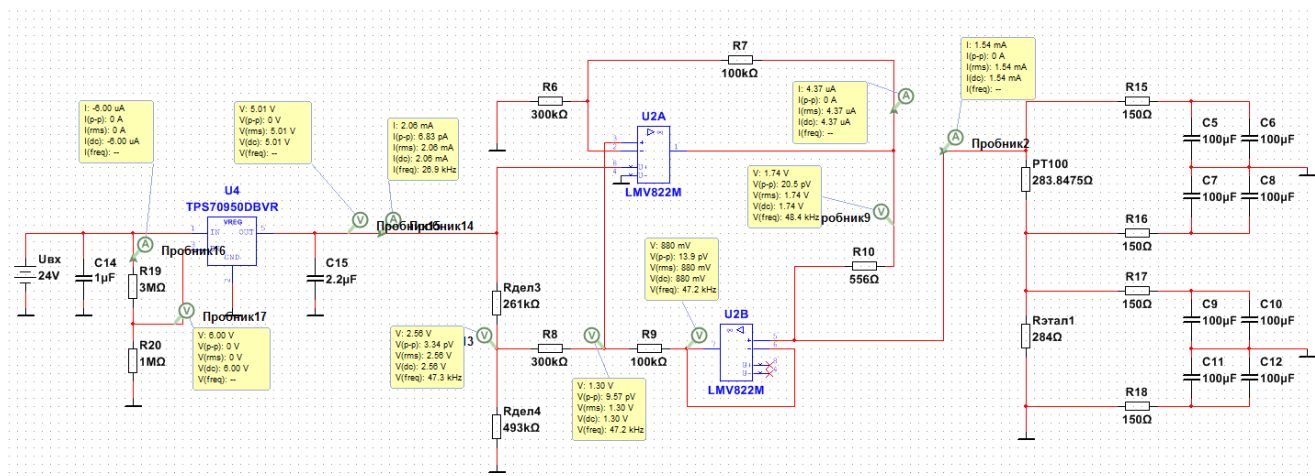


Рисунок 4.3 – Схема модуля температуры в Multisim и её моделирование для 500°C (Pt100)

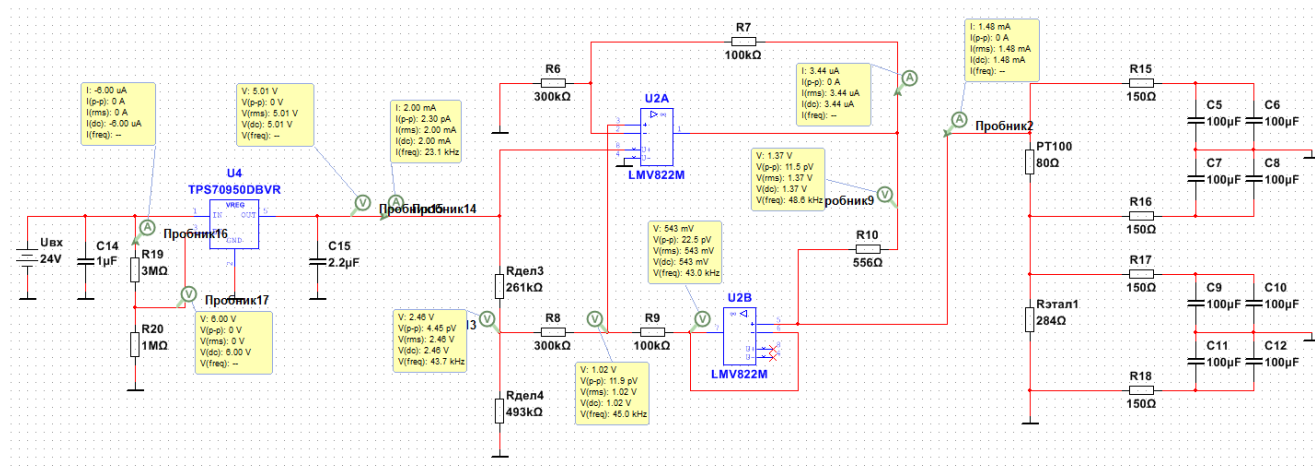


Рисунок 4.4 – Схема модуля температуры в Multisim и её моделирование для -50°C (Pt100)

5. Вывод

В данной курсовой работе выполнена реализация модуля измерения температуры на базе платиновых ТСП Pt100 и Pt1000. Были подобраны элементы и реализованы основные блоки схемы: датчики с эталонными сопротивлениями, источники тока, фильтры от наводок, делители опорного напряжения, АЦП. Элементы были подобраны таким образом, чтобы вся схема удовлетворяла требованию ТЗ по точности.

При выполнении курсовой работы были закреплены теоретические знания об измерении температуры при помощи термосопротивления, подробно рассмотрены формулы, при помощи которых происходит расчёт температуры. Данная работа позволила закрепить полученные ранее знания в курсах схемотехники и электроники.

