

ĐẠI HỌC QUỐC GIA THÀNH PHỐ HỒ CHÍ MINH
TRƯỜNG ĐẠI HỌC BÁCH KHOA
KHOA ĐIỆN – ĐIỆN TỬ



BÁO CÁO BÀI TẬP LỚN 2

**ĐỀ TÀI 19: THIẾT KẾ MẠCH ĐO KHOẢNG
CÁCH SỬ DỤNG CẢM BIẾN HỒNG NGOẠI
GP2Y0A21YK0F**

Lớp L01 – Nhóm 6

GVHD: Ths. Nguyễn Trung Hiếu

STT

1
2

SVTH

Nguyễn Huỳnh Long Nhi
Hoàng Tuấn Tài

MSSV

2111941
2114680

TP. Hồ Chí Minh, tháng 1 năm 2025

MỤC LỤC

ĐỀ TÀI	6
THIẾT KẾ MẠCH.....	7
a. <u>Mô phỏng cảm biến (có điện trở dây dẫn là 10Ω).</u>	<u>7</u>
b. <u>Lựa chọn OPAMP sử dụng, mô phỏng OPAMP theo datasheet</u>	<u>8</u>
<i>Offset voltage & current:</i>	9
<i>Openloop gain vs frequency:</i>	10
<i>Đáp ứng dòng ra của OPA333:</i>	12
c. <u>Đảm bảo sai số (giữa giá trị lý thuyết và thực tế đo qua mạch) $\pm 5\%$.</u>	<u>12</u>
<i>Tuyến tính hóa</i>	12
<i>Tầng 1</i>	15
<i>Tầng 2</i>	18
<i>Ghép liên tầng</i>	19
<i>Chọn nguồn cấp cho mạch</i>	20
<i>Offset</i>	21
<i>Chọn nguồn tham chiếu và cầu chia áp</i>	22
<i>Chọn trở hồi tiếp cho tầng 1</i>	27
<i>Mô phỏng toàn mạch</i>	30
d. <u>Thiết kế mạch đọc dòng điện và cho ngõ ra ADC. Tiến hành lựa chọn ADC (số bit, nguồn). Mô phỏng mạch đọc và kiểm chứng.....</u>	<u>32</u>
THI CÔNG MẠCH	35
a. <u>Thiết kế.....</u>	<u>35</u>
<i>Tăng điều chỉnh giá trị cảm biến</i>	35
<i>PCB</i>	38
<i>Testbench</i>	40
<i>Chương trình điều khiển relay</i>	41
b. <u>Khảo sát.....</u>	<u>42</u>
<i>Tính chất hình học của chùm sáng</i>	42
<i>Giá trị đo cảm biến</i>	43
<i>OPA333</i>	44
<i>Bộ ADC của STM32F103C8T6</i>	46
c. <u>Kết quả</u>	<u>46</u>
PHỤ LỤC	49
a. <u>Tổ chức file</u>	<u>49</u>

b.	<u>NiMultisim14.3</u>	<u>49</u>
c.	<u>Nhom6_L01_BTL_DTUD.xlsx</u>	<u>49</u>

DANH MỤC HÌNH ẢNH

Hình 1: Sơ đồ mạch mô phỏng cảm biến	7
Hình 2: Phân bố sai số	8
Hình 3: Testbench mô phỏng Opamp OPA333	9
Hình 4: Đặc tuyến điện áp ngõ vào và ngõ ra của OPA333	9
Hình 5: Một vài thông số của OPA333 trích từ datasheet	9
Hình 6: Khoảng điện áp ngõ vào để Opamp hoạt động ở mode khuếch đại	10
Hình 7: Testbench mô phỏng transient	10
Hình 8: Mô phỏng transient ngõ vào và ngõ ra	11
Hình 9: Khảo sát đáp ứng tần số của Opamp	11
Hình 10: Đáp ứng tần số của Opamp trong datasheet	11
Hình 11: Testbench đo đáp ứng dòng ra	12
Hình 12: Đáp ứng dòng ra của Opamp	12
Hình 13: Tuyến tính hóa 2 đoạn	14
Hình 14: Tuyến tính hóa 4 đoạn	14
Hình 15: Mạch trừ	16
Hình 16: Tầng 1	16
Hình 17: Tầng 1 xét offset về áp	17
Hình 18: Tầng 1 xét offset về dòng	17
Hình 19: Tầng 2	18
Hình 20: Tầng 2 xét offset về áp	19
Hình 21: Tầng 2 xét offset về dòng	19
Hình 22: Tầng 1 và 2	19
Hình 23: Tầng 1 và 2 có mạch tạo điện áp tham chiếu	21
Hình 24: Mạch tạo áp tham chiếu	23
Hình 25: Đồ thị ổn định của TL431	24
Hình 26: Trích datasheet đặc tính TL431	24
Hình 27: Kết quả mô phỏng mạch tạo áp tham chiếu	26
Hình 28: Dòng ngõ ra theo khoảng cách	28
Hình 29: Mô phỏng toàn mạch	31
Hình 30: Một vài trường hợp mô phỏng ADC	34
Hình 31: Mạch điều chỉnh giá trị cảm biến	35
Hình 32: Vị trí của tầng điều chỉnh trong mạch	36
Hình 33: Đồ thị hiệu chỉnh giá trị cảm biến	37
Hình 34: Giải hệ tìm giá trị điện trở	37
Hình 35: Mô phỏng tầng điều chỉnh	38
Hình 36: Schematic	38
Hình 37: BOM list	39
Hình 38: PCB	39
Hình 39: Testbench để đo	40
Hình 40: Màn hứng chùm sáng từ cảm biến	40
Hình 41: Lưu đồ giải thuật	41
Hình 42: Độ mở của chùm tia ở 10cm (trái) và 20cm (phải)	42
Hình 43: Các thông số về kích thước của nguồn sáng	42
Hình 44: Đặc tính trích xuất từ datasheet giúp xác định vị trí 6cm	43
Nhóm 6: Mạch ngõ ra dòng đo cảm biến hồng ngoại	3

Hình 45: Tìm vị trí 6cm thông qua rà điện áp max	43
Hình 46: Giá trị cảm biến đo thực tế so với datasheet	44
Hình 47: Testbench khảo sát OPAMP	44
Hình 48: Đặc tuyến OPAMP của testbench	45
Hình 49: Đặc tuyến của bộ ADC.....	46
Hình 50: Kết quả đo	47
Hình 51: Kết quả đo giá trị cảm biến ở vị trí 80cm khi cắm mạch (trái) và khi đo rời (phải)	48

DANH MỤC BẢNG

Bảng 1: Số liệu mô phỏng cảm biến	8
Bảng 2: So sánh đặc tính OPAMP.....	8
Bảng 3: Bảng tuyến tính hóa 4 đoạn, trích từ sheet a. Linearization 4eq	13
Bảng 4: Mô phỏng toàn mạch trích từ c. FullCircuit_Adj	31
Bảng 5: khảo sát đặc tính OPAMP, trích từ OPA333Meas	45
Bảng 6: Kết quả đo trích từ FullCircuit.....	46

ĐỀ TÀI

Thiết kế mạch đo khoảng cách sử dụng cảm biến hồng ngoại GP2Y0A21YK0F. Mạch có tầm đo 10cm – 80cm, độ phân giải 2 cm, ngõ ra là dòng điện tương ứng từ 4-20mA (thả nổi):

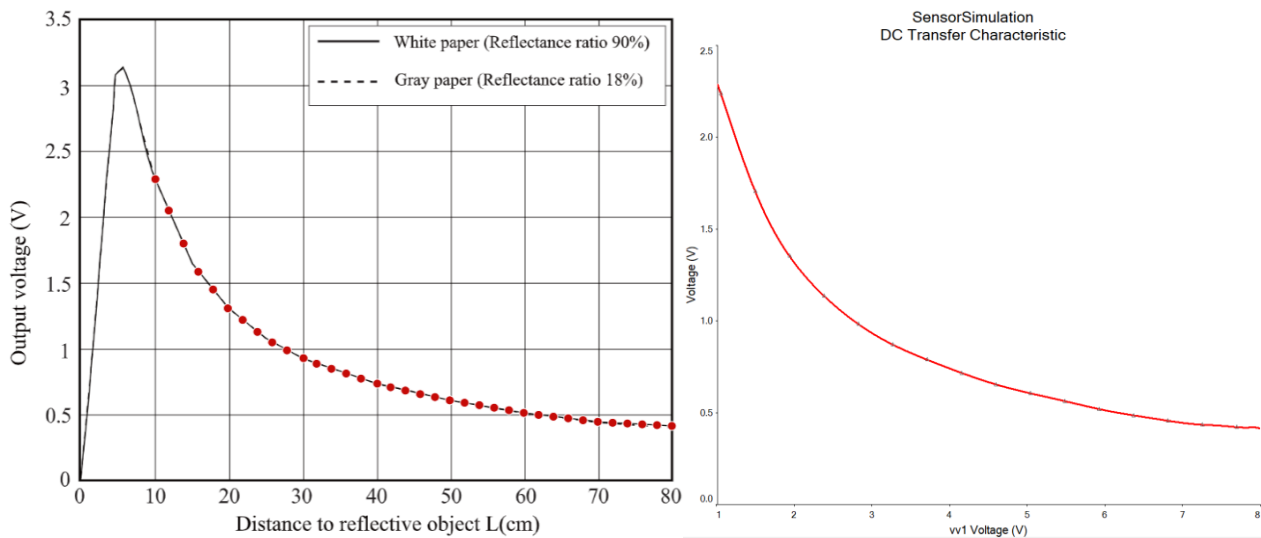
- Mô phỏng cảm biến (có điện trở dây dẫn là 10Ω).
- Lựa chọn OPAMP sử dụng, mô phỏng OPAMP theo datasheet.
- Đảm bảo sai số (giữa giá trị lý thuyết và thực tế đo qua mạch) $\pm 5\%$.
- Thiết kế mạch đọc dòng điện và cho ngõ ra ADC. Tiến hành lựa chọn ADC (số bit, nguồn). Mô phỏng mạch đọc và kiểm chứng.

THIẾT KẾ MẠCH

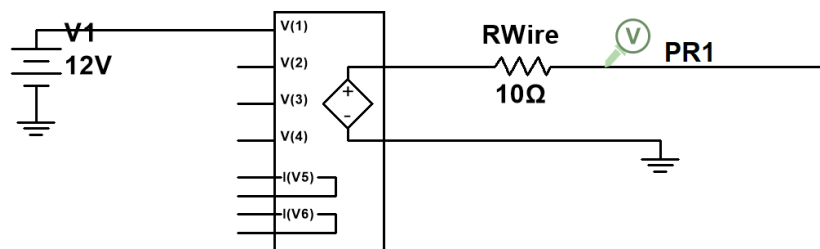
a. Mô phỏng cảm biến (có điện trở dây dẫn là 10Ω).

Trong cách lấy dữ liệu của bài tập lớn 1, nhóm lấy nhầm điểm dữ liệu tại 7.4 dẫn đến áp ra tại điểm này không tuân theo quy luật giảm của đồ thị khi khoảng cách tăng, do đó trong lần này nhóm thực hiện lấy mẫu lại lần nữa, viết lại phương trình hồi quy cho đường cong để mô phỏng cảm biến.

$$\begin{aligned}
 V_{\text{out}} = & -1.11859303099279 + 13.250681830311 \times \text{dist}^1 - 15.6343680473077 \times \text{dist}^2 \\
 & + 4.50781633554277 \times \text{dist}^3 + 4.22749164935214 \times \text{dist}^4 - 4.36223594022982 \times \text{dist}^5 \\
 & + 1.71806662251454 \times \text{dist}^6 - 0.309596451037065 \times \text{dist}^7 + 0.00161670301600995 \times \text{dist}^8 \\
 & + 0.0106804167151652 \times \text{dist}^9 - 0.00219335980327275 \times \text{dist}^{10} + 0.000207506092976569 \times \text{dist}^{11} \\
 & - 6.43872459322745\text{E} - 06 \times \text{dist}^{12} - 1.27712355716975\text{E} - 06 \times \text{dist}^{13} + 1.74147091728589\text{E} - 07 \times \text{dist}^{14} \\
 & + 1.83762845308623\text{E} - 08 \times \text{dist}^{15} - 5.86575058116722\text{E} - 09 \times \text{dist}^{16} + 3.82467632258415\text{E} - 10 \times \text{dist}^{17} \\
 & + 8.60332182248863\text{E} - 12 \times \text{dist}^{18} - 2.05019667714668\text{E} - 12 \times \text{dist}^{19} - 3.56622829090857\text{E} - 15 \times \text{dist}^{20} \\
 & - 6.93321153980253\text{E} - 15 \times \text{dist}^{21} + 1.56908169591476\text{E} - 14 \times \text{dist}^{22} - 3.39971081995102\text{E} - 15 \times \text{dist}^{23} \\
 & + 2.81740243456083\text{E} - 16 \times \text{dist}^{24} - 8.36015968608686\text{E} - 18 \times \text{dist}^{25}
 \end{aligned}$$



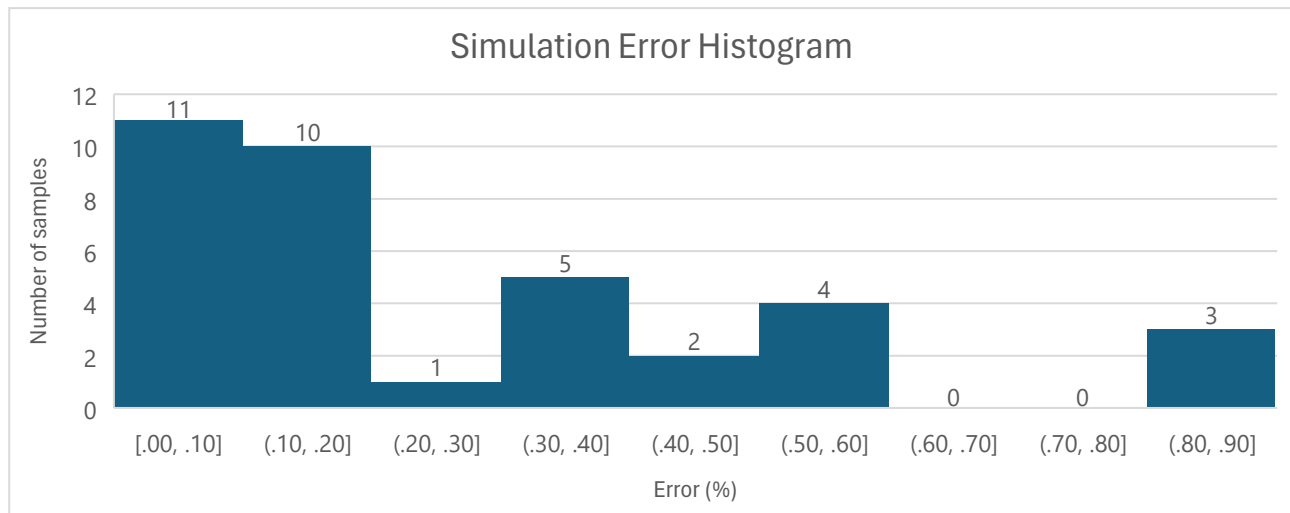
Hình 1: Điện áp ngõ ra theo khoảng cách theo datasheet (trái) và mô phỏng (phải) cho điện áp từ 1-8V (ứng với khoảng cách 10cm-80cm) với bước nhảy trong mô phỏng là 1mV (tương ứng bước nhảy về khoảng cách là 1mm)



Hình 1: Sơ đồ mạch mô phỏng cảm biến

Bảng 1: Số liệu mô phỏng cảm biến

Distance (dm)	Voltage (V)	Equation (V)	Error (%)	Simulation	ErrorSim (%)
1	2.287	2.290	0.112	2.289566705	0.112
1.2	2.048	2.040	0.368	2.040461358	0.368
1.4	1.798	1.799	0.075	1.79934909	0.075
1.6	1.583	1.597	0.862	1.596650791	0.862
...					
7.8	0.419	0.419	0.001	0.419003591	0.001
8	0.413	0.413	0.004	0.412985263	0.004



Hình 2: Phân bố sai số

Sai số giữa mô phỏng và datasheet đều nhỏ hơn 1%, với hơn một nửa số liệu có khác biệt không quá 0.2%. Do đó nhóm nghĩ dùng cách này để mô phỏng cảm biến là có thể chấp nhận được, tầm sai số này không gây ra sự chòng lún giữa 2 điện áp của khoảng cách liên kề.

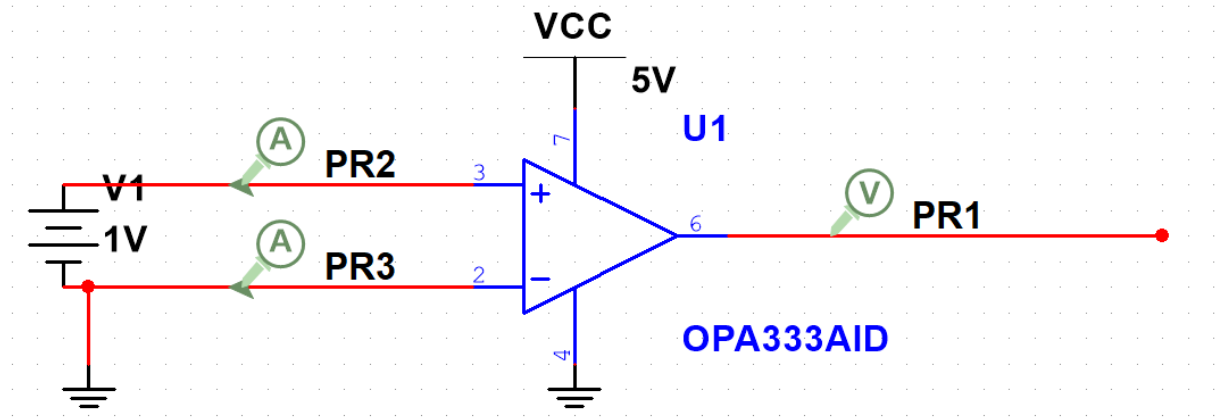
b. Lựa chọn OPAMP sử dụng, mô phỏng OPAMP theo datasheet

Khảo sát 1 số OPAMP có offset <1mV, ta có

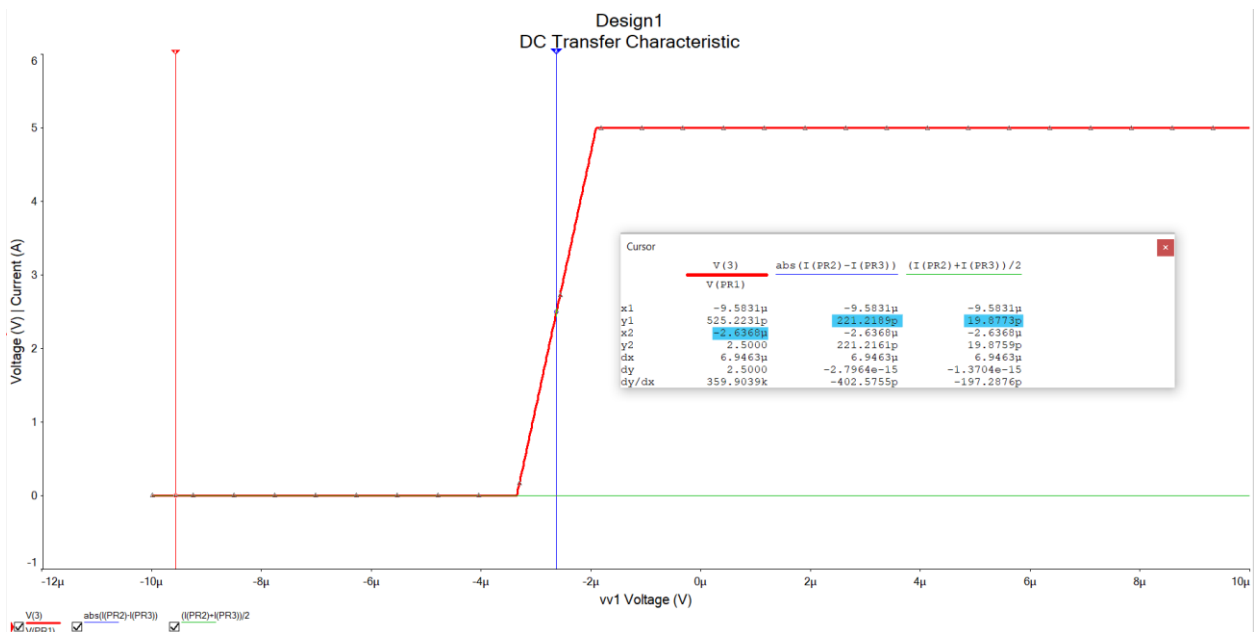
Bảng 2: So sánh đặc tính OPAMP

	MCP601	OP07	LT1014C	OPA333
Vos	700 μ V	60 μ V	60 μ V	2 μ V
Ib	1 pA	1.8 nA	12 nA	70 pA
Ios	1 pA	0.8 nA	0.15 nA	140 pA
Rail to rail	X			X
Single Supply	X		X	X
Voltage	2.7-6	± 3 - ± 18	4-44V	1.8-5.5V

Sau khi khảo sát các loại OPAMP, nhóm chọn OPA333 vì offset rất thấp, khả năng cấp nguồn đơn giúp giảm bớt sự phức tạp của mạch và output swing có thể gần như phủ từ VSS đến VCC giúp có thể giảm điện áp nguồn cấp.



Hình 3: Testbench mô phỏng Opamp OPA333



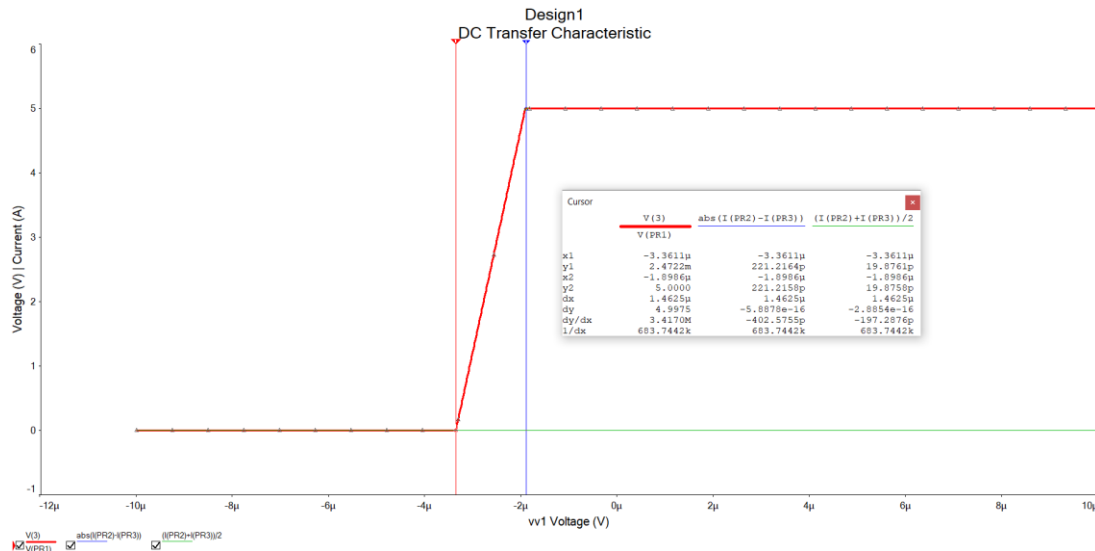
Hình 4: Đặc tuyến điện áp ngõ vào và ngõ ra của OPA333

Khảo sát đặc tuyến điện áp vào ra của OPA333, quan sát được đặc tuyến bị offset đi một khoảng 2.6μV, I_{OS} khoảng 220pA, I_b khoảng 20pA nằm trong khoảng giới hạn được đưa ra trong datasheet.

PARAMETER		TEST CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNIT
OFFSET VOLTAGE						
V _{OS}	Input offset voltage	V _S = 5 V		2	10	μV
dV _{OS} /dT	Input offset voltage drift	T _A = −40°C to 125°C		0.02	0.05	μV/°C
PSRR	Power-supply rejection ratio	V _S = 1.8 V to 5.5 V, T _A = −40°C to 125°C		1	5	μV/V
	Long-term stability ⁽¹⁾			See note ⁽¹⁾		μV
	Channel separation, dc			0.1		μV/V
INPUT BIAS CURRENT						
I _B	Input bias current	T _A = 25°C		±70	±200	pA
		T _A = −40°C to 125°C		±150		
I _{OS}	Input offset current			±140	±400	

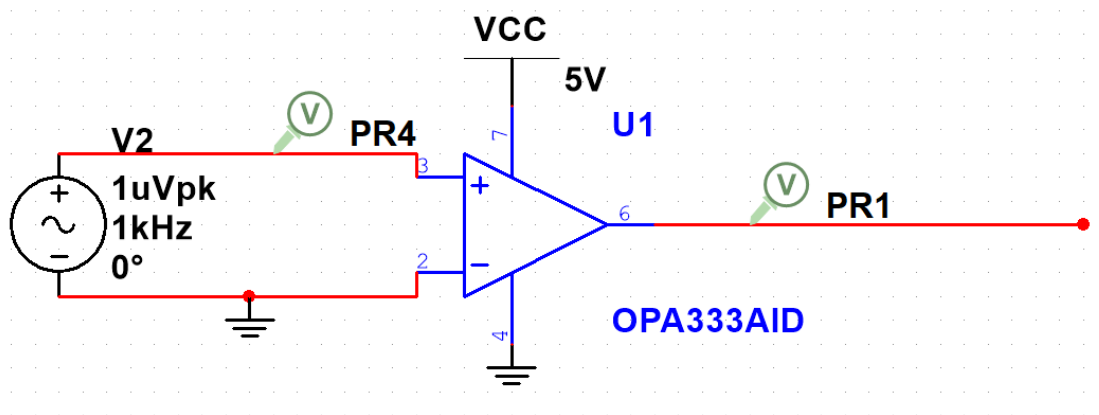
Hình 5: Một vài thông số của OPA333 trích từ datasheet

Tuy không ảnh hưởng nhiều đến bài toán này nhưng đây cũng là một thông số quan trọng vì OPAMP thực tế không phải có gain là vô cùng và là hằng số trên trục tần số. Để khảo sát thông số này, đầu tiên ta cần xác định được khoảng điện áp ngõ vào để OPAMP có thể làm việc ở mode khuếch đại.



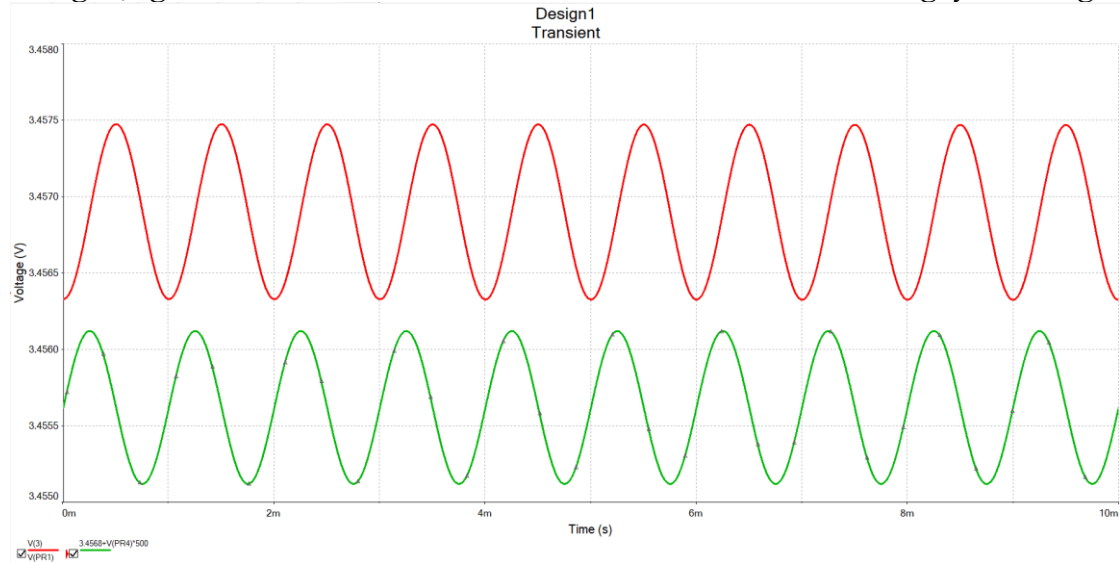
Hình 6: Khoảng điện áp ngõ vào để Opamp hoạt động ở mode khuếch đại

Từ đó có thể chọn biên độ phù hợp và mức DC phù hợp cho nguồn vào.



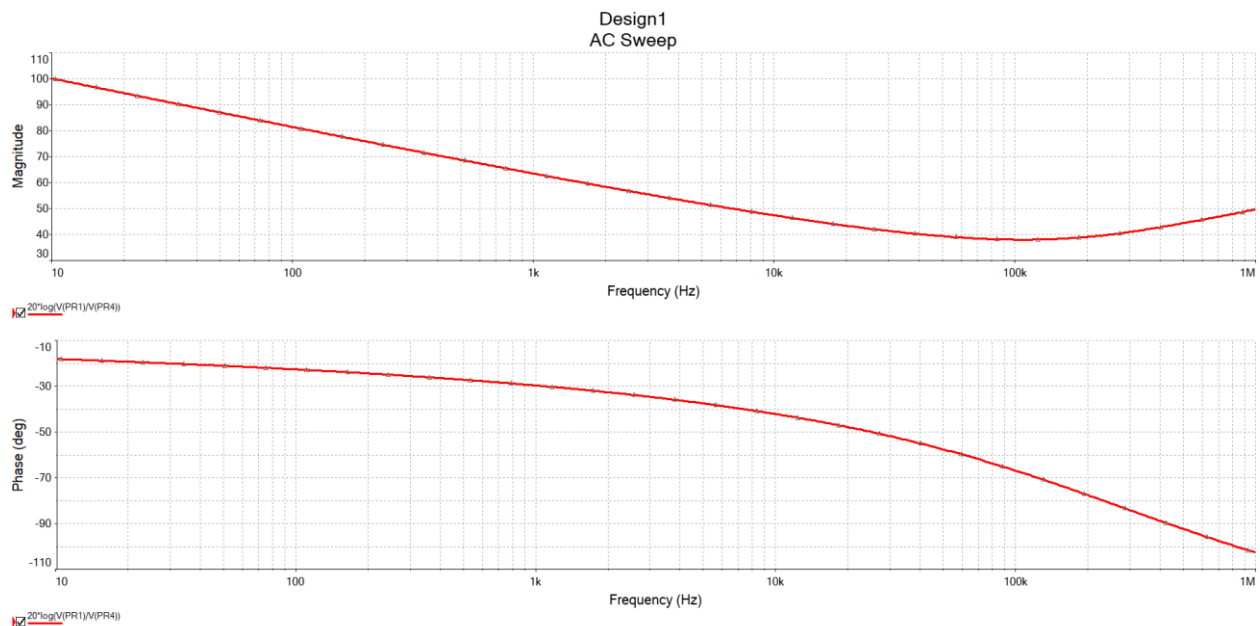
Hình 7: Testbench mô phỏng transient

Để chắc chắn OPAMP còn hoạt động ở mode khuếch đại, ta mô phỏng quá độ và quan sát dạng sóng không bị xén.



Hình 8: Mô phỏng transient ngõ vào và ngõ ra

Sau đó tiến hành mô phỏng hệ số khuếch đại vòng hở theo tần số, nhận thấy tuy biên độ có phần giống datasheet nhưng đáp ứng pha lại rất khác.



Hình 9: Khảo sát đáp ứng tần số của Opamp

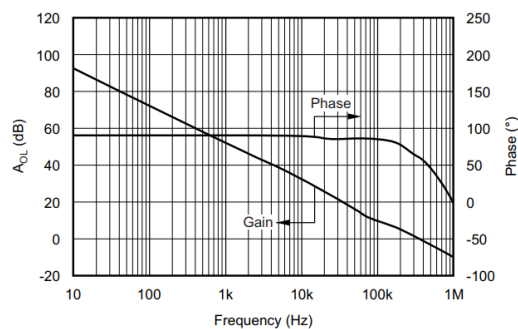
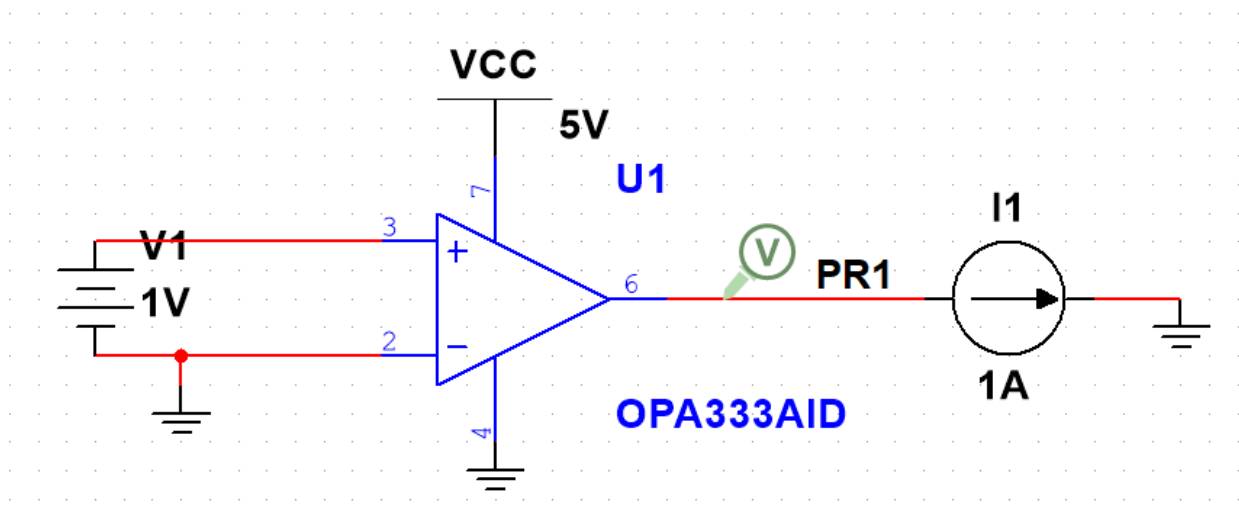
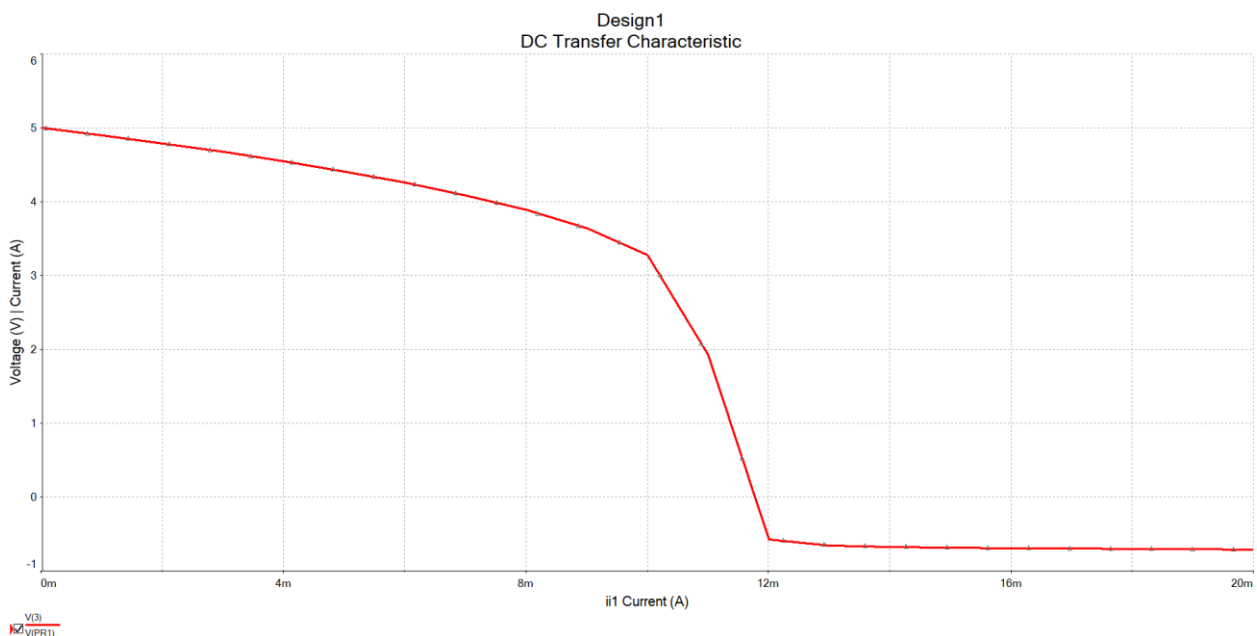


Figure 3. Open-Loop Gain and Phase vs Frequency

Hình 10: Đáp ứng tần số của Opamp trong datasheet



Hình 11: Testbench đo đáp ứng dòng ra



Hình 12: Đáp ứng dòng ra của Opamp

Quan sát đồ thị, cho thấy OPAMP này không phù hợp để lái trực tiếp dòng ngõ ra mà bài toán yêu cầu.

c. Đảm bảo sai số (giữa giá trị lý thuyết và thực tế đo qua mạch) $\pm 5\%$.

Tuyến tính hóa

Lập bảng dữ liệu bao gồm khoảng cách đo, điện áp cảm biến tương ứng và dòng ngõ ra tuyến tính theo khoảng cách trong tầm 4-20mA, với bước nhảy về dòng là 0.4571 mA.

Distance	Sim Output Voltage (V)	Circuit Current (mA)
1	2.289566705	4
1.2	2.040461358	4.457142857
1.4	1.79934909	4.914285714
1.6	1.596650791	5.371428571

...
 7.8 0.419003591 19.54285714
 8 0.412985263 20

Nhiệm vụ của mạch OPAMP mà nhóm cần thiết kế là chuyển áp của cảm biến trong bảng sang giá trị dòng tương ứng. Do quan hệ này là đường cong nên cần tuyến tính từng đoạn đặc tuyến.

Bảng 3: Bảng tuyến tính hóa 4 đoạn, trích từ sheet a. Linearization 4eq

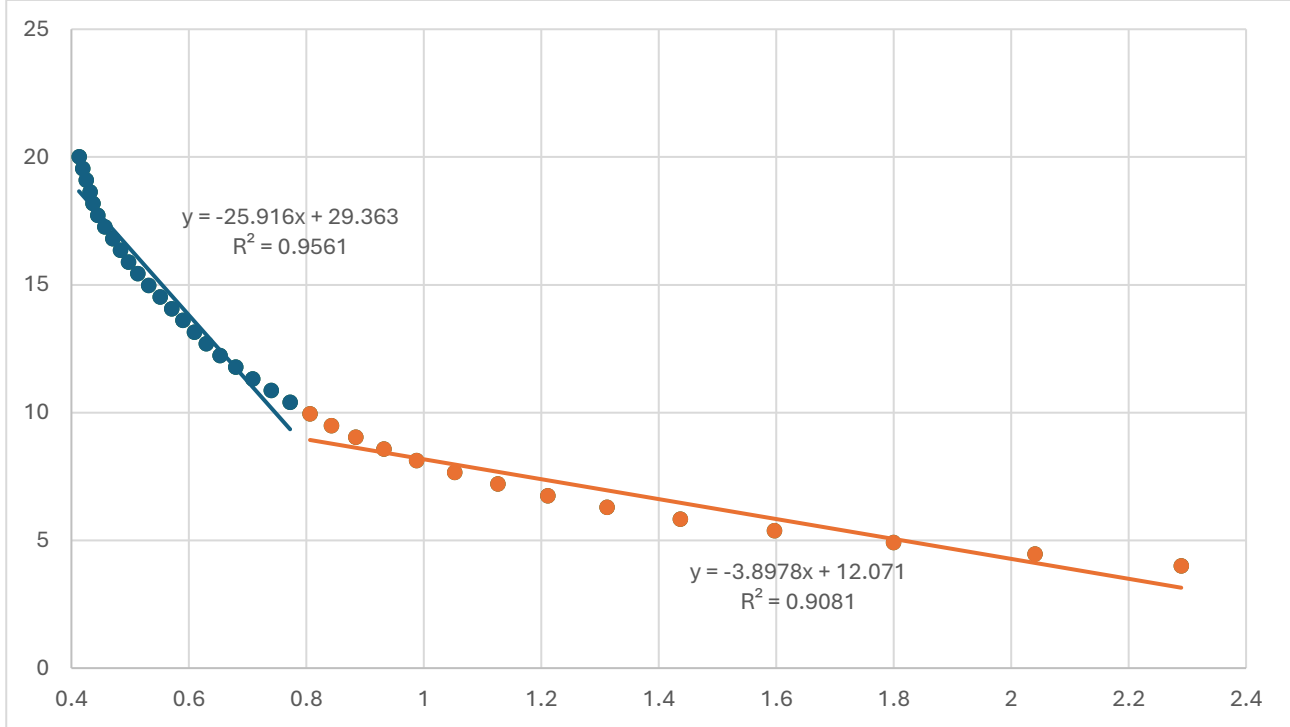
Dist (dm)	Sim Output Voltage (V)	Circuit Current (mA)	Linear (mA)	Err (%)	Range1	$\Sigma(\text{Err}1^2)$	Range2	$\Sigma(\text{Err}2^2)$	$\Sigma(\text{Err}^2)$
1	2.28956670	4	3.14672689	21.3			1 to 8dm	177.833129	177.83312
1.2	2.04046135	4.45714285	4.11768971	7.62			1.2 to 8dm	145.168546	145.16854
1.4	1.79934909	4.91428571	5.05749711	2.91	1 to 1.2dm	0	1.4 to 8dm	113.926412	113.92641
1.6	1.59665079	5.37142857	5.84757454	8.86	1 to 1.4dm	3.7036E-05	1.6 to 8dm	88.1756127	88.175649
					...				
3.2	0.88389179	9.02857142	8.62576654	4.46	1 to 3dm	1.47237058	3.2 to 8dm	14.0918894	15.564260
3.4	0.84274868	9.48571428	8.78613418	7.38	1 to 3.2dm	2.18997927	3.4 to 8dm	11.7250317	13.915011
3.6	0.80623771	9.94285714	8.92844664	10.2	1 to 3.4dm	3.14168343	3.6 to 8dm	9.78898032	12.9306638
3.8	0.77237566	10.4	9.31911237	10.3	1 to 3.6dm	4.36793469	3.8 to 8dm	8.11904556	12.486980
4	0.73991009	10.8571428	10.1604900	6.42	1 to 3.8dm	5.89944558	4 to 8dm	6.65936770	12.558813
					...				
7.4	0.43139826	18.6285714	18.1558825	2.54	1 to 7.2dm	112.813703	7.4 to 8dm	0.00054321	112.81424
7.6	0.42487202	19.0857142	18.3250167	3.99	1 to 7.4dm	126.890800	7.6 to 8dm	2.21545E-05	126.89082
7.8	0.41900359	19.5428571	18.4771029	5.45	1 to 7.6dm	142.366369	7.8 to 8dm	0	142.36636
8	0.41298526	20	18.6330739	6.83	1 to 7.8dm	159.333795			159.33379
					1 to 8dm	177.833129			177.83312
							min		12.486980

Để chọn được tầm tối ưu cho 2 phương trình hồi quy tuyến tính, ta đánh giá tổng của sai lệch bình phương

$$\Sigma(\text{Err}^2) = \Sigma(\text{Err}1^2) + \Sigma(\text{Err}2^2) =$$

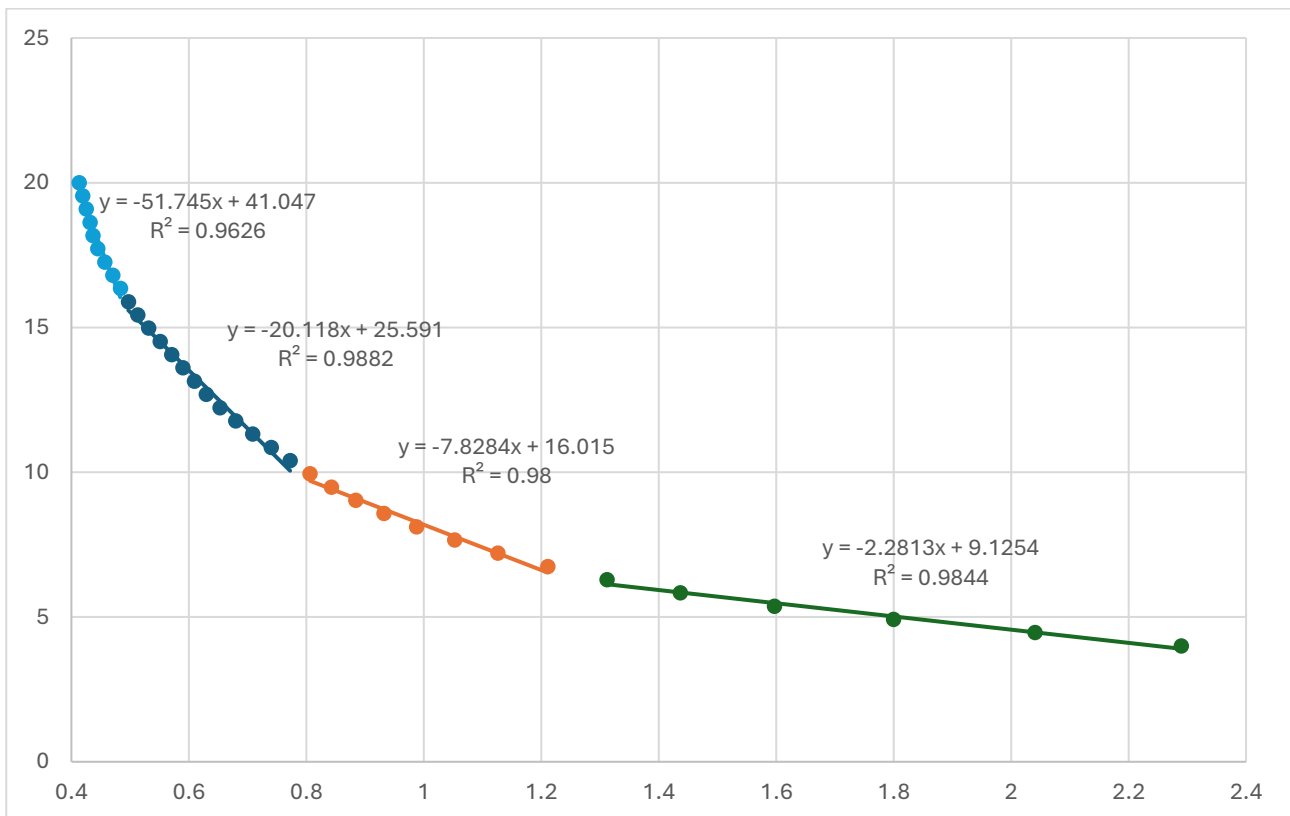
$$\Sigma_{\text{Range1}}(\text{CircuitCurrent} - \text{Eq1Current})^2 + \Sigma_{\text{Range2}}(\text{CircuitCurrent} - \text{Eq2Current})^2$$

và chọn tầm có thông số này là nhỏ nhất. Trong đó Range1 và Range2 lần lượt là khoảng không gian để thực hiện hồi quy cho đường thẳng 1 và 2. Khảo sát cho thấy giá trị tối ưu sẽ đạt được khi chia phương trình thứ nhất khoảng không gian 1-3.6 dm để hồi quy, tức khoảng điện áp từ 2.29V-0.81V và khoảng không gian còn lại cho phương trình hồi quy 2. Ta tính toán giá trị dòng trả về khi thay điện áp vào 2 phương trình hồi quy này và ghi vào cột Linear, tuy nhiên, cách này vẫn cho sai lệch lớn hơn 5% so với dòng mong muốn.



Hình 13: Tuyến tính hóa 2 đoạn

Do đó, dựa trên kết quả tối ưu đã thu được từ việc sắp xếp đường cong bằng 2 phương trình hồi quy, tiếp tục chia 2 khoảng tối ưu này làm 4 khoảng và thực hiện tương tự như trên, ta thu được 4 phương trình hồi quy tuyến tính cho sai lệch với kết quả mong muốn không hơn 5% (tham khảo a. Linearization 2eq).



Hình 14: Tuyến tính hóa 4 đoạn

Để có thể chuyển từ giá trị áp ngõ ra của cảm biến sang dòng tương ứng, 2 khối OPAMP mắc liên tầng được sử dụng. Trong đó, tầng 1 có nhiệm vụ chính tuyến tính hóa ngõ ra áp theo khoảng cách ngõ vào và tầng 2 chuyển từ áp ngõ ra tầng 1 sang dòng. Ta có biểu thức mô tả mạch.

$$I_{out}(mA) = \begin{cases} -51.745V_{sensor}(V) + 41.047; V_{sensor} \in [0.412; 0.484] & (a) \\ -20.118V_{sensor}(V) + 25.591; V_{sensor} \in [0.496; 0.773] & (b) \\ -7.8284V_{sensor}(V) + 16.015; V_{sensor} \in [0.806; 1.211] & (c) \\ -2.2813V_{sensor}(V) + 9.1254; V_{sensor} \in [1.311; 2.290] & (d) \end{cases}$$

Vậy ta có 3 điểm nút để chuyển mạch là

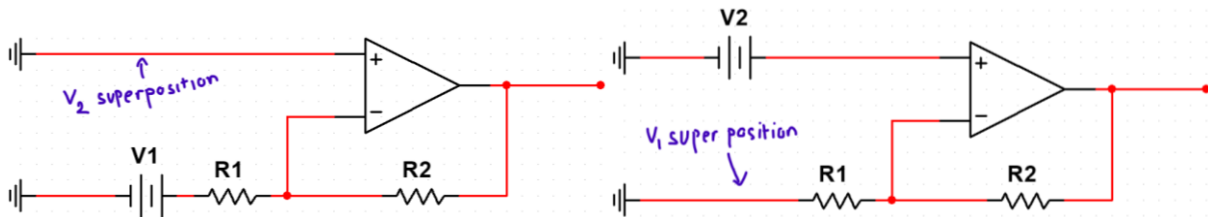
$$\begin{cases} (a) \text{ và } (b): \frac{0.496 + 0.484}{2} \pm \frac{0.496 - 0.484}{2} \times \frac{1}{10} = 0.49V \pm 0.6mV \\ (b) \text{ và } (c): \frac{0.806 + 0.773}{2} \pm \frac{0.806 - 0.773}{2} \times \frac{1}{10} = 0.7895V \pm 1.65mV \\ (c) \text{ và } (d): \frac{1.311 + 1.211}{2} \pm \frac{1.311 - 1.211}{2} \times \frac{1}{10} = 1.261V \pm 5mV \end{cases}$$

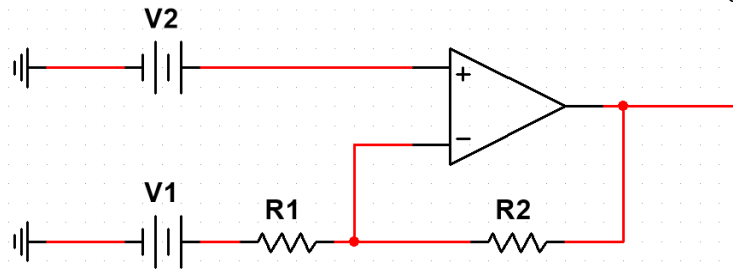
Đối với vấn đề chuyển mạch, ta có thể dùng 3 OPAMP không hồi tiếp so sánh với các điện áp này, với điều kiện V_{OS} phải nhỏ hơn khoảng dao động. Tuy nhiên, do em nghĩ phần này là phụ nên em tính thiết kế phần này sau khi đã tính toán xong các tầng, nguồn cấp và nguồn tham chiếu cho 4 phương trình hồi quy cùng offset của mạch, nếu thêm 3 OPAMP này vào sẽ phải tính toán thêm 3 cầu chia áp, kết hợp với tính toán ảnh hưởng của offset current (do cực âm của OPAMP giờ nối với cầu chia áp nên phải xét thêm ảnh hưởng của offset current thay vì chỉ offset voltage) đồng thời cũng phải tính toán lại ảnh hưởng của offset lên ngõ ra do mắc thêm trở, ảnh hưởng mới của 3 OPAMP lên tầng 1 và đồng thời cũng phát sinh thêm chi phí. Nhóm dùng Bluepill nhóm có sẵn, có ADC 12bit, tham chiếu với điện áp 2.495V tạo ra bởi TL431 để so sánh các ngưỡng điện áp trên và chuyển mạch tương ứng, độ phân giải của ADC là 0.6 mV phù hợp với ngưỡng trên.

Tầng 1

4 phương trình hồi quy tuyến tính đều có kết quả phải là hiệu của hai số, nên ở tầng này ta thiết kế mạch trừ.

Đối với khối trừ, để thực hiện, ta thấy mạch khuếch đại đảo và không đảo giống như là 2 trường hợp áp dụng định lý chồng chập cho một mạch lớn hơn, nên khi ghép cả 2 nguồn V_1, V_2 lại, ta có mạch có ngõ ra là $-V_1 \times \frac{R_2}{R_1} + V_2 \times \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) = \frac{R_2}{R_1} \left(-V_1 + V_2 \times \left(\frac{R_1}{R_2} + 1\right)\right)$



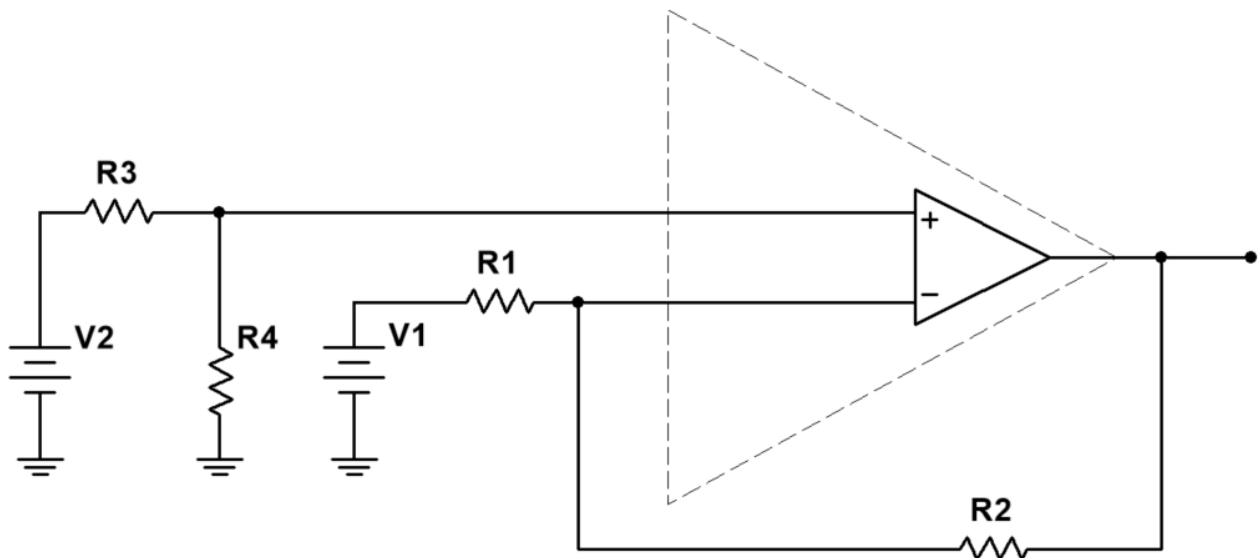


Hình 15: Mạch trừ

Mặc khác, viết lại 4 phương trình hồi quy tuyến tính như sau:

$$I_{OUT}(mA) = \begin{cases} 51.745 \left(-V_{sensor}(V) + \frac{41.047}{51.745} \right) & (a) \\ 20.118 \left(-V_{sensor}(V) + \frac{25.591}{20.118} \right) & (b) \\ 7.8284 \left(-V_{sensor}(V) + \frac{16.015}{7.8284} \right) & (c) \\ 2.2813 \left(-V_{sensor}(V) + \frac{9.1254}{2.2813} \right) & (d) \end{cases}$$

Nếu tiếp tục sử dụng cấu trúc mạch trừ ở trên thì nguồn V_2 phải có số rất lẻ. Để giải quyết vấn đề này, chọn một nguồn điện áp lớn hơn hoặc bằng điện áp tối đa V_2 trong 4 phương trình hồi quy và dùng cầu chia áp để điều chỉnh xuống giá trị phù hợp. Đặt $V_{REF} = V_2 \times \frac{R_4}{R_3 + R_4}$

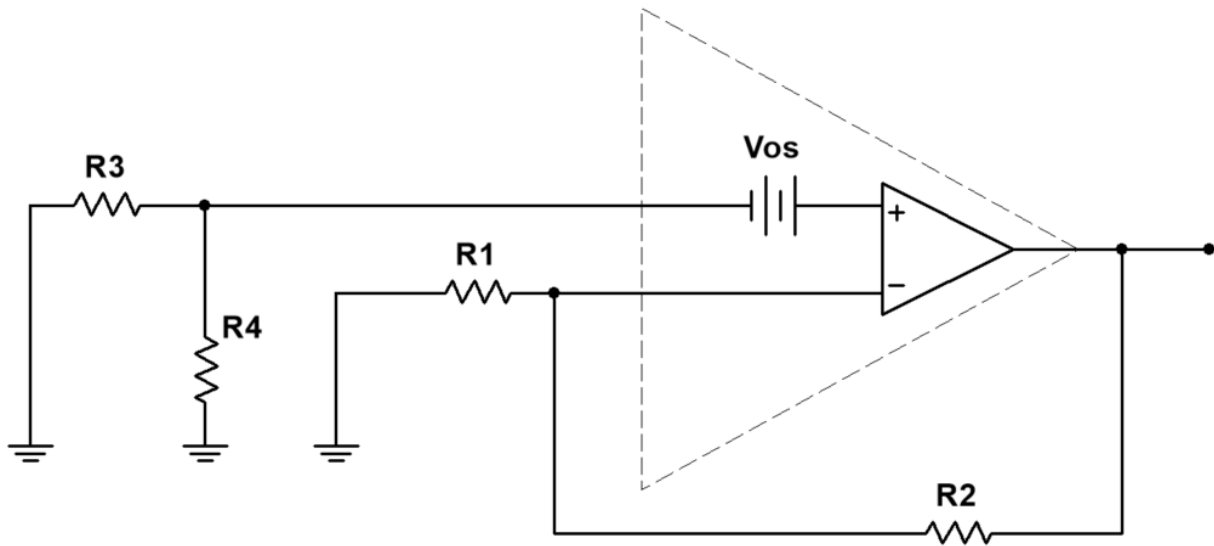


Hình 16: Tầng 1

Ngõ ra của tầng 1 bây giờ có dạng: $\frac{R_2}{R_1} \left(-V_1 + V_2 \times \left(\frac{R_1}{R_2} + 1 \right) \right) \times \frac{R_4}{R_3 + R_4}$

Với điều kiện: $V_{outmax} \geq \frac{R_2}{R_1} \left(-V_1 + V_2 \times \left(\frac{R_1}{R_2} + 1 \right) \right) \times \frac{R_4}{R_3 + R_4} \geq V_{outmin}$

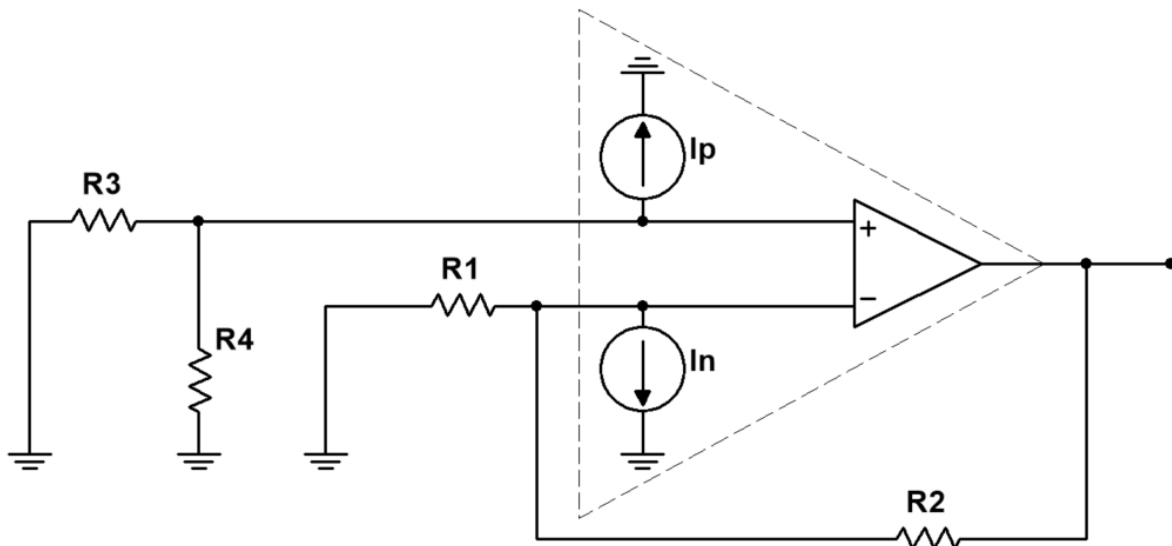
Xét ảnh hưởng của V_{os} :



Hình 17: Tầng 1 xét offset về áp

$$\text{Ta có } V_o = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) V_{os} \rightarrow \Delta V = \pm \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) V_{os}$$

Xét ảnh hưởng của I_{os} và I_b :



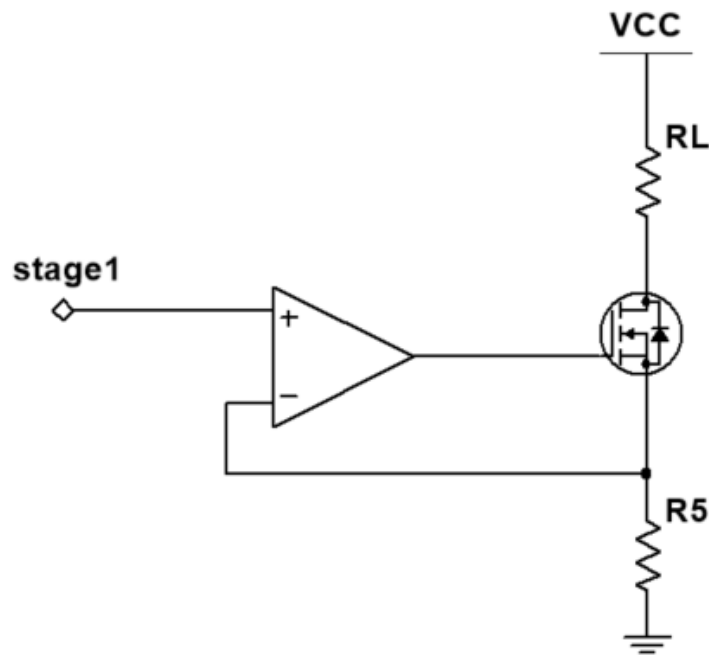
Hình 18: Tầng 1 xét offset về dòng

$$\begin{aligned} v^+ &= I_p(R_3 \parallel R_4); \quad v^- \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) + I_n - \frac{v_o}{R_2} = 0 \\ \rightarrow v_o &= I_p(R_3 \parallel R_4) \left(\frac{R_2}{R_1} + 1 \right) + I_n R_2 \\ \rightarrow \Delta V &= \pm \left(\frac{I_p(R_3 \parallel R_4)}{R_1 \parallel R_2} R_2 + I_n R_2 \right) \end{aligned}$$

Vậy tổng ảnh hưởng của offset lên tầng 1 là:

$$\Delta V = \pm \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) V_{os} \pm \left(\frac{I_p(R_3 \parallel R_4)}{R_1 \parallel R_2} R_2 + I_n R_2 \right)$$

Sử dụng mạch chuyển đổi V-I cho loại tải thả nổi, khảo sát ở trên cho thấy OPAMP không thể đảm bảo nguyên vẹn ngõ ra với tầm dòng điện mà đề yêu cầu nên sử dụng cấu trúc có MOSFET.



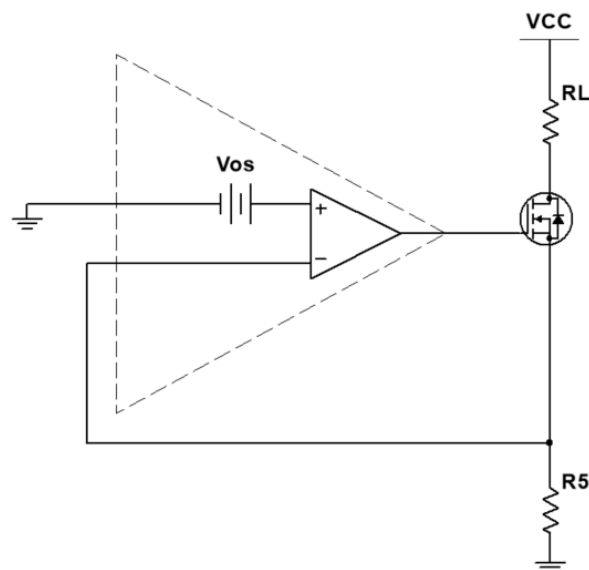
Hình 19: Tầng 2

Ta có biểu thức của ngõ ra tầng 2: $I_L = \frac{v^+}{R_5}$

Đặt yêu cầu tải phải đạt được tới 100Ω ,

Trong đó, $V_{CC} > I_L (R_5 + R_L) + V_{DS@ (I_D = I_{max})}$ hay $\frac{V_{CC} - V_{DS@ (I_D = I_{max})}}{I_{max}} - R_5 > R_L$

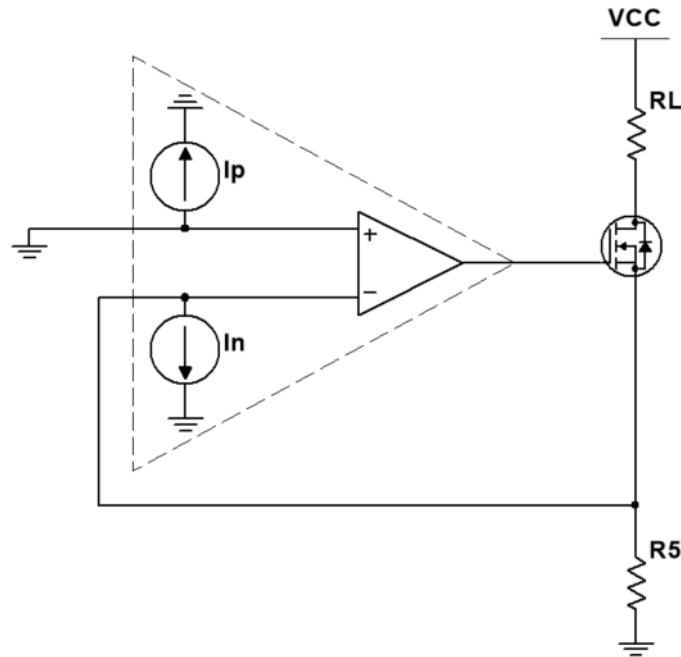
Xét ảnh hưởng của V_{os} :



Hình 20: Tầng 2 xét offset về áp

Ta có $I_L = \frac{V_{os}}{R_5} \rightarrow \Delta I_L = \pm \frac{V_{os}}{R_5}$

Xét ảnh hưởng của I_{os} và I_b :



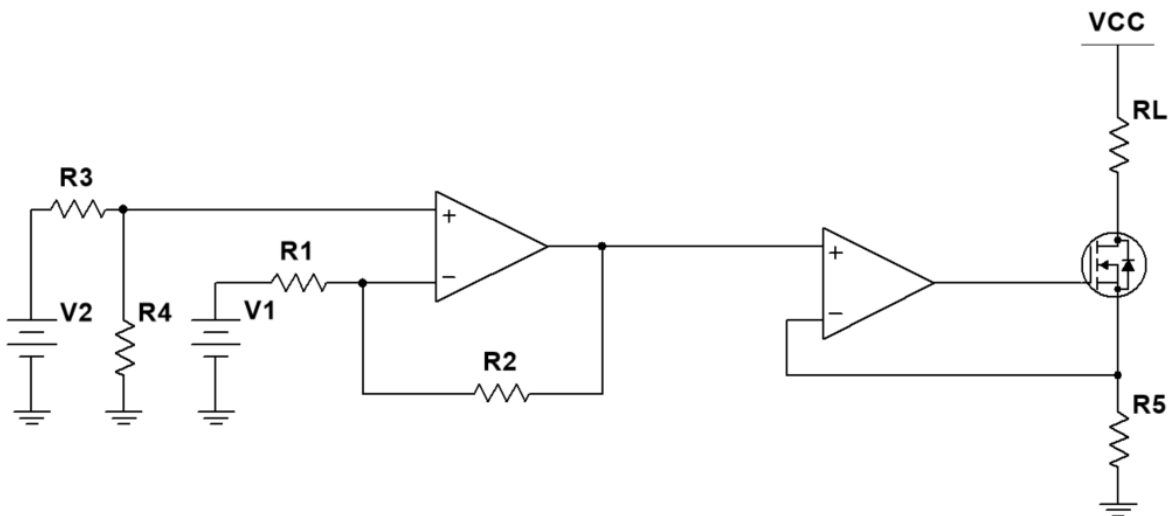
Hình 21: Tầng 2 xét offset về dòng

Ta có $I_L = I_n \rightarrow \Delta I_L = \pm I_n$

Vậy tổng ảnh hưởng của offset lên tầng 2 là:

$$\Delta V = \pm \frac{V_{os}}{R_5} \pm I_n$$

Ghép liên tầng



Hình 22: Tầng 1 và 2

Tóm gọn, ta có thể miêu tả hệ thống như sau với

Ngõ ra của hệ thống là:

$$I_{out} = \frac{1}{R_5} \times \left[\frac{R_2}{R_1} \left(-V_1 + V_2 \times \left(\frac{R_1}{R_2} + 1 \right) \times \frac{R_4}{R_3 + R_4} \right) \right] \text{ thay đổi trong } [4; 20\text{mA}]$$

Ảnh hưởng của offset lên hệ thống:

$$\Delta I = \pm \frac{1}{R_5} \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) V_{os} \pm \frac{1}{R_5} \left(\frac{I_p(R_3 \parallel R_4)}{R_1 \parallel R_2} R_2 + I_n R_2 \right) \pm \frac{V_{os}}{R_5} \pm I_n$$

Giới hạn của điện trở tải, từ phần chọn nguồn cấp, có $V_{CC} = 5V$:

$$\begin{aligned} \frac{5 - V_{DS@I_D=20\text{mA}}}{20\text{mA}} - R_5 &> R_L \\ \rightarrow 250 &> R_5 + R_L + \frac{V_{DS}}{20\text{mA}} \end{aligned}$$

Cùng với giới hạn áp ngõ ra của tầng 1:

$$\frac{R_2}{R_1} \left(-V_1 + V_2 \times \left(\frac{R_1}{R_2} + 1 \right) \times \frac{R_4}{R_3 + R_4} \right) \in [V_{outmin}; V_{outmax}]$$

Hay

$$I_{out} R_5 \in (V_{outmin}; V_{outmax}) \rightarrow \begin{cases} \min I_{out} \times R_5 \geq V_{outmin} \\ \max I_{out} \times R_5 \leq V_{outmax} \end{cases}$$

Với V_1 thay đổi trong khoảng $0.4 - 2.3V$

Ta có thể rút ra được một số nhận xét định tính như sau:

- Tăng R_5 giúp giảm ΔI nhưng đổi lại là giá trị tối đa của R_L giảm.
- Giảm $R_3 \parallel R_4$ giúp giảm ΔI nhưng phải cân đối với dòng mà khối chia áp rút từ nguồn V_2 .

Chọn nguồn cấp cho mạch

Xét đồ thị liên hệ giữa áp ra cảm biến và dòng ra của mạch tương ứng, kết hợp với cấu trúc của mạch, hoạt động của mạch không tạo ra điện áp âm nên có thể cấp nguồn đơn cho mạch.

Đồng thời OPA333 cũng là rail to rail OPAMP, mô phỏng đặc tính OPAMP ở câu b cho thấy swing của OPAMP trải dài từ $V_{SS} + 0.05\%(V_{CC} - V_{SS})$ tới $V_{CC} - 0.05\%(V_{CC} - V_{SS})$ nên $V_{outmin} \approx V_{SS}$ và $V_{outmax} \approx V_{CC}$.

Nhóm lựa chọn nguồn đơn 5V, giá trị này cân bằng giữa tính phổ biến của loại áp này và tầm giá trị tương đối rộng cho áp tầng 1 khi mà giá trị cấp nguồn đơn tối đa mà nhà sản xuất khuyến nghị là 5.5V.

Tuy nhiên, để đề phòng nguồn 5V không cung cấp đúng điện áp mà thấp hơn (nhóm giả sử là khác biệt 10% trở xuống), chọn $V_{outmax} = 90\%V_{CC} = 4.5V$.

Đồng thời, khi tiến hành đo đặc tuyến của OPAMP ngoài thực tế ở các bước sau, nhóm quan sát thấy gain của OPAMP không ổn định khi điện áp ngõ ra nhỏ hơn 10% V_{CC} nên chọn $V_{outmin} = 10\%V_{CC} = 0.5V$.

$$\text{Từ đó, ta có: } \begin{cases} 4mA \times R_5 \geq 0.5 \\ 20mA \times R_5 \leq 4.5 \end{cases} \rightarrow 225 \geq R_5 \geq 125 (\Omega), \text{ chọn } R_5 = \mathbf{150\Omega}$$

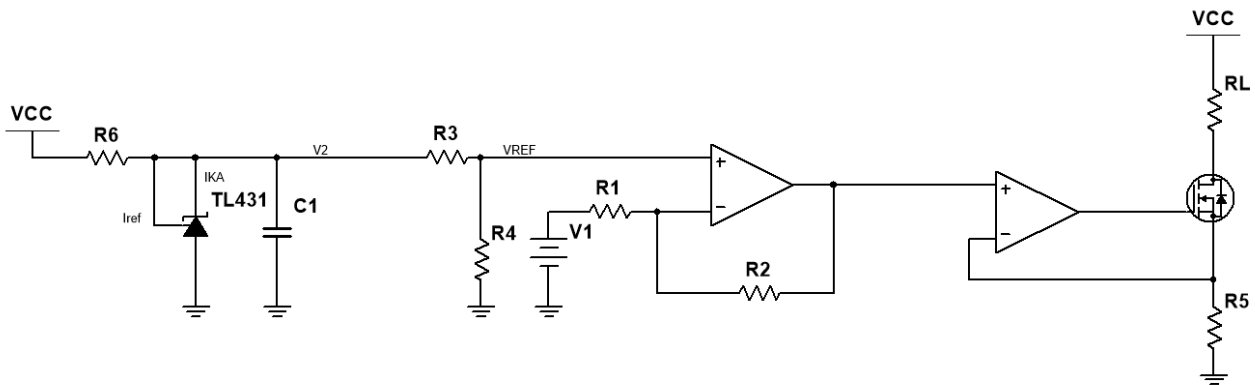
$$\rightarrow 100\Omega > R_L + \frac{V_{DS}}{20mA}$$

Offset

Từ datasheet OPA333, có $\max V_{os} = 10\mu V$, $\max I_b = 200pA$, $\max I_{os} = 400pA$

$$\rightarrow \begin{cases} I_p = 400pA \\ I_n = 0 \end{cases} \text{ hay } \begin{cases} I_p = 0 \\ I_n = 400pA \end{cases}$$

Vậy ta có hệ thống ghép liên tầng kèm khối tạo nguồn như sau:



Hình 23: Tầng 1 và 2 có mạch tạo điện áp tham chiếu

Khi này, offset của hệ thống sẽ có chút thay đổi, ở chỗ ảnh hưởng của offset dòng của tầng 1 lên ngõ ra.

$$\Delta I = \underbrace{\pm \frac{1}{R_5} \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) V_{os}}_{\text{voltage offset từ tầng 1}} \pm \underbrace{\frac{1}{R_5} \left(\frac{I_p ((R_3 \text{ nt } R_6) \parallel R_4)}{R_1 \parallel R_2} R_2 + I_n R_2 \right)}_{\text{current offset từ tầng 1}}$$

$$\pm \frac{V_{os}}{R_5} \quad \pm I_n \quad (\text{mA})$$

voltage offset từ tầng 2 current offset từ tầng 2

$$\Delta I = \underbrace{\pm \frac{1}{0.15} \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) 10\mu V}_{\text{voltage offset từ tầng 1}} \pm \underbrace{\frac{1}{0.15} \left(\frac{I_p ((R_3 \text{ nt } R_6) \parallel R_4)}{R_1 \parallel R_2} R_2 + I_n R_2 \right)}_{\text{current offset từ tầng 1}}$$

$$\pm \frac{10\mu V}{0.15} \quad \pm 400pA \text{ (tệ nhất)}$$

voltage offset từ tầng 2 current offset từ tầng 2

Đặt mục tiêu $|\Delta I| \ll$ bước nhảy về dòng (nhỏ hơn 50 lần), xét trường hợp tệ nhất, lưu ý, vì đơn vị dòng điện đang xét trong công thức sau là mA nên R có đơn vị là k Ω .

$$\begin{aligned}
 |\Delta I| &= \frac{1}{0.15} \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) 10\mu V + \frac{1}{0.15} \left(\frac{I_p((R_3 \text{ nt } R_6) \parallel R_4)}{R_1 \parallel R_2} R_2 + I_n R_2 \right) + \frac{10\mu V}{0.15} + 400\text{pA} \\
 &= \frac{10^{-5}}{0.15} \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) + \frac{1}{0.15} \left(\frac{I_p((R_3 \text{ nt } R_6) \parallel R_4)}{R_1 \parallel R_2} R_2 + I_n R_2 \right) + \frac{10^{-5}}{0.15} + 4 \times 10^{-7} \text{ (mA)} \\
 |\Delta I| &< \frac{0.4571\text{mA}}{50} \\
 &\rightarrow \frac{10^{-5}}{0.15} \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) + \frac{1}{0.15} \left(\frac{I_p((R_3 \text{ nt } R_6) \parallel R_4)}{R_1 \parallel R_2} R_2 + I_n R_2 \right) + \frac{10^{-5}}{0.15} + 4 \times 10^{-7} \\
 &\quad < 9.142 \times 10^{-3} \\
 &\rightarrow \frac{R_2}{R_1} + \left(\frac{(10^5 I_p)((R_3 \text{ nt } R_6) \parallel R_4)}{R_1 \parallel R_2} + 10^5 I_n \right) R_2 < 137 \\
 &\rightarrow \left\{ \begin{aligned} \frac{R_2}{R_1} + \left(\frac{(10^5 \times 0)((R_3 \text{ nt } R_6) \parallel R_4)}{R_1 \parallel R_2} + 10^5 \times 400 \times 10^{-9} \right) R_2 < 137 \\ \frac{R_2}{R_1} + \left(\frac{(10^5 \times 400 \times 10^{-9})((R_3 \text{ nt } R_6) \parallel R_4)}{R_1 \parallel R_2} + 10^5 \times 0 \right) R_2 < 137 \end{aligned} \right. \\
 &\rightarrow \left\{ \begin{aligned} \frac{R_2}{R_1} + 0.04 R_2 < 137 \\ \frac{R_2}{R_1} + 0.04((R_3 \text{ nt } R_6) \parallel R_4) \frac{R_2}{R_1 \parallel R_2} = \frac{R_2}{R_1} + 0.04((R_3 \text{ nt } R_6) \parallel R_4) \frac{R_2}{R_1} < 137 \end{aligned} \right. \\
 &\rightarrow \text{chọn hệ số khuếch đại của tầng 1} < 50, R_2 < 2\text{M}\Omega \\
 &\rightarrow ((R_3 \text{ nt } R_6) \parallel R_4) < 68.5\text{k}\Omega \\
 &\rightarrow \text{Chọn } R_4 < 68.5\text{k}\Omega
 \end{aligned}$$

Chọn nguồn tham chiếu và cầu chia áp

Ta có ngõ ra

$$I_{out} = \frac{1}{R_5} \times \left[\frac{R_2}{R_1} \left(-V_1 + V_2 \times \left(\frac{R_1}{R_2} + 1 \right) \times \frac{R_4}{R_3 + R_4} \right) \right]$$

Kết hợp 4 phương trình hồi quy (a), (b), (c), (d)

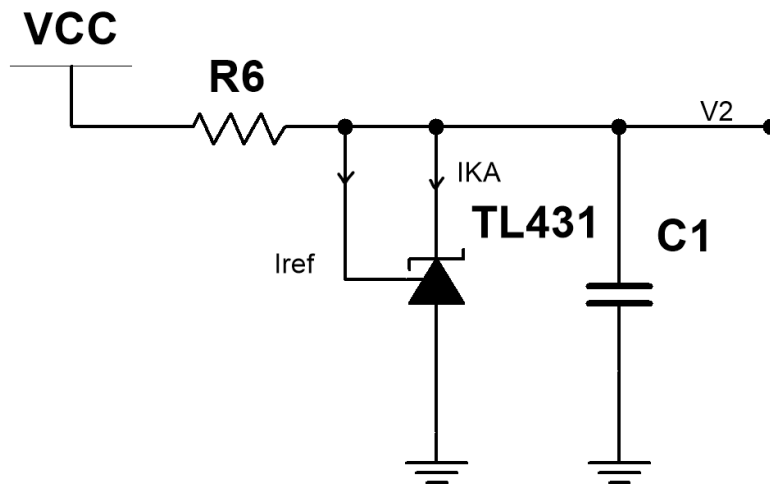
$$I_{out}(\text{mA}) = \begin{cases} 51.745 \left(-V_{sensor}(V) + \frac{41.047}{51.745} \right) & (a) \\ 20.118 \left(-V_{sensor}(V) + \frac{25.591}{20.118} \right) & (b) \\ 7.8284 \left(-V_{sensor}(V) + \frac{16.015}{7.8284} \right) & (c) \\ 2.2813 \left(-V_{sensor}(V) + \frac{9.1254}{2.2813} \right) & (d) \end{cases}$$

Vậy

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{REFa} = V_2 \times \frac{R_4}{R_{3a} + R_4} = \frac{\frac{41.047}{51.745}}{\frac{1}{51.745R_5} + 1} \approx 0.703V \\ V_{REFb} = V_2 \times \frac{R_4}{R_{3b} + R_4} = \frac{\frac{25.591}{20.118}}{\frac{1}{20.118R_5} + 1} \approx 0.955V \\ V_{REFc} = V_2 \times \frac{R_4}{R_{3c} + R_4} = \frac{\frac{16.015}{7.8284}}{\frac{1}{7.8284R_5} + 1} \approx 1.105V \\ V_{REFd} = V_2 \times \frac{R_4}{R_{3d} + R_4} = \frac{\frac{9.1254}{2.2813}}{\frac{1}{2.2813R_5} + 1} \approx 1.020V \end{array} \right.$$

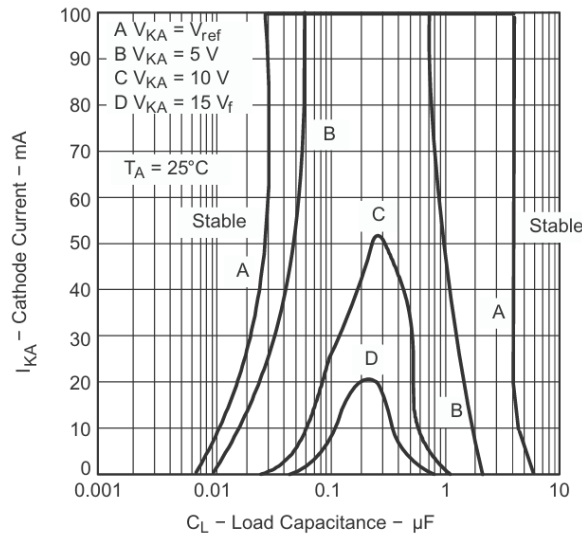
Để tạo được các nguồn V_{ref} ổn định với các giá trị ngõ vào không chính xác là 5V, sử dụng TL431 để tạo nguồn V_2 rồi tiến hành chia áp xuống 4 giá trị $V_{REFa}, V_{REFb}, V_{REFc}, V_{REFd}$.

Ta có cấu trúc mạch tạo điện áp tham chiếu V_2 như sau:



Hình 24: Mạch tạo áp tham chiếu

Với R_6 có vai trò đảm bảo dòng đi qua Kathode (I_{Ka}) của TL431 không vượt quá 100mA nhưng vẫn phải đủ lớn ($>1mA$) để TL431 có thể tạo điện áp tham chiếu. Tụ C_1 có thể bỏ nếu đảm bảo tụ ký sinh trên đường dây V_o nhỏ. Tuy nhiên để đảm bảo an toàn, chọn tụ C_1 đủ lớn để đảm bảo ngõ ra không bị dao động, chọn tụ $C_1 = 10\mu F$.



The areas under the curves represent conditions that can cause the device to oscillate. For curves B, C, and D, R_2 and V_+ are adjusted to establish the initial V_{KA} and I_{KA} conditions, with $C_L = 0$. V_{BATT} and C_L then are adjusted to determine the ranges of stability.

Hình 25: Đồ thị ổn định của TL431

Tuy nhiên V_2 không phải lúc nào cũng bằng không cố định mà thay đổi theo I_{KA} , với cách mắc này, ta có $V_2 = V_{NOM} + (I_{KA} - I_{NOM}) \times Z_{KA}$; $I_{KA} = \frac{V_{CC} - V_2}{R_6} - I_{ref} - I_L$

Với $I_{NOM} = 10\text{mA}$; $V_{NOM} = 2.495\text{V}$ (typ.); $Z_{KA} = 0.2\Omega$ (typ.); $I_{REF} = 2\mu\text{A}$ (typ.); I_L là dòng ra tải mà trong trường hợp này là dòng qua cầu chia áp R_3, R_4 ; I_{KA} là dòng phân cực đi vào Kathode của IC, dòng này phải lớn hơn 1mA để IC có thể tạo ra điện áp tham chiếu và nhỏ hơn giá trị tối đa 100mA nhà sản xuất đề ra.

PARAMETER	TEST CIRCUIT	TEST CONDITIONS		MIN	TYP	MAX	UNIT	
V _{ref}	Reference Voltage	See Figure 7-1	V _{KA} = V _{ref} , I _{KA} = 10mA		2440	2495	2550	mV
V _{I(dev)}	Deviation of reference input voltage over full temperature range ⁽¹⁾	See Figure 7-1	V _{KA} = V _{ref} , I _{KA} = 10mA	SOT23-3 and TL432 devices	6	16	mV	
				All other devices	4	25	mV	
ΔV _{ref} / ΔV _{KA}	Ratio of change in reference voltage to the change in cathode voltage	See Figure 7-2	I _{KA} = 10mA	ΔV _{KA} = 10V- V _{ref}	-1.4	-2.7	mV/V	
				ΔV _{KA} = 36V- 10V	-1	-2	mV/V	
I _{ref}	Reference Input Current	See Figure 7-2	I _{KA} = 10mA, R1 = 10kΩ, R2 = ∞		2	4	μA	
I _{I(dev)}	Deviation of reference input current over full temperature range ⁽¹⁾	See Figure 7-2	I _{KA} = 10mA, R1 = 10kΩ, R2 = ∞		0.4	1.2	μA	
I _{min}	Minimum cathode current for regulation	See Figure 7-1	V _{KA} = V _{ref}		0.4	1	mA	
I _{off}	Off-state cathode current	See Figure 7-3	V _{KA} = 36V, V _{ref} = 0		0.1	1	μA	
Z _{KA}	Dynamic Impedance ⁽²⁾	See Figure 7-1	V _{KA} = V _{ref} , f ≤ 1kHz, I _{KA} = 1mA to 100mA		0.2	0.5	Ω	

Hình 26: Trích datasheet đặc tính TL431

Do cầu chia áp R_3, R_4 phải thay đổi để tạo $V_{REFa}, V_{REFb}, V_{REFc}, V_{REFd}$ khác nhau, I_L không cố định dẫn tới I_{KA} không cố định dẫn tới sự thay đổi của V_2 . Để có thể bỏ qua ảnh hưởng của dòng tải này, chọn $I_{KA} \gg I_L$ (hơn 10 lần).

Nhóm 6: Mạch ngõ ra dòng đo cảm biến hồng ngoại

$$\text{Chọn } I_{KA} = 10mA \rightarrow \begin{cases} I_L < 1mA \rightarrow \frac{V_2}{R_3+R_4} < 1mA \\ V_2 = 2.495V + (10mA - 10mA) \times 0.2 = 2.495V \\ \rightarrow R_3 + R_4 > 2.495k\Omega \end{cases}$$

Giữ cố định R_4 , thay đổi R_3 để tạo các áp tương ứng cho 4 phương trình hồi quy (a), (b), (c), (d). Ta có:

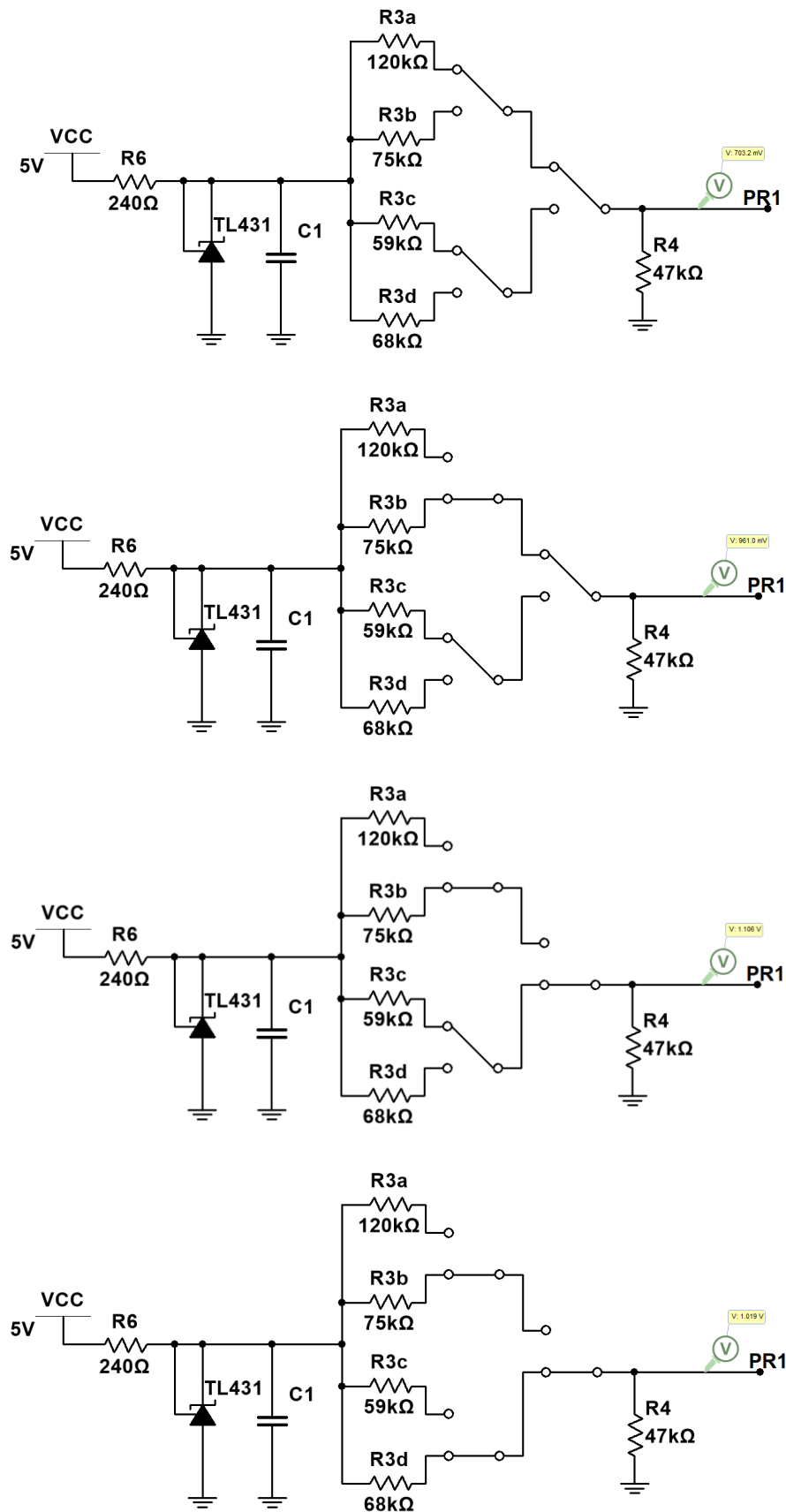
$$\begin{cases} \frac{R_4}{R_{3a} + R_4} = \frac{V_{REFa}}{V_2} \\ \frac{R_4}{R_{3b} + R_4} = \frac{V_{REFb}}{V_2} \\ \frac{R_4}{R_{3c} + R_4} = \frac{V_{REFc}}{V_2} \\ \frac{R_4}{R_{3d} + R_4} = \frac{V_{REFd}}{V_2} \end{cases} \rightarrow \begin{cases} R_{3a} = \left(\frac{V_2}{V_{REFa}} - 1 \right) R_4 \\ R_{3b} = \left(\frac{V_2}{V_{REFb}} - 1 \right) R_4 \\ R_{3c} = \left(\frac{V_2}{V_{REFc}} - 1 \right) R_4 \\ R_{3d} = \left(\frac{V_2}{V_{REFd}} - 1 \right) R_4 \end{cases} \rightarrow \begin{cases} R_{3a} = \left(\frac{2.495V}{0.703V} - 1 \right) R_4 \\ R_{3b} = \left(\frac{2.495V}{0.955V} - 1 \right) R_4 \\ R_{3c} = \left(\frac{2.495V}{1.105V} - 1 \right) R_4 \\ R_{3d} = \left(\frac{2.495V}{1.020V} - 1 \right) R_4 \end{cases}$$

Thay số và lập bảng tính (trong sheet c. R3, R4), ta có các giá trị gần nhất với $R_{3a}, R_{3b}, R_{3c}, R_{3d}, R_4$ mà đảm bảo điều kiện chặn trên (đề cập trong phần offset) và chặn dưới ($R_3 + R_4 > 2.495k\Omega$) của R_4 là

$$\mathbf{R_4 = 47k\Omega, R_{3a} = 120k\Omega, R_{3b} = 75k\Omega, R_{3c} = 59k\Omega, R_{3d} = 68k\Omega}$$

$$I_{KA} = \frac{V_{CC} - V_2}{R_6} - I_L \approx \frac{5 - V_2}{R_6} \rightarrow R_6 = \frac{5 - 2.495}{10mA} = 250.5\Omega \rightarrow \text{chọn } \mathbf{R_6 = 240\Omega}$$

$$\text{Thay số vào tính lại} \begin{cases} V_{REFa} = 0.702V \text{ (lệch 0.14\%)} \\ V_{REFb} = 0.961V \text{ (lệch 0.63\%)} \\ V_{REFc} = 1.106V \text{ (lệch 0.1\%)} \\ V_{REFd} = 1.020V \text{ (gần như 0)} \end{cases}$$



Hình 27: Kết quả mô phỏng mạch tạo áp tham chiếu

$$\begin{cases} \frac{1}{0.15} \frac{R_2}{R_{1a}} = 51.745 \\ \frac{1}{0.15} \frac{R_2}{R_{1b}} = 20.118 \\ \frac{1}{0.15} \frac{R_2}{R_{1c}} = 7.8284 \\ \frac{1}{0.15} \frac{R_2}{R_{1d}} = 2.2813 \end{cases} \rightarrow \begin{cases} R_{1a} = \frac{1}{0.15} \frac{R_2}{51.745} \\ R_{1b} = \frac{1}{0.15} \frac{R_2}{20.118} \\ R_{1c} = \frac{1}{0.15} \frac{R_2}{7.8284} \\ R_{1d} = \frac{1}{0.15} \frac{R_2}{2.2813} \end{cases}$$

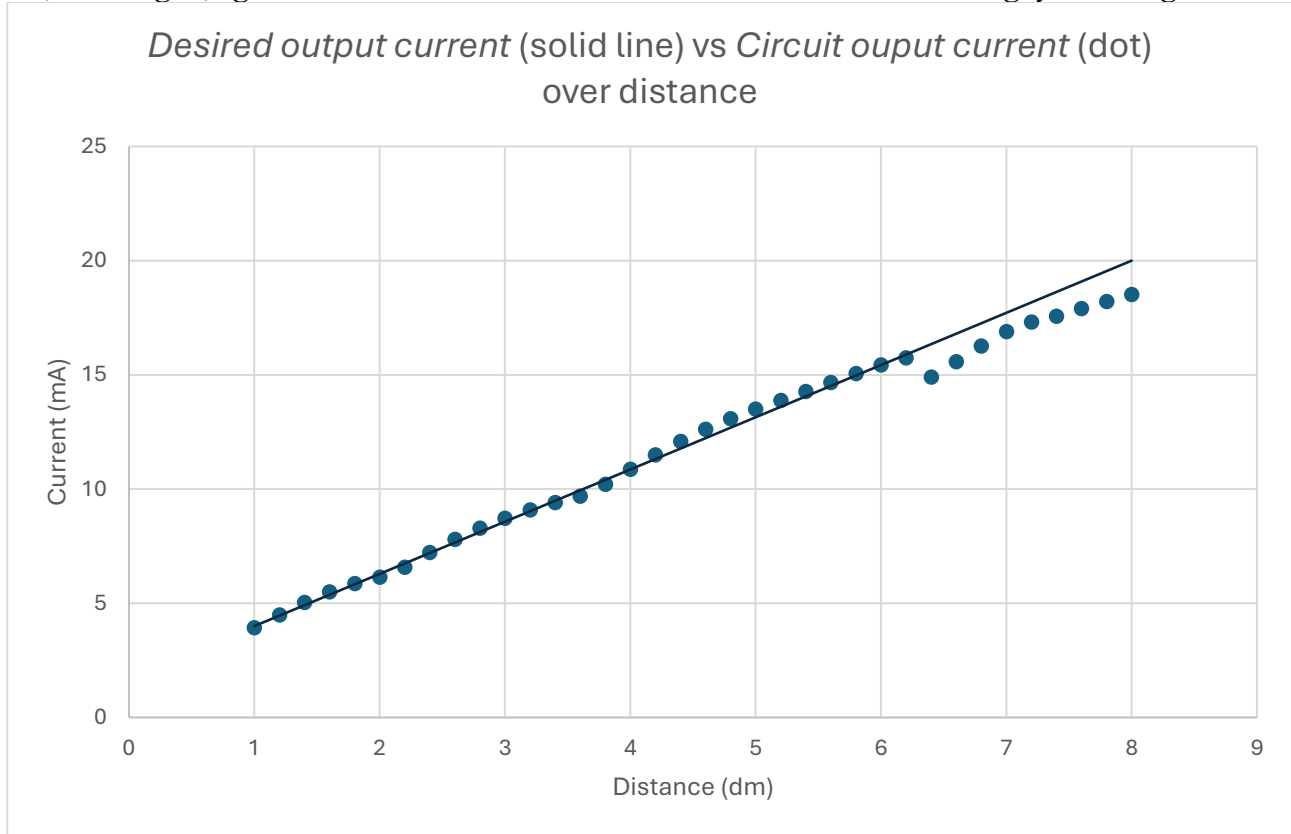
Thay số và lập bảng tính (trong sheet c. R1, R2), ta có các giá trị gần nhất với $R_{1a}, R_{1b}, R_{1c}, R_{1d}, R_4$ là

$$R_{1a} = 6.8k\Omega, R_{1b} = \mathbf{16.9k\Omega}, R_{1c} = \mathbf{44.2k\Omega}, R_{1d} = \mathbf{150k\Omega}, R_2 = \mathbf{51k\Omega}.$$

Thay số lại, ta có ngõ ra

$$\begin{aligned} I_{out} &= \frac{1}{R_5} \times \left[\frac{R_2}{R_1} \left(-V_1 + V_2 \times \left(\frac{R_1}{R_2} + 1 \right) \times \frac{R_4}{R_3 + R_4} \right) \right] \\ I_{out} &= \begin{cases} \frac{1}{0.15} \times \left[\frac{51}{6.8} \left(-V_1 + 0.702 \times \left(\frac{6.8}{51} + 1 \right) \right) \right] \\ \frac{1}{0.15} \times \left[\frac{51}{\mathbf{16.9}} \left(-V_1 + 0.961V \times \left(\frac{\mathbf{16.9}}{51} + 1 \right) \right) \right] \\ \frac{1}{0.15} \times \left[\frac{51}{\mathbf{44.2}} \left(-V_1 + 1.106V \times \left(\frac{\mathbf{44.2}}{51} + 1 \right) \right) \right] \\ \frac{1}{0.15} \times \left[\frac{51}{\mathbf{150}} \left(-V_1 + 1.020V \times \left(\frac{\mathbf{150}}{51} + 1 \right) \right) \right] \end{cases} \\ &= \begin{cases} -50V_1 + 39.78 \text{ (a)} \\ -20.118V_1 + 25.74 \text{ (b)} \\ -7.692V_1 + 15.881 \text{ (c)} \\ -2.267V_1 + 9.112 \text{ (d)} \end{cases} \end{aligned}$$

Sau khi đánh giá lại, phương trình (a) cho sai số tương đối lớn,



Hình 28: Dòng ngõ ra theo khoảng cách

Nên ta quay lại các bước chọn trở để xem ở bước nào để lại sai số đủ lớn để ta thay đổi thì ta thấy việc chọn $R_{1a} = 6.8k\Omega$ để lại sai số khá lớn 3.49% với giá trị mong muốn là $6.5707k\Omega$, nên ta hiệu chỉnh bằng cách mắc nối tiếp trở nhỏ hơn, $R_{1a} = 5.6k\Omega + 1k\Omega$.

Thay số vào tính lại, ta có

$$= \begin{cases} -51.51V_1 + 40.844 & (a) \\ -20.118V_1 + 25.74 & (b) \\ -7.692V_1 + 15.881 & (c) \\ -2.267V_1 + 9.112 & (d) \end{cases}$$

Vậy offset gây ra sai lệch

$$\begin{aligned} \Delta I_a &= \pm \frac{1}{0.15} \left(1 + \frac{51}{6.8} \right) 10\mu V \pm \frac{1}{0.15} \left(\frac{I_p((120 + 0.24) \parallel 47)}{6.8 \parallel 51} 51 + I_n 51 \right) \pm \frac{10\mu V}{0.15} \\ &\quad \pm 400pA \\ &= \pm 567 \times 10^{-6} \pm \frac{1}{0.15} (I_p 5.63 + I_n 51) \pm 66.7 \times 10^{-6} \pm 0.4 \times 10^{-6} \\ &= \pm 567 \times 10^{-6} \pm \frac{1}{0.15} (0.4 \times 10^{-6} \times 287 + 0 \times 51) \pm 66.7 \times 10^{-6} \pm 0.4 \times 10^{-6} \\ &= \pm 567 \times 10^{-6} \pm 765 \times 10^{-6} \pm 66.7 \times 10^{-6} \pm 0.4 \times 10^{-6} \text{ (mA)} \\ \Delta I_b &= \pm \frac{1}{0.15} \left(1 + \frac{51}{16.9} \right) 10\mu V \pm \frac{1}{0.15} \left(\frac{I_p((75 + 0.24) \parallel 47)}{16.9 \parallel 51} 51 + I_n 51 \right) \pm \frac{10\mu V}{0.15} \\ &\quad \pm 400pA \end{aligned}$$

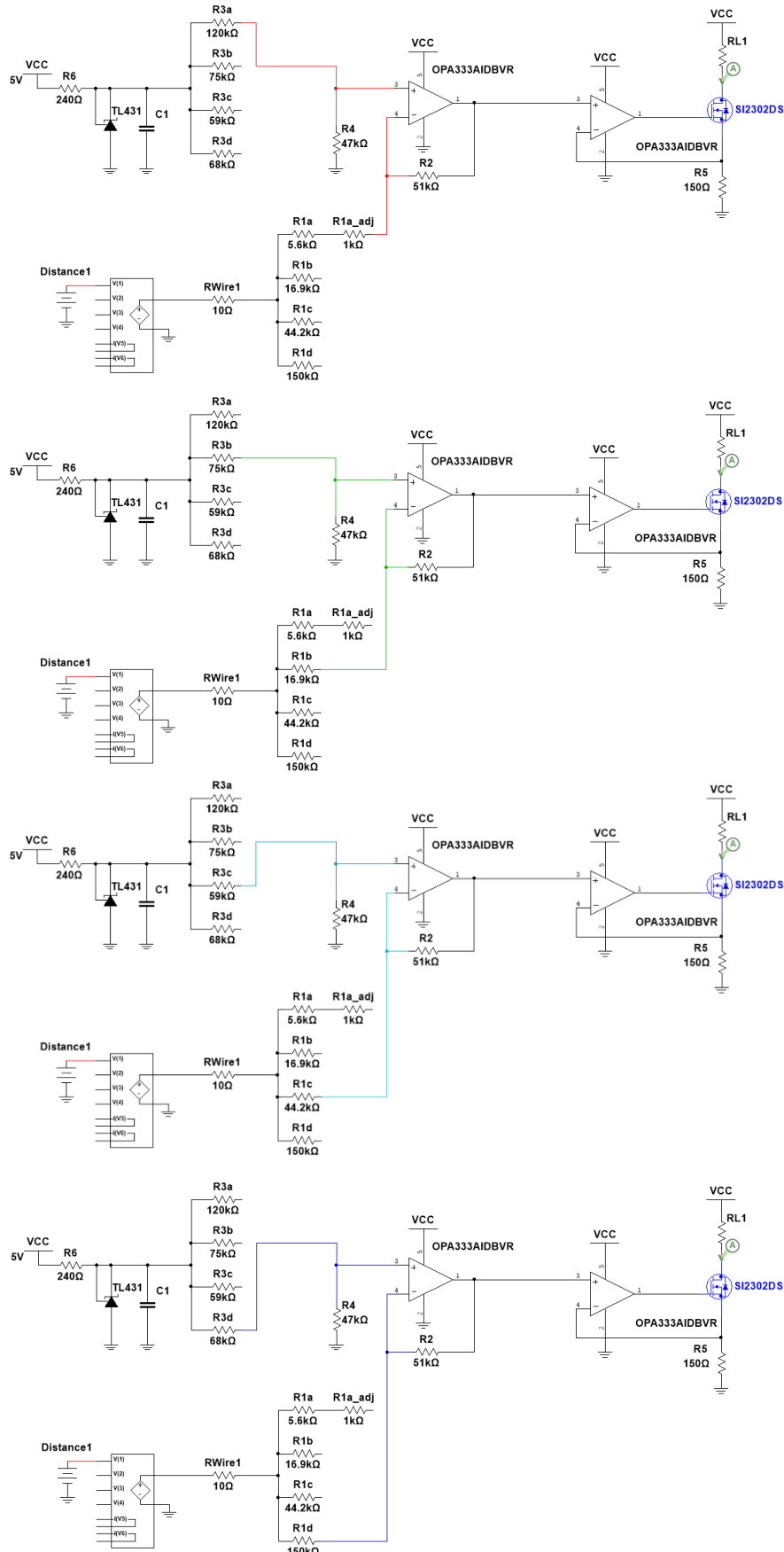
$$\begin{aligned}
&= \pm 268 \times 10^{-6} \pm \frac{1}{0.15} (I_p 116.2 + I_n 51) \pm 66.7 \times 10^{-6} \pm 0.4 \times 10^{-6} \\
&= \pm 268 \times 10^{-6} \pm \frac{1}{0.15} (0.4 \times 10^{-6} \times 116 + 0 \times 51) \pm 66.7 \times 10^{-6} \pm 0.4 \times 10^{-6} \\
&= \pm 268 \times 10^{-6} \pm 309 \times 10^{-6} \pm 66.7 \times 10^{-6} \pm 0.4 \times 10^{-6} \text{ (mA)}
\end{aligned}$$

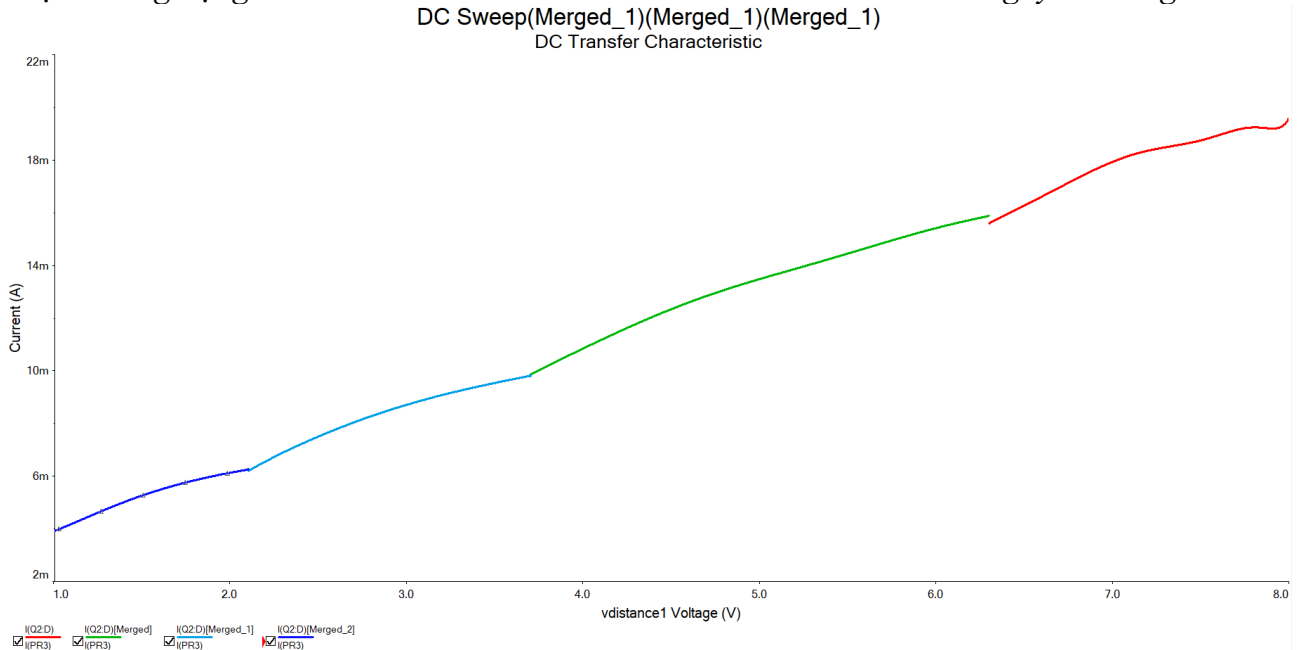
$$\begin{aligned}
\Delta I_c &= \pm \frac{1}{0.15} \left(1 + \frac{51}{44.2} \right) 10\mu V \pm \frac{1}{0.15} \left(\frac{I_p ((59 + 0.24) \parallel 47)}{44.2 \parallel 51} 51 + I_n 51 \right) \pm \frac{10\mu V}{0.15} \\
&\quad \pm 400\text{pA} \\
&= \pm 144 \times 10^{-6} \pm \frac{1}{0.15} (I_p 116.2 + I_n 51) \pm 66.7 \times 10^{-6} \pm 0.4 \times 10^{-6} \\
&= \pm 144 \times 10^{-6} \pm \frac{1}{0.15} (0.4 \times 10^{-6} \times 56 + 0 \times 51) \pm 66.7 \times 10^{-6} \pm 0.4 \times 10^{-6} \\
&= \pm 144 \times 10^{-6} \pm 149 \times 10^{-6} \pm 66.7 \times 10^{-6} \pm 0.4 \times 10^{-6} \text{ (mA)}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\Delta I_d &= \pm \frac{1}{0.15} \left(1 + \frac{51}{150} \right) 10\mu V \pm \frac{1}{0.15} \left(\frac{I_p ((68 + 0.24) \parallel 47)}{150 \parallel 51} 51 + I_n 51 \right) \pm \frac{10\mu V}{0.15} \\
&\quad \pm 400\text{pA} \\
&= \pm 89 \times 10^{-6} \pm \frac{1}{0.15} (I_p 116.2 + I_n 51) \pm 66.7 \times 10^{-6} \pm 0.4 \times 10^{-6} \\
&= \pm 89 \times 10^{-6} \pm \frac{1}{0.15} (0 \times 37 + 0.4 \times 10^{-6} \times 51) \pm 66.7 \times 10^{-6} \pm 0.4 \times 10^{-6} \\
&= \pm 89 \times 10^{-6} \pm 136 \times 10^{-6} \pm 66.7 \times 10^{-6} \pm 0.4 \times 10^{-6} \text{ (mA)}
\end{aligned}$$

Các sai số trên đều thỏa yêu cầu đặt ra ở phần tính toán bên trên.

Ghép vào mạch, mô phỏng cho 4 trường hợp





Hình 29: Mô phỏng toàn mạch

Trích xuất dữ liệu và thay vào excel, ta có bảng số liệu sau:

Bảng 4: Mô phỏng toàn mạch trích từ c. FullCircuit_Adj

Distance	Output Voltage	Circuit Current (mA)	Sim	Error
1	2.289566705	4	3.986348537	0.341287
1.2	2.040461358	4.457142857	4.550949814	2.104643
1.4	1.79934909	4.914285714	5.097434478	3.726864
1.6	1.596650791	5.371428571	5.55685324	3.452055
1.8	1.436675055	5.828571429	5.919439915	1.559018
2	1.311571689	6.285714286	6.2029883	1.316095
2.2	1.210751665	6.742857143	6.690629695	0.77456
2.4	1.125828551	7.2	7.343736698	1.996343
2.6	1.052041497	7.657142857	7.911200332	3.317915
2.8	0.987514235	8.114285714	8.407451507	3.612959
3	0.931680779	8.571428571	8.836842498	3.096496
3.2	0.883891799	9.028571429	9.204365035	1.947081
3.4	0.842748683	9.485714286	9.520777865	0.369646
3.6	0.806237711	9.942857143	9.801571312	1.420978
3.8	0.772375661	10.4	10.06315262	3.238917
4	0.739910092	10.85714286	10.71592086	1.300729
4.2	0.708664046	11.31428571	11.34416659	0.264099
4.4	0.67933374	11.77142857	11.93389235	1.380153
4.6	0.652841676	12.22857143	12.46655212	1.946104
4.8	0.629589925	12.68571429	12.93406501	1.95772
5	0.6090345	13.14285714	13.3473547	1.55596
5.2	0.589856031	13.6	13.73296833	0.977708
5.4	0.570676272	14.05714286	14.11860653	0.437242
5.6	0.550911991	14.51428571	14.51599453	0.011773
5.8	0.531180973	14.97142857	14.91271945	0.392141
6	0.51286093	15.42857143	15.2810628	0.956074

6.2	0.496964523	15.88571429	15.60069212	1.794204
6.4	0.483161097	16.34285714	15.73061682	3.746226
6.6	0.470000449	16.8	16.40757116	2.335886
6.8	0.456617645	17.25714286	17.09593483	0.934152
7	0.444454276	17.71428571	17.72157913	0.041173
7.2	0.436222493	18.17142857	18.14500005	0.14544
7.4	0.431398265	18.62857143	18.39314548	1.26379
7.6	0.42487202	19.08571429	18.72883824	1.869859
7.8	0.419003591	19.54285714	19.03068887	2.620744
8	0.412985263	20	19.34026523	3.298674

Mô phỏng mạch cho thấy các điểm cần quan tâm đều có sai số bé hơn 5%, với sai số lớn nhất là 3.746% ở điểm 64cm.

d. Thiết kế mạch đọc dòng điện và cho ngõ ra ADC. Tiến hành lựa chọn ADC (số bit, nguồn). Mô phỏng mạch đọc và kiểm chứng.

Do ADC chỉ đọc áp nên ta sẽ đọc gián tiếp dòng qua áp trên R_5 , khoảng nhảy nhỏ nhất về dòng là 0.457142857 mA, với giá trị R_5 là 150Ω , suy ra bước nhảy về áp khoảng 68.57 mV, đây cũng là độ phân giải tối thiểu của ADC, giá trị tối đa của dòng ra là 20mA, suy ra áp tối đa trên R_5 là 3V, vậy cần tối thiểu $3000/68.57=44$ mẫu, vậy ADC tối thiểu cho các thông số trên là $\log_2(44) \approx 6$ bit.

Vì NiMultisim không có ADC 6 bit nên chọn ADC 8 bit gần nhất, chọn điện áp tham chiếu là 3.3V, ta có độ phân giải:

$$RES = \frac{3300}{2^8} = 12.890625 \text{ (mV)}$$

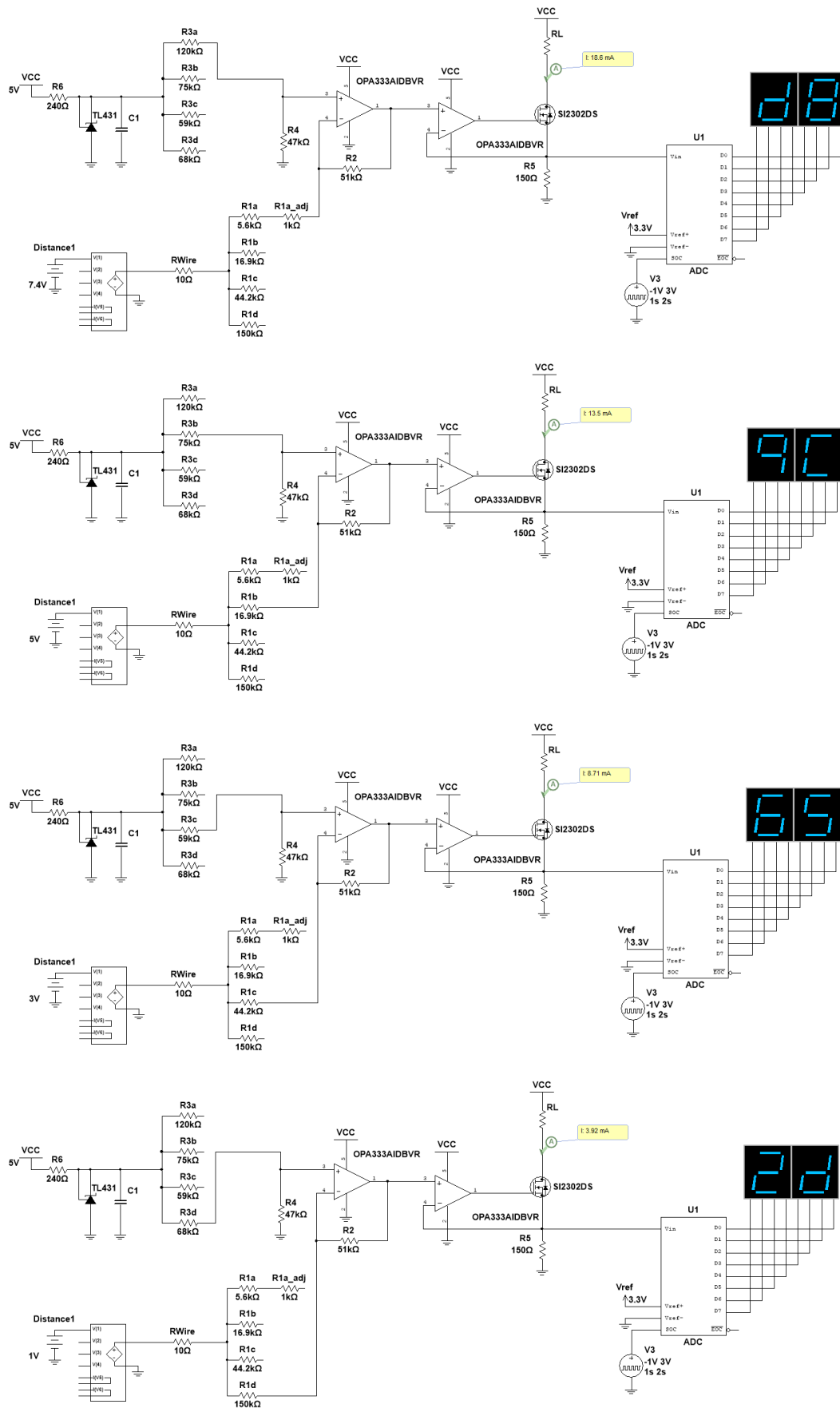
Giá trị số của ngõ ra:

$$D_{\text{out}}(\text{nguyên}) = V_{\text{IN}}(\text{V}) \frac{2^8}{3.3(\text{V})}$$

Tính được bảng sau:

Bảng 3: giá trị đọc ADC

Distance (dm)	CurrentSim (mA)	V(R3)	Hex
1	3.986348537	0.597952281	2E
1.2	4.550949814	0.682642472	35
1.4	5.097434478	0.764615172	3B
1.6	5.55685324	0.833527986	41
1.8	5.919439915	0.887915987	45
2	6.2029883	0.930448245	48
2.2	6.690629695	1.003594454	4E
2.4	7.343736698	1.101560505	55
2.6	7.911200332	1.18668005	5C
2.8	8.407451507	1.261117726	62
3	8.836842498	1.325526375	67
3.2	9.204365035	1.380654755	6B
3.4	9.520777865	1.42811668	6F
3.6	9.801571312	1.470235697	72
3.8	10.06315262	1.509472892	75
4	10.71592086	1.60738813	7D
4.2	11.34416659	1.701624989	84
4.4	11.93389235	1.790083852	8B
4.6	12.46655212	1.869982819	91
4.8	12.93406501	1.940109752	97
5	13.3473547	2.002103205	9B
5.2	13.73296833	2.059945249	A0
5.4	14.11860653	2.117790979	A4
5.6	14.51599453	2.177399179	A9
5.8	14.91271945	2.236907918	AE
6	15.2810628	2.29215942	B2
6.2	15.60069212	2.340103818	B6
6.4	15.73061682	2.359592523	B7
6.6	16.40757116	2.461135675	BF
6.8	17.09593483	2.564390225	C7
7	17.72157913	2.65823687	CE
7.2	18.14500005	2.721750008	D3
7.4	18.39314548	2.758971823	D6
7.6	18.72883824	2.809325737	DA
7.8	19.03068887	2.85460333	DD
8	19.34026523	2.901039784	E1



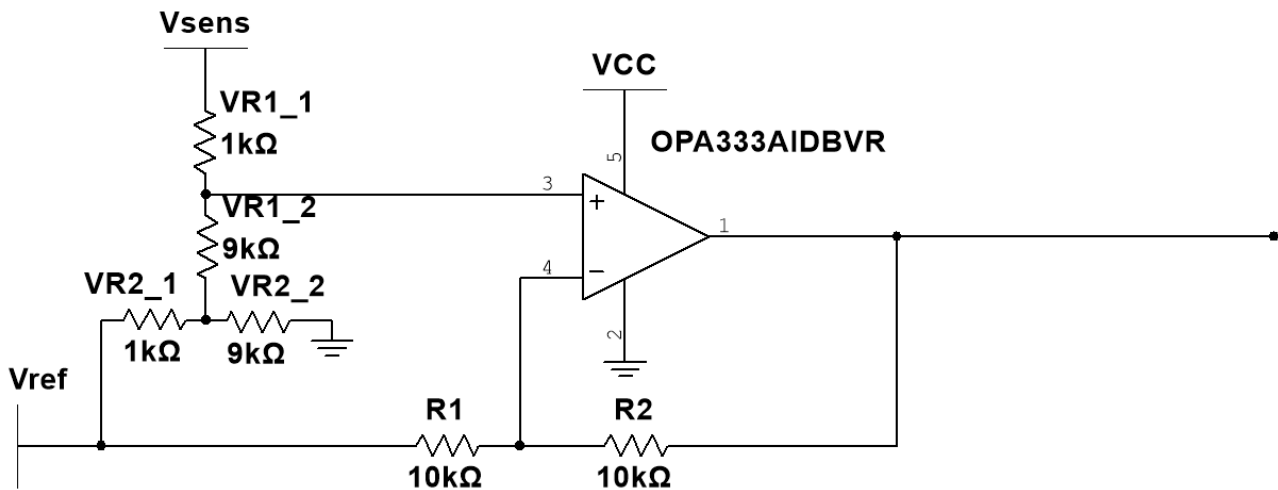
Hình 30: Một vài trường hợp mô phỏng ADC

THI CÔNG MẠCH

a. Thiết kế

Tăng điều chỉnh giá trị cảm biến

Để xử lý trường hợp giá trị cảm biến sai lệch datasheet, nhóm thiết kế thêm một tầng OPAMP $y=ax+b$ với hệ số a và b có thể thay đổi được trong một chừng mực nhất định, trong đó VR1_1 và VR1_2 là một phần của biến trở, VR2_1 và VR2_2 là một phần của biến trở thứ 2.



Hình 31: Mạch điều chỉnh giá trị cảm biến

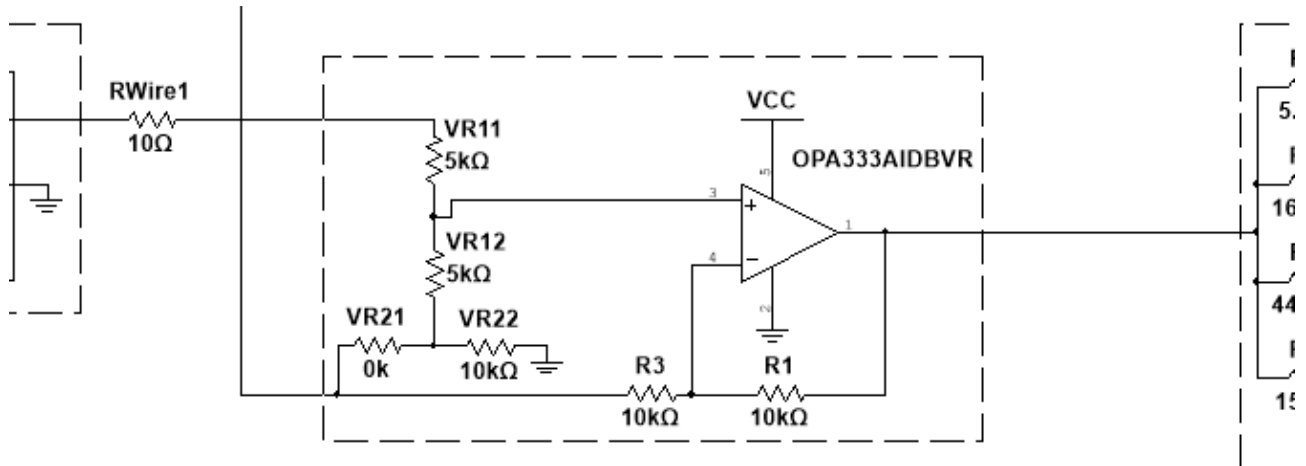
Giải tích mạch, ta có

$$v^+ = \frac{V_{\text{sens}}}{1 + \frac{VR_{11}}{VR_{12}} - \frac{VR_{11}}{VR_{12} + \frac{VR_{12}^2}{VR_{21}} + \frac{VR_{12}^2}{VR_{22}}}} + \frac{V_{\text{ref}}}{\left(1 + \frac{VR_{11}}{VR_{12}} - \frac{VR_{11}}{VR_{12} + \frac{VR_{12}^2}{VR_{21}} + \frac{VR_{12}^2}{VR_{22}}}\right) \left(\frac{VR_{12}}{VR_{11}} + \frac{VR_{21}}{VR_{11}} + \frac{VR_{12}VR_{21}}{VR_{11}VR_{22}}\right)}$$

Vậy ngõ ra

$$\frac{2}{1 + \frac{VR_{11}}{VR_{12}} - \frac{VR_{11}}{VR_{12} + \frac{VR_{12}^2}{VR_{21}} + \frac{VR_{12}^2}{VR_{22}}}} \times V_{\text{sens}} + \frac{2V_{\text{ref}}}{\left(1 + \frac{VR_{11}}{VR_{12}} - \frac{VR_{11}}{VR_{12} + \frac{VR_{12}^2}{VR_{21}} + \frac{VR_{12}^2}{VR_{22}}}\right) \left(\frac{VR_{12}}{VR_{11}} + \frac{VR_{21}}{VR_{11}} + \frac{VR_{12}VR_{21}}{VR_{11}VR_{22}}\right)} - V_{\text{ref}}$$

Mạch sẽ được mắc giữa cảm biến và ngõ vào của tầng 1

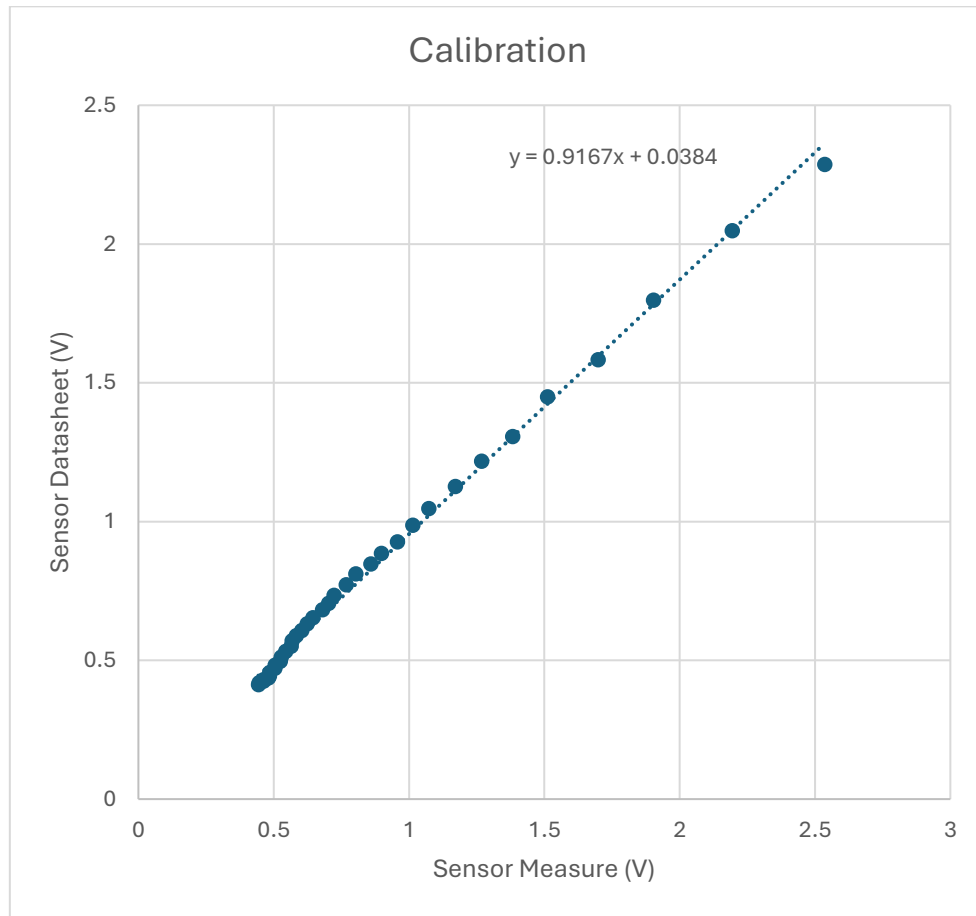


Hình 32: Vị trí của tầng điều chỉnh trong mạch

Nguồn V_{ref} được nối với điện áp 2.495V của TL431, có VR11 và VR12 là một phần của biến trở 10k, tương tự với VR21 và VR22. Khi đó, ta có ngõ ra của tầng điều chỉnh này là

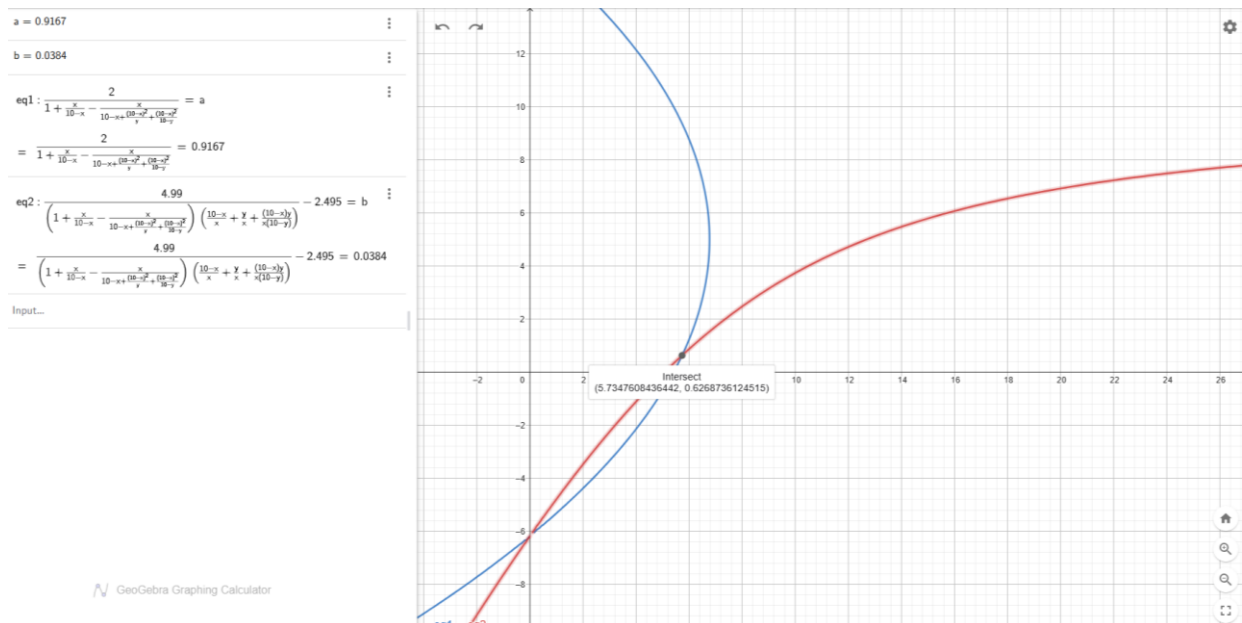
$$\begin{aligned}
 & \frac{2}{1 + \frac{VR_{11}}{10 - VR_{11}} - \frac{VR_{11}}{VR_{12} + \frac{(10 - VR_{11})^2}{VR_{21}} + \frac{(10 - VR_{11})^2}{10 - VR_{21}}}} \times V_{sens} \\
 & + \left(\frac{2.495}{\left(\frac{10 - VR_{11}}{VR_{11}} + \frac{VR_{21}}{VR_{11}} + \frac{(10 - VR_{11})VR_{21}}{VR_{11}(10 - VR_{21})} \right)} - 2.495 \right)
 \end{aligned}$$

Ở bước khảo sát giá trị đo của cảm biến ở phần sau, ta thu được số liệu giữa đo đạc và datasheet, ta lập nên đồ thị sau:



Hình 33: Đồ thị hiệu chỉnh giá trị cảm biến

Giải hệ để tìm sao cho phương trình của tầng này khớp với phương trình hiệu chỉnh trên, với x là VR11, y là VR21.

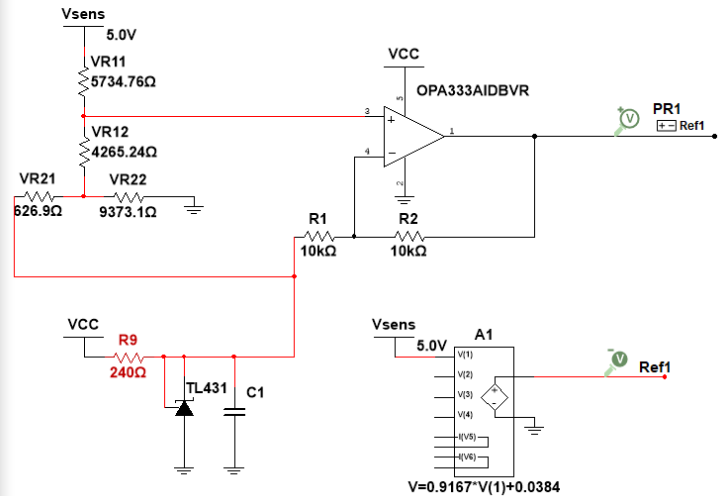
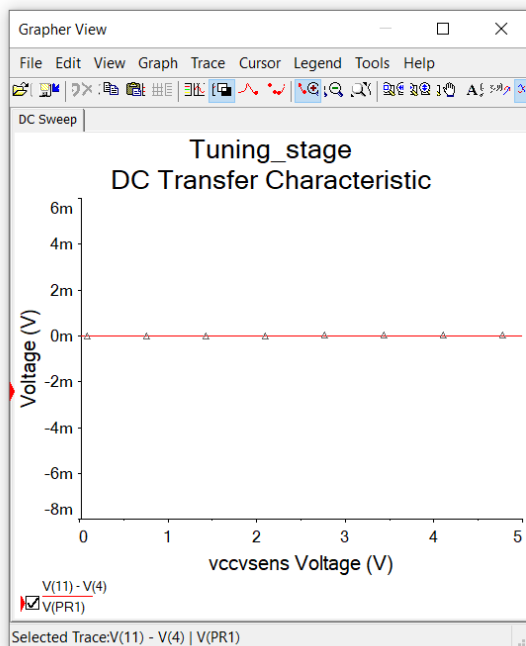


Hình 34: Giải hệ tìm giá trị điện trở

Điện tử ứng dụng

GVHD: Ths. Nguyễn Trung Hiếu

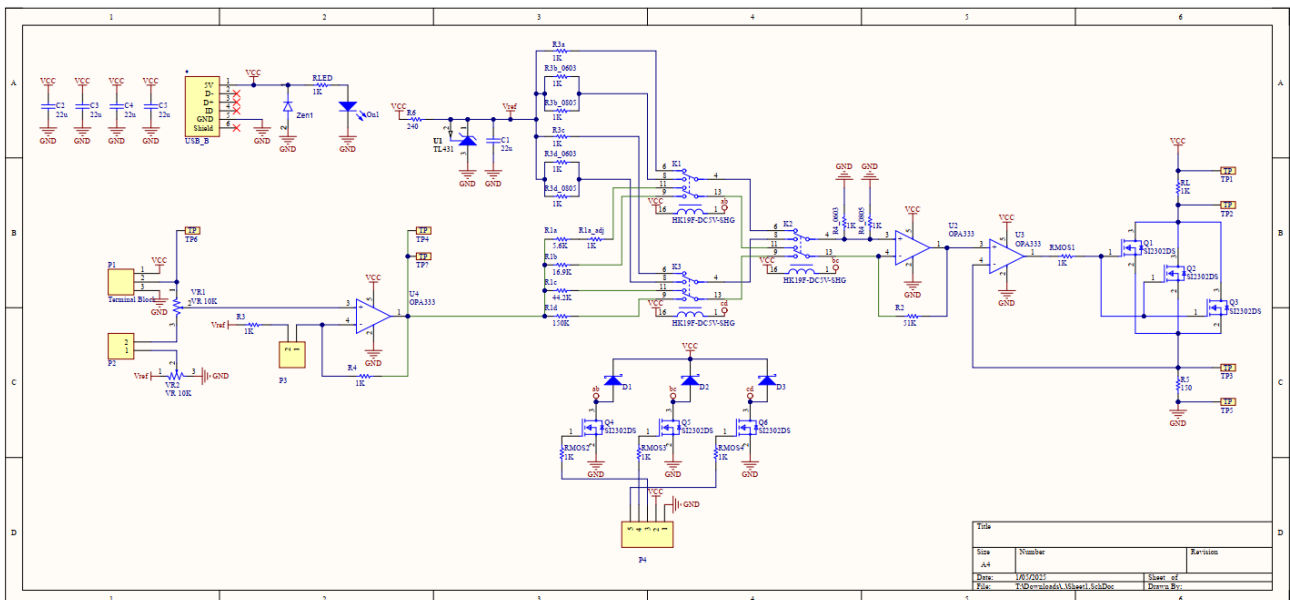
Kiểm chứng lại bằng mô phỏng, thấy được phương trình ngõ ra tăng điều chỉnh khớp với phương trình hiệu chỉnh.



Hình 35: Mô phỏng tăng điều chỉnh

PCB

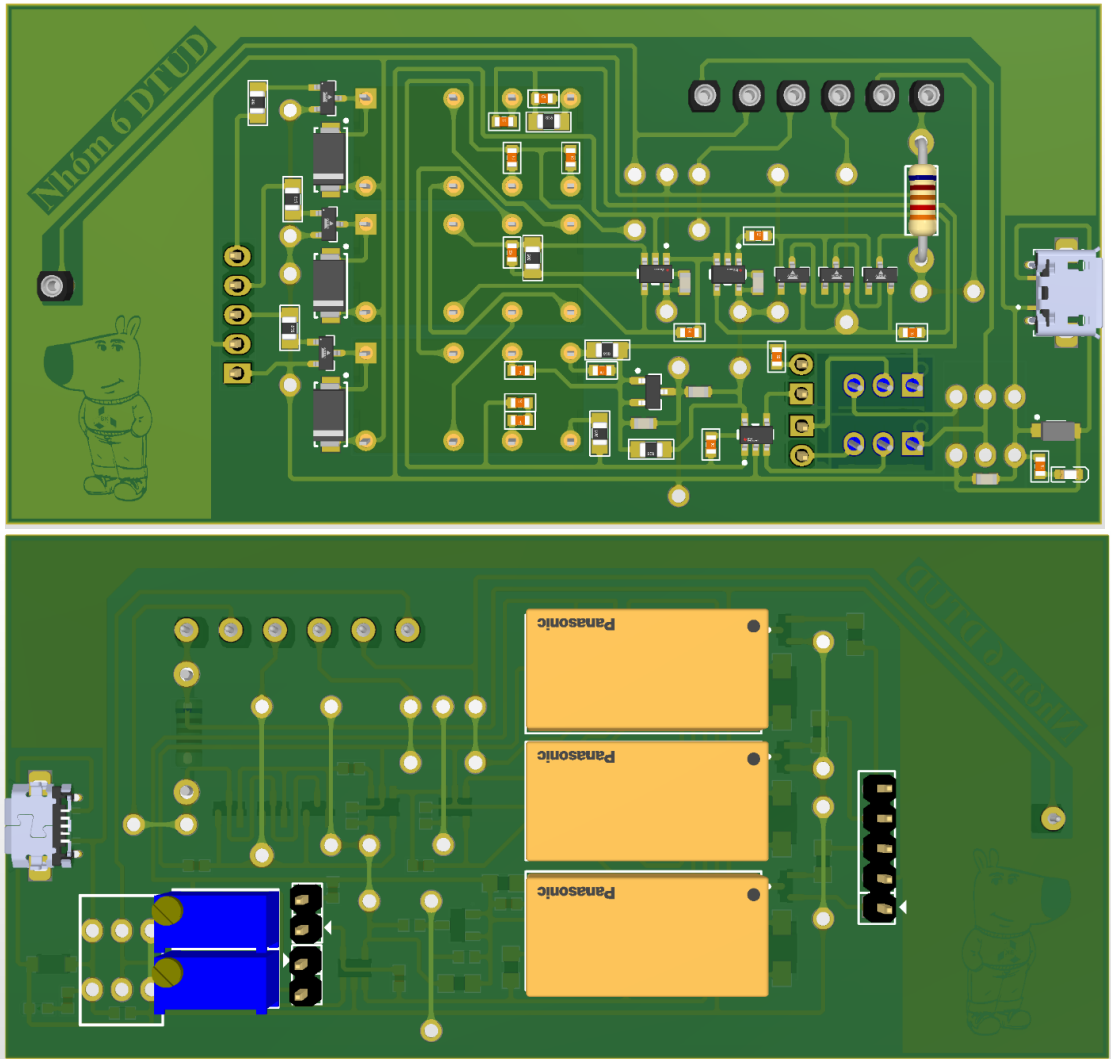
Ở tầng điều chỉnh giá trị cảm biến, thêm 2 jumper, nếu không gắn jumper thì tầng này có thể hoạt động như một mạch đệm. Mạch cũng được mở rộng từ 1 MOSFET thành 3 MOSFET mắc song song để giảm rơi áp trên MOSFET, từ đó tăng trở R_L tối đa.



Hình 36: Schematic

Comment	Description	Designator	Footprint	LibRef	Quantity
USB_B			USB_B	USB_B	1
Cap Non-Pol SMD	Capacitor	C1, C2, C3, C4, C5	CAP-SM-0603	Cap Non-Pol SMD	5
D Schottky	Schottky Diode	D1, D2, D3	SS34	D Schottky	3
HK19F-DC5V-SHG	RELAY GEN PURPOSE DPDT 2A 48VDC	K1, K2, K3	FP-DS2Y-S-DC48V-MFG	CMP-05607-000125-1	3
LED SMD	LED	On1	LED_0603_Blue	LED SMD	1
Terminal Block	KF141-2.54-3-R	P1	PCBComponent_1	Terminal Block	1
Header 2	Header, 2-Pin	P2, P3	JP2	Header 2	2
Header 5	Header, 5-Pin	P4	JP5	Header 5	1
SI2302DS	MOSFET N-CH 20V 2.9A SOT23-3	Q1, Q2, Q3, Q4, Q5, Q6	FP-S-03946-IPC_B	CMP-02550-000243-1	6
RESISTOR SMD	Resistor	R1a, R1a_adj, R1c, R1d, R2, R3, R3a, R3b_0603, R3c, R3d_0603, R4, R4_0603, R5, RLED, RMOS1	RES-SM-0603	RESISTOR SMD	15
RESISTOR SMD	Resistor	R1b, R3b_0805, R3d_0805, R4_0805, R6, RMOS2, RMOS3, RMOS4	RES-SM-0805	RESISTOR SMD	8
RESISTOR	Resistor	RL	RES 1/2W	RESISTOR	1
Test Point		TP1, TP2, TP3, TP4, TP5, TP6, TP7	TP	Test Point	7
TL431	Adjustable Precision Shunt Regulator, 34 ppm / degC, 100 mA, - 40 to 125 degC, 3-pin SOT-23 (DBZ), Green (RoHS& no Sb/Br)	U1	DBZD003A_M	CMP-0366-01210-2	1
OPA333	IC OPAMP ZER-DRIFT 1 CIRCUIT SOT23-5	U2, U3, U4	FP-DBV0005A-MFG	CMP-0272-00862-4	3
10K	Var Resistor	VR1, VR2	VARISTOR2	Var Resistor	2
MMSZ4689T1G	Zener Diode, 5.1V (V _Z), 5%, 0.5W, Silicon, Unidirectional	Zen1	ONSC-SOD-123-2-425-04_V	CMP-004-00031-1	1

Hình 37: BOM list

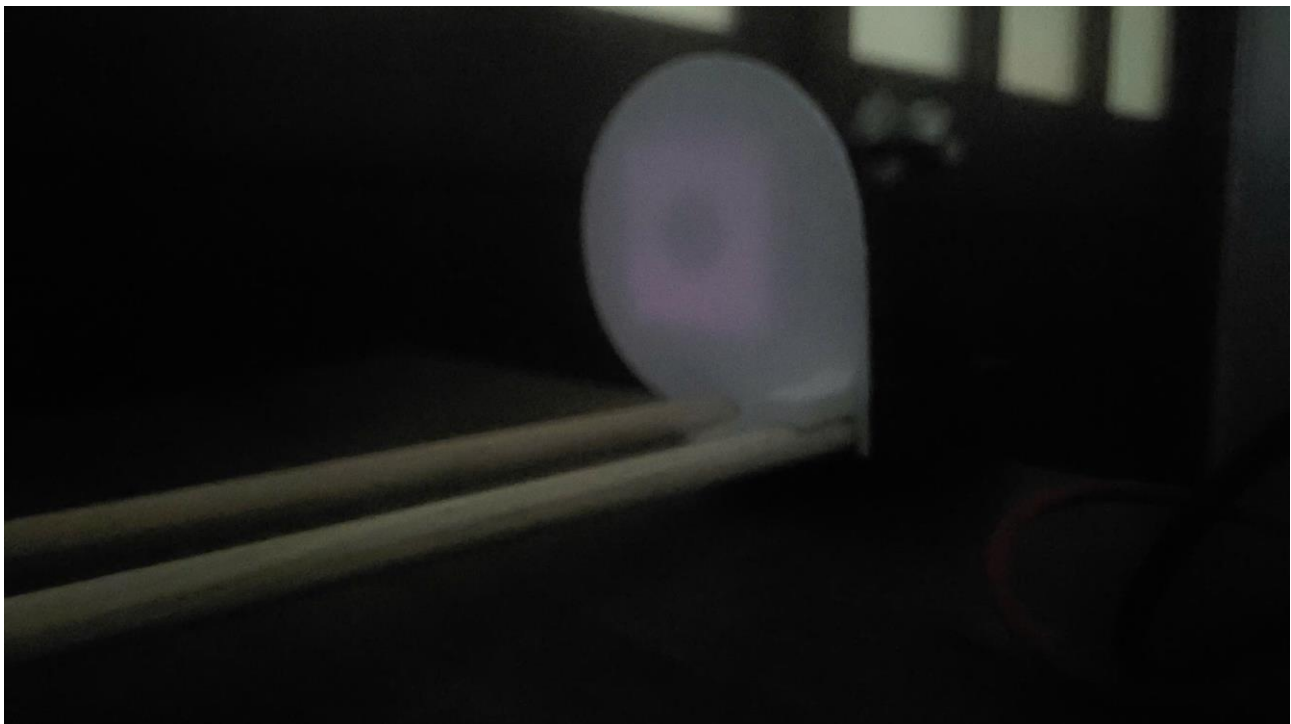


Hình 38: PCB

Testbench để đo được thiết kế giống như hình dưới, trong đó phần phản xạ lại ánh sáng từ cảm biến được thiết kế sao cho hứng trọn toàn bộ chùm sáng chiếu tới. Đồng thời, phần này cũng được thiết kế có màu trắng để phù hợp với đặc tuyến trong datasheet (khảo sát trên giấy trắng).



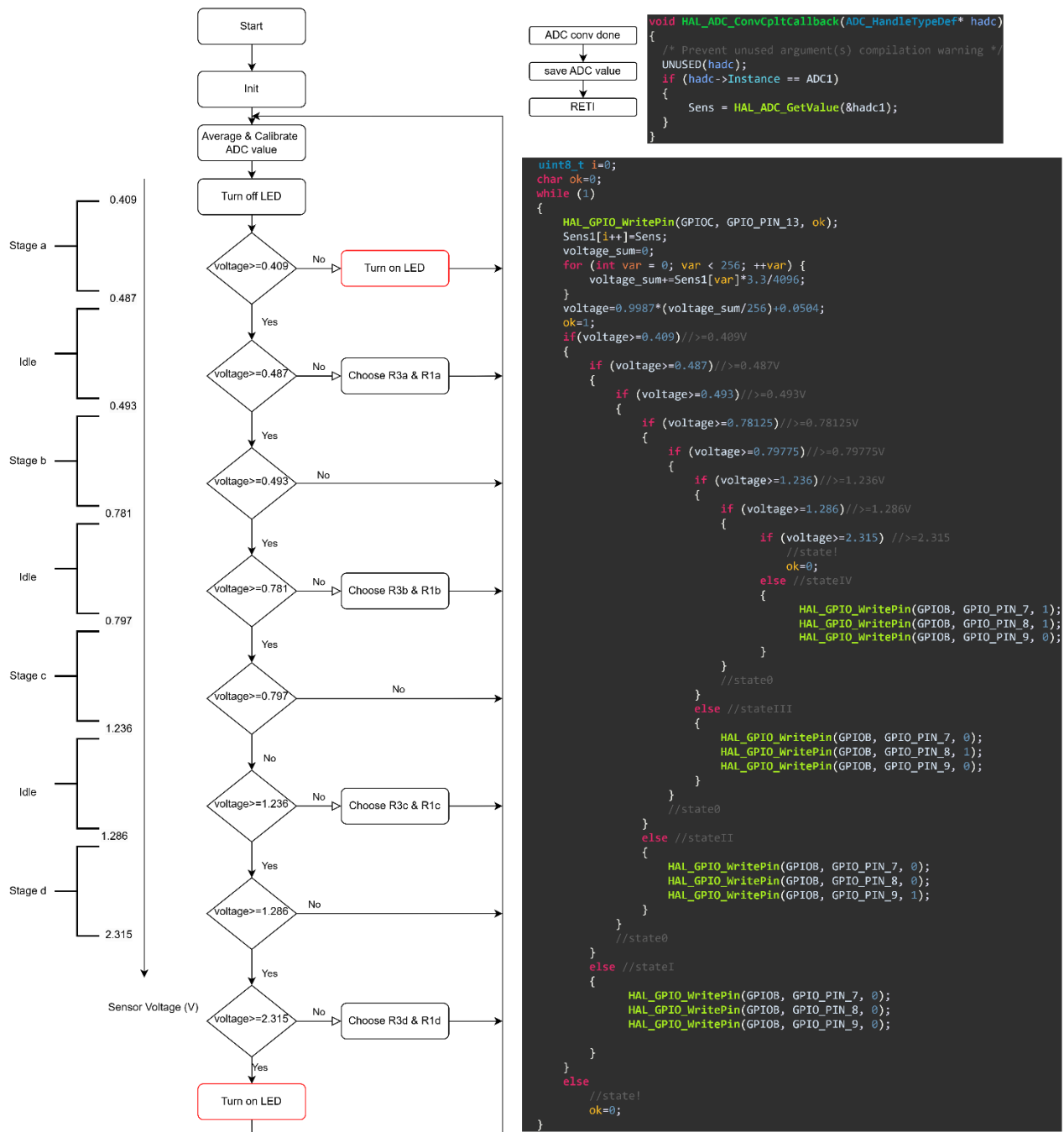
Hình 39: Testbench để đo



Hình 40: Màn hứng chùm sáng từ cảm biến

Trong chương trình, tín hiệu điện áp sẽ được tính trên trung bình của 256 lần thu mẫu trước của ADC để đảm bảo tính ổn định, tín hiệu áp này được hiệu chỉnh theo phương trình được đề cập trong phần khảo sát bộ ADC của STM32F103C8T6.

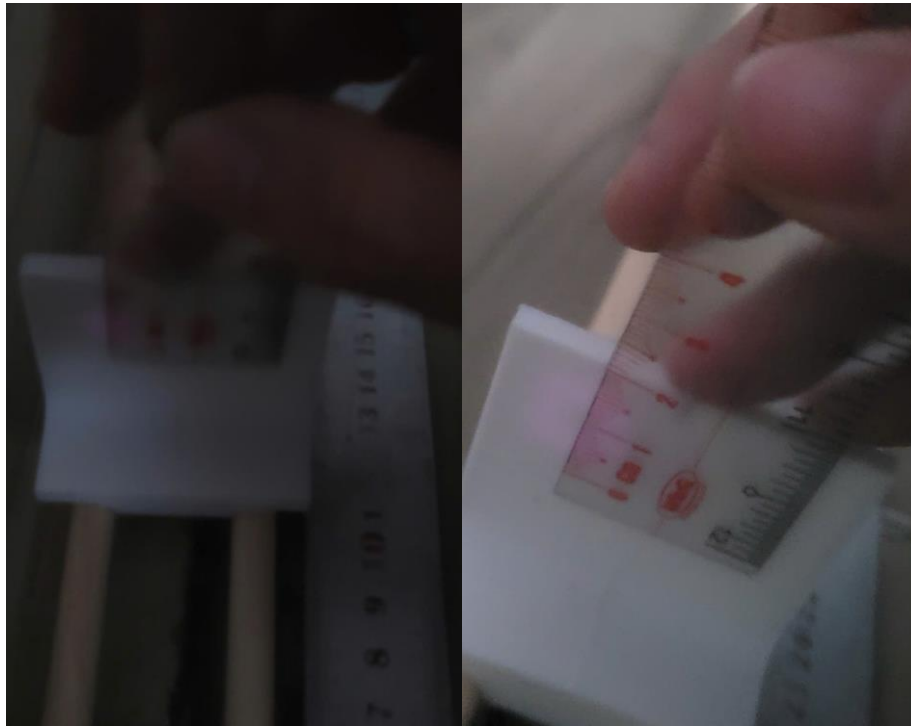
Tín hiệu điện áp thu được sẽ được dùng để so sánh với các mức đo trong hình dưới (liên quan trực tiếp đến 3 điểm nút được đề cập trong phần tuyến tính hóa bên trên), tuy nhiên thay vì switch ngay khi vượt giá trị trung bình thì ta sẽ chờ 1 khoảng không làm gì (giống Schmitt trigger) để tránh relay bị nhảy do nhiễu.



Hình 41: Lưu đồ giải thuật

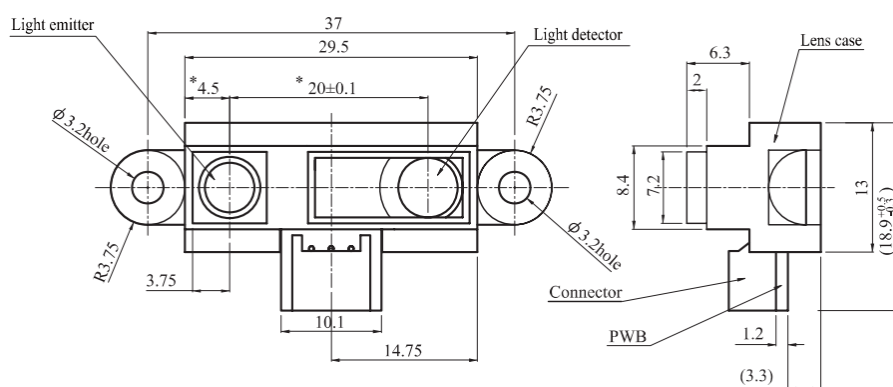
b. Khảo sátTính chất hình học của chùm sáng

Nhóm khảo sát tương đối độ mở của chùm tia. Vì chùm tia có bước sóng lân cận 870 nm ở vùng hồng ngoại nên phải quan sát bằng điện thoại, mà cường độ chùm tia tương đối nhỏ do yếu tố an toàn nên khi chụp, phải giảm tốc độ màn trập để bức ảnh thêm nhạy sáng, bù lại là thời gian phơi sáng lâu hơn khiến bức ảnh bị nhòe vì chuyển động của người chụp hay vật thể.



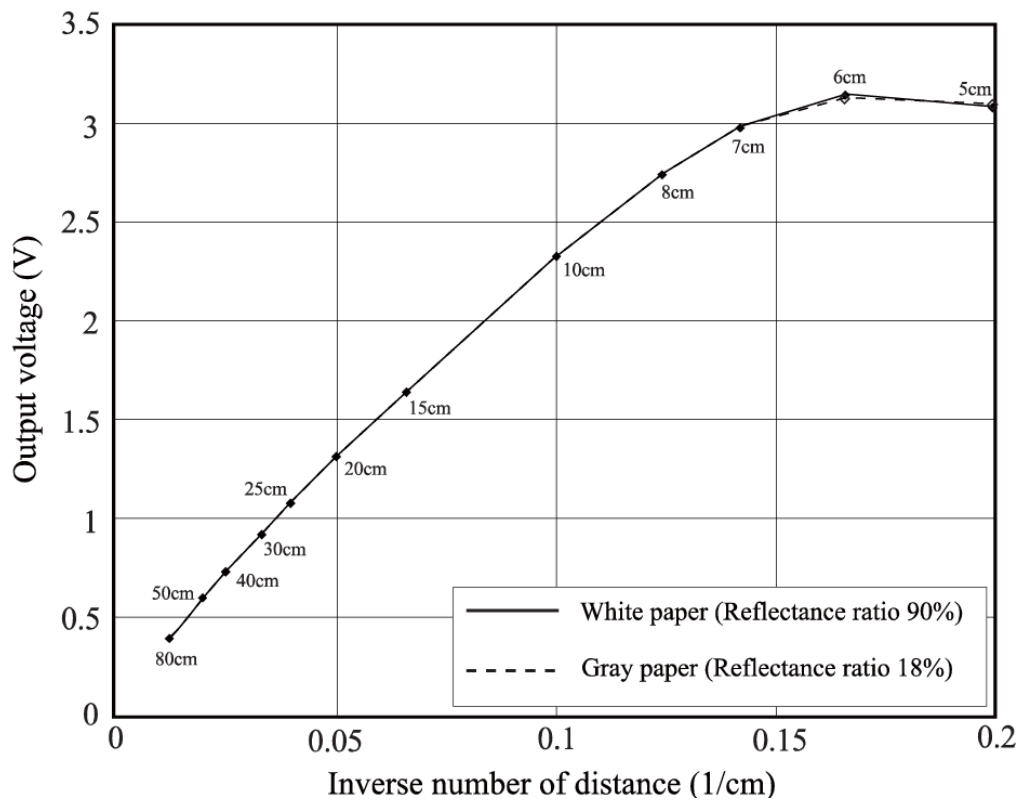
Hình 42: Độ mở của chùm tia ở 10cm (trái) và 20cm (phải)

Đo ở 10cm, ta ước lượng được đường kính tầm 1cm, dời qua 20cm, ước chừng đường kính nhỏ hơn 2 cm, dùng quy tắc tam giác đồng dạng, ta có ở 80cm, đường kính của chùm tia chiếu lên màn là tầm 8cm trở xuống, từ đó thiết kế được đường kính tấm màn, kết hợp với thông tin về vị trí nguồn phát sáng, trong datasheet, ta dựng được vị trí đặt màn (trên phần testbench) sao cho hứng được trọn chùm sáng.



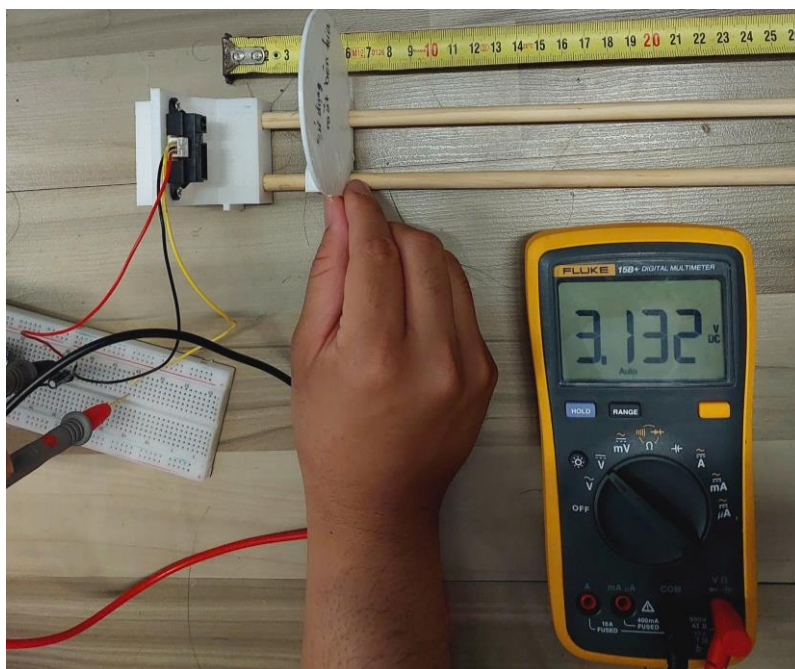
Hình 43: Các thông số về kích thước của nguồn sáng

Ta xác định vị trí đặt thang đo khoảng cách bằng các xác định vị trí 6cm của cảm biến (do trong datasheet không đề cập khoảng cách đo là tính từ đâu của cảm biến). Dựa vào đồ thị sau, ta xác định được khoảng cách mà cho điện áp tối đa là khoảng 6cm.



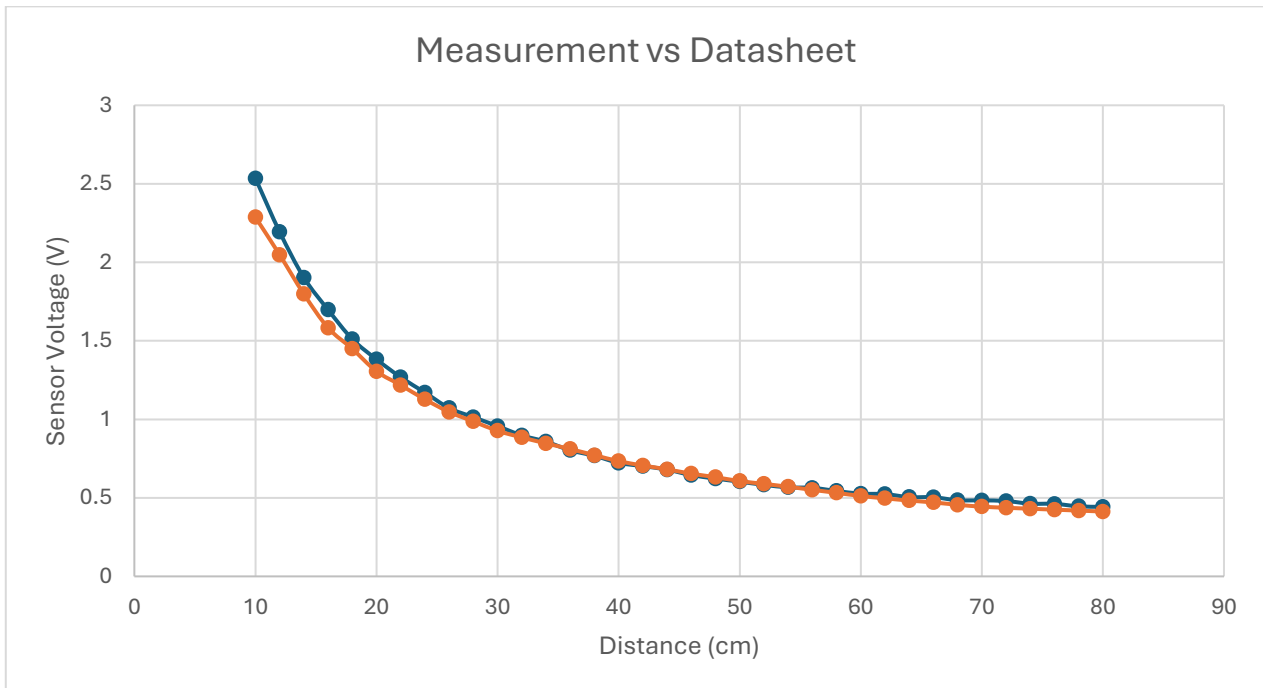
Hình 44: Đặc tính trích xuất từ datasheet giúp xác định vị trí 6cm

Dùng tấm chắn rà toàn bộ thang đo tìm giá trị tối đa, đánh dấu vị trí đó và suy ngược ra các khoảng cách còn lại từ 10-80cm với bước nhảy là 2cm



Hình 45: Tìm vị trí 6cm thông qua rà điện áp max

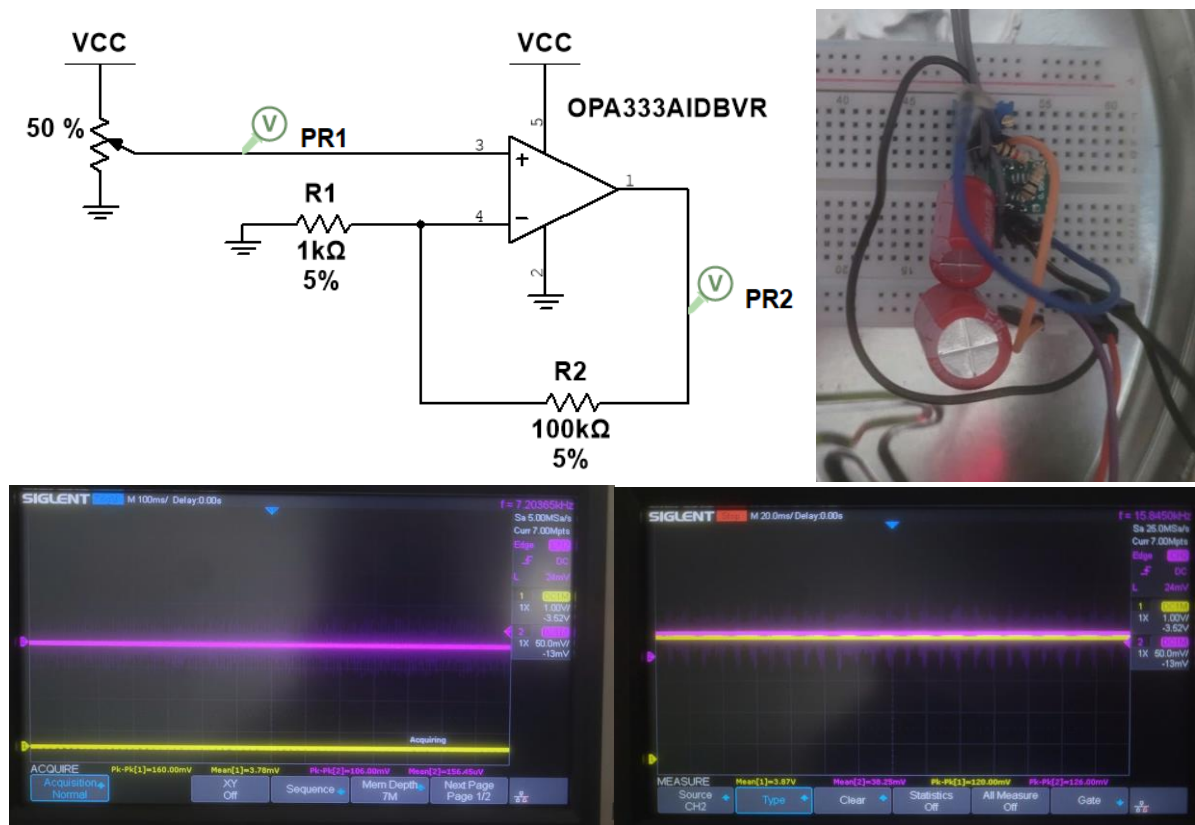
Thực hiện đo, ghi nhận được đồ thị, với đường màu cam là đặc tính trong datasheet và đường màu xanh là dữ liệu đo được. Ở phần gần biên 10cm, ta thấy đặc tính lệch khá nhiều, điều này sẽ gây ra sai số nếu không qua tăng điều chỉnh.



Hình 46: Giá trị cảm biến đo thực tế so với datasheet

OPA333

OPA333 có sơ đồ mạch sau được dùng để khảo sát offset



Hình 47: Testbench khảo sát OPAMP

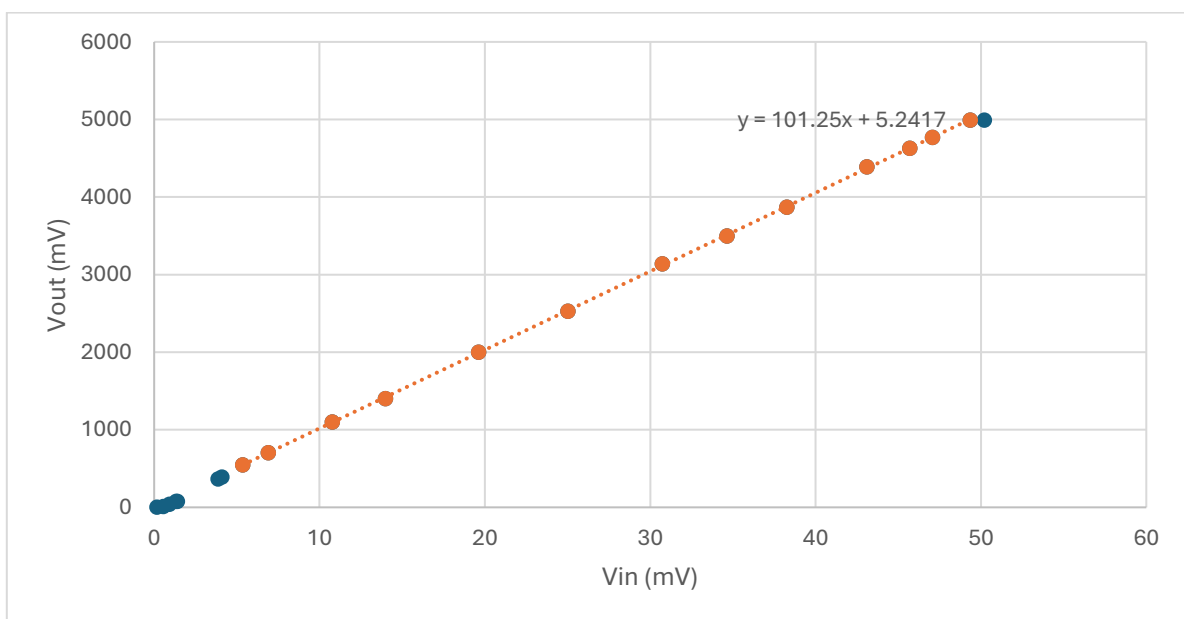
Thực hiện điều chỉnh điện trở để thay đổi điện áp vào và đo giá trị ngõ ra, ta thu được bảng số liệu

Bảng 5: khảo sát đặc tính OPAMP, trích từ OPA333Meas

Vin (mV)	Vout (mV)	Gain
0.15645	3.78	24.16107
0.55055	10.2	18.52693
0.92046	38.56	41.8921
1.32	77.3	58.56061
1.39	77.74	55.92806
3.85	367.11	95.35325
4.08	390.99	95.83088
5.34	547.13	102.4588
6.89	704.55	102.2569
10.76	1100	102.2305
13.97	1400	100.2147
19.61	2000	101.9888
25.01	2530	101.1595
30.73	3140	102.1803
34.64	3500	101.0393
38.25	3870	101.1765
43.09	4390	101.8798
45.68	4630	101.3573
47.07	4770	101.3384
49.35	4990	101.1145
50.19	4990	99.4222

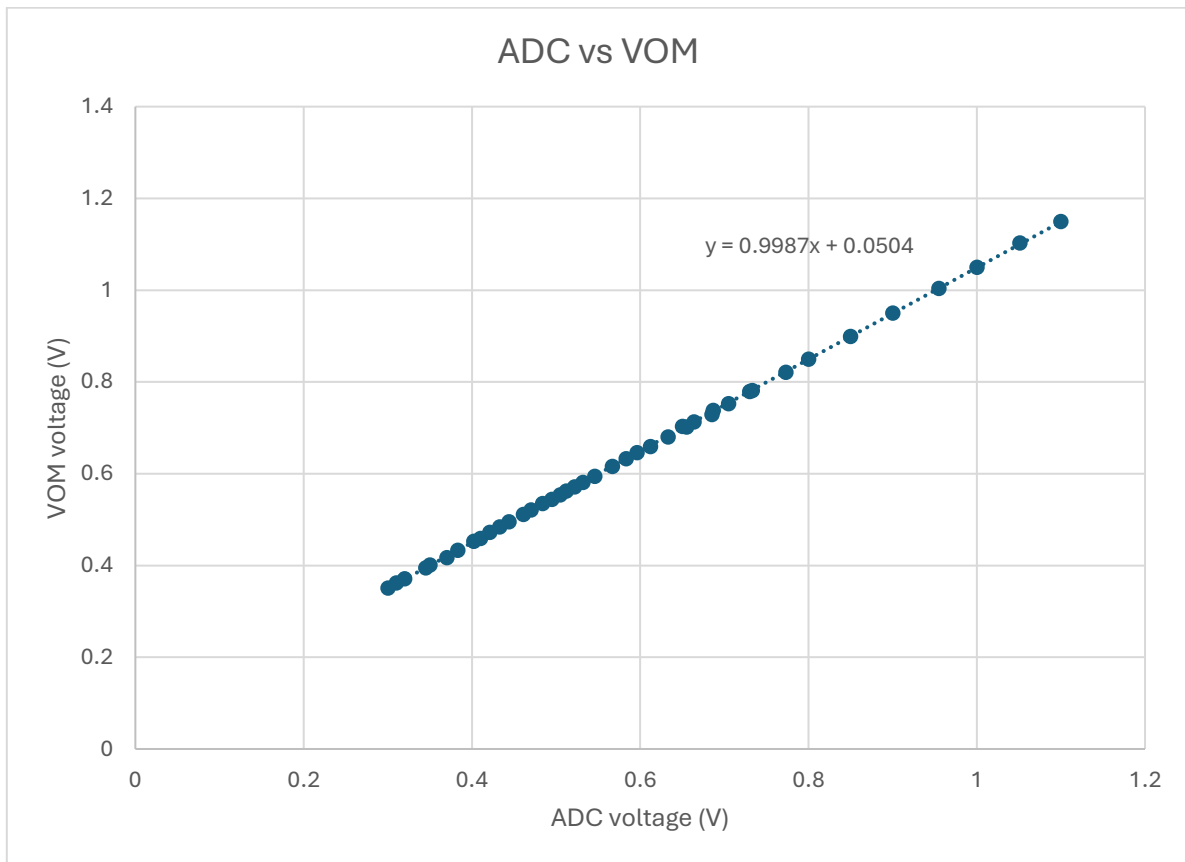
Ta nhận thấy được 2 điều:

- Càng về biên VCC và GND, hệ số khuếch đại càng không ổn định.
- Trong vùng hệ số khuếch đại gần như duy trì ổn định, ta lập đồ thị và tìm phương trình hồi quy có công thức $V_{out} = 101.25 * V_{in} + 5.2417$ (mV) nên suy ngược ra được (giả sử bỏ qua biến trở): $V_{OS} * 101.25 + I^- (\mu A) \times 100 = 5.2417 \text{mV}$. Nếu xét $V_{OS} = 10 \mu V$, ta có $I^- = 42.3 \text{nA}$, còn nếu xét $I^- = 400 \text{pA}$, ta có $V_{OS} = 51.3 \mu V$, các con số này khá nhỏ nhưng vẫn vượt mức datasheet đưa ra.



Hình 48: Đặc tuyến OPAMP của testbench

ADC của STM có vai trò quan trọng trong việc chuyển mạch, tuy nhiên, các ADC đều có offset, khảo sát ADC của STM32 trong tầm điện áp cần đo, ta có đồ thị sau



Hình 49: Đặc tuyến của bộ ADC

Quan hệ này sẽ được dùng để điều chỉnh kết quả thu được từ bộ ADC.

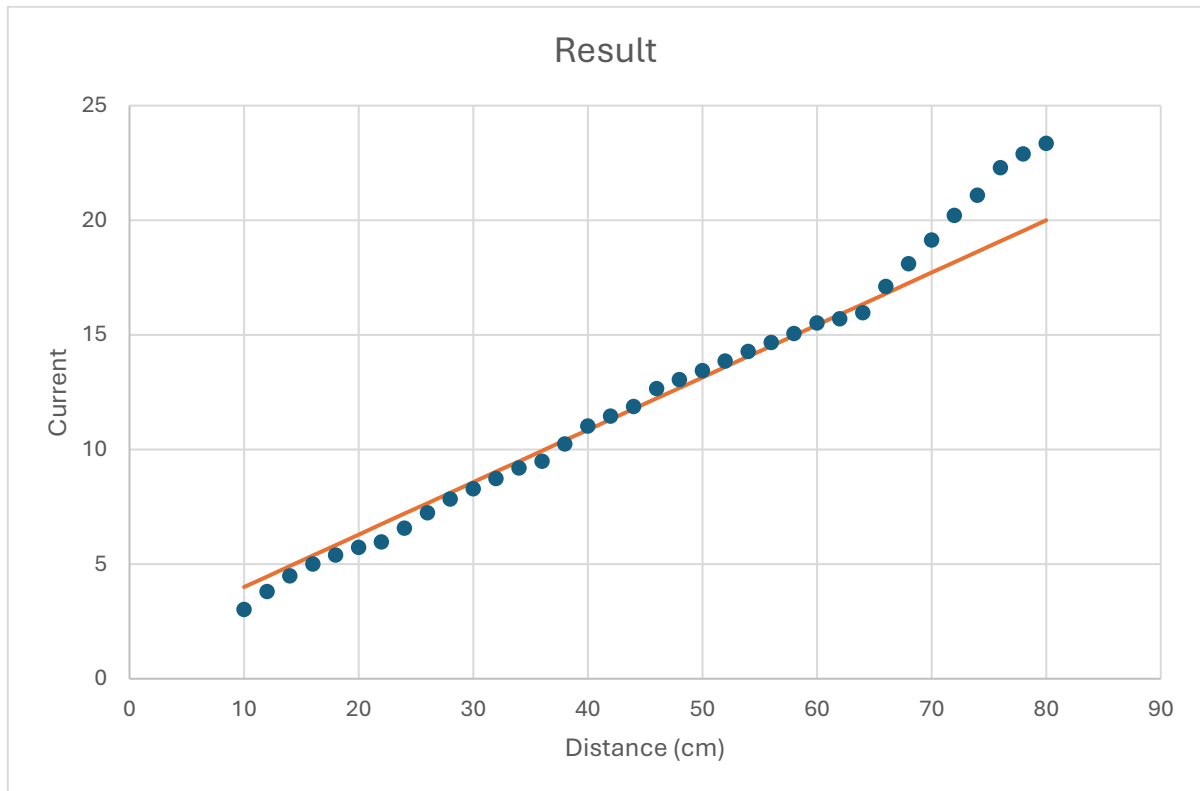
c. Kết quả

Ta thu được bảng sau, với Current Ideal là giá trị dòng ứng với khoảng cách mà ta mong muốn, còn Current Measure là giá trị dòng thực tế đo được thông qua gián tiếp đo áp trên trở, Error là sai số giữa 2 giá trị và Difference là độ lệch về dòng giữa 2 giá trị.

Bảng 6: Kết quả đo trích từ FullCircuit

Distance (cm)	Current Ideal (mA)	Current Measure (mA)	Error (%)	Difference (mA)
10	4	3.012048193	24.69879518	0.987951807
12	4.457142857	3.795180723	14.85171455	0.661962134
14	4.914285714	4.487951807	8.675399272	0.426333907
16	5.371428571	5	6.914893617	0.371428571
18	5.828571429	5.391566265	7.497637609	0.437005164
20	6.285714286	5.722891566	8.953997809	0.562822719
22	6.742857143	5.963855422	11.55299163	0.779001721
24	7.2	6.56626506	8.801874163	0.63373494
26	7.657142857	7.228915663	5.592519331	0.428227194
28	8.114285714	7.831325301	3.487188189	0.282960413
30	8.571428571	8.28313253	3.363453815	0.288296041

32	9.028571429	8.734939759	3.252249504	0.29363167
34	9.485714286	9.186746988	3.151763681	0.298967298
36	9.942857143	9.487951807	4.575197341	0.454905336
38	10.4	10.24096386	1.529193698	0.159036145
40	10.85714286	11.02409639	1.537729867	0.166953528
42	11.31428571	11.44578313	1.162224656	0.131497418
44	11.77142857	11.86746988	0.815884899	0.096041308
46	12.22857143	12.65060241	3.451187929	0.422030981
48	12.68571429	13.04216867	2.809888201	0.356454389
50	13.14285714	13.43373494	2.213200629	0.290877797
52	13.6	13.85542169	1.878100638	0.255421687
54	14.05714286	14.27710843	1.564795768	0.219965577
56	14.51428571	14.6686747	1.063703633	0.154388985
58	14.97142857	15.06024096	0.593212545	0.088812392
60	15.42857143	15.51204819	0.541053101	0.083476764
62	15.88571429	15.69277108	1.214570512	0.192943201
64	16.34285714	15.96385542	2.319066476	0.379001721
66	16.8	17.10843373	1.835915089	0.308433735
68	17.25714286	18.10240964	4.898069098	0.845266781
70	17.71428571	19.12650602	7.972211426	1.41222031
72	18.17142857	20.21084337	11.22319467	2.039414802
74	18.62857143	21.08433735	13.18279252	2.455765921
76	19.08571429	22.28915663	16.78450328	3.203442341
78	19.54285714	22.89156627	17.1352075	3.348709122
80	20	23.34337349	16.71686747	3.343373494



Hình 50: Kết quả đo

Ở 2 vùng biên của tấm đo, phần trăm sai số có giá trị khá lớn, về phần biên 10cm, đó là do nhóm chưa thực hiện hiệu chỉnh qua tầng điều chỉnh của cảm biến, mà sai lệch về

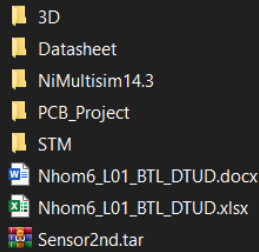
Còn về sai số ở gần biên 80cm, nhóm phát hiện nguyên nhân là do khi đo cảm biến khi cắm vào mạch và đo không cắm mạch ở vùng cận biên này có áp ra khác nhau (dù trong mạch