Список литературы

- [1] ГОСТ 6651-2009. — Текст : электронный // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов : [сайт]. — URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200082733> (дата обращения: 22.06.2021).
- [2] Термометры сопротивления. Общие сведения. — Текст : электронный // temperatures.ru : [сайт]. — URL: http://temperatures.ru/pages/termometry_soprotivleniya (дата обращения: 03.09.2021).
- [3] Методика расчета температуры по сопротивлению термометров сопротивления. — Текст : электронный // temperatures.ru : [сайт]. — URL: http://temperatures.ru/pages/raschet_temperature (дата обращения: 03.09.2021).
- [4] Operating limits and tolerances of platinum resistance thermometers per DIN EN IEC 60751. — Текст : электронный // WIKA : [сайт]. — URL: https://www.wika.fr/upload/DS_IN0017_en_co_20804.pdf
- [5] Корнеев, И. Логометрический способ аналого-цифрового преобразования сопротивления параметрических датчиков, включенных в общую токовую петлю / И. Корнеев, В. Смолин, Ю. Троицкий. — Текст : непосредственный // Компоненты и технологии. — 2012. — № 4. — С. 182.
- [6] Термопреобразователи сопротивления ТСП-0193, ТСП-1293, ТСП-1393. — Текст : электронный // Группа Компаний Теплоприбор : [сайт]. — URL: <http://tpchel.ru/upload/shop/documents/%D1%82%D0%B5%D0%BC%D0%BF%D0%B5%D1%80%D0%B0%D1%82%D1%83%D1%80%D0%B0/%D0%A2%D0%A1%D0%9C/%D0%A0%D0%AD%20%D0%A2%D0%A1%D0%9F-0193.pdf> (дата обращения: 04.09.2021).
- [7] Резисторы постоянные непроволочные сверхпрецизионные С2-29С. — Текст : электронный // Эркон : [сайт]. — URL: https://www.erkon-nn.ru/upload/iblock/5c0/S2_29S_OZH0.467.130_dop1_OTK_datasheet_ru-_versiya-10.2020_.pdf (дата обращения: 04.09.2021).

- [8] 700 Series Platinum RTDs. — Текст : электронный // Компэл : [сайт]. — URL: <https://www.compel.ru/item-pdf/ca6bd7cc7b0f8d5f5532dbba3370ed49/ps/honey~700s.pdf> (дата обращения: 04.09.2021).
- [9] Определение метрологических характеристик и экспериментальное исследование осциллографа приставки . — Текст : электронный // Лаборатория Электронных Средств Обучения (ЛЭСО) СибГУТИ : [сайт]. — URL: <http://www.labfor.ru/articles/dip/5> (дата обращения: 04.09.2021).
- [10] Understanding Data Converters. — Текст : электронный // Texas Instruments : [сайт]. — URL: <https://www.ti.com/lit/an/slaa013/slaa013.pdf?ts=1623226119383> (дата обращения: 04.09.2021).
- [11] LTC2483. — Текст : электронный // Analog Devices : [сайт]. — URL: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/2483fc.pdf> (дата обращения: 04.09.2021).
- [12] Minimize measurement errors in RTD circuits. — Текст : электронный // Компэл : [сайт]. — URL: <https://www.compel.ru/wordpress/wp-content/uploads/2017/11/umenshenie-oshibok-izmereniy-v-shemah-rtd.pdf> (дата обращения: 04.09.2021).
- [13] Тепловой шум. — Текст : электронный // Wikipedia : [сайт]. — URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A2%D0%B5%D0%BF%D0%BB%D0%BE%D0%B2%D0%BE%D0%B9_%D1%88%D1%83%D0%BC (дата обращения: 04.09.2021).
- [14] Analog Front-End Design Considerations for RTD Ratiometric Temperature Measurements . — Текст : электронный // Analog Devices : [сайт]. — URL: <https://www.analog.com/media/en/analog-dialogue/volume-50/number-1/articles/afe-design-considerations-rtd-ratiometric.pdf> (дата обращения: 04.09.2021).
- [15] Анализ характеристик прецизионного источника тока в LTspice. — Текст : электронный // RadioProg : [сайт]. — URL: <https://radioprogram.ru/post/964> (дата обращения: 04.09.2021).

- [16] "Improved" Howland current pump with buffer circuit. — Текст : электронный // Texas Instruments : [сайт]. — URL: https://www.ti.com/lit/an/sboa441/sboa441.pdf?ts=1619454255584&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F (дата обращения: 04.09.2021).
- [17] LMV822. — Текст : электронный // ST Microelectronics : [сайт]. — URL: <https://www.st.com/en/amplifiers-and-comparators/lmv822.html> (дата обращения: 04.09.2021).
- [18] TPS709 150-mA, 30-V, 1- μ A IQ Voltage Regulators With Enable. — Текст : электронный // Texas Instruments : [сайт]. — URL: https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tps709.pdf?ts=1631347424391&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F (дата обращения: 11.09.2021).
- [19] X5R Dielectric. — Текст : электронный // Mouser Electronics : [сайт]. — URL: <https://ru.mouser.com/datasheet/2/40/cx5r-776519.pdf> (дата обращения: 04.09.2021).
- [20] Зимник, М. Линейные регуляторы напряжения для высокоэффективных приложений / М. Зимник. — Текст : непосредственный // Компоненты и технологии. — 2009. — № 7. — С. 3.
- [21] Постоянные углеродистые резисторы С1-4 имп.. — Текст : электронный // ЧИП и ДИП : [сайт]. — URL: <https://static.chipdip.ru/lib/056/DOC000056035.pdf> (дата обращения: 12.09.2021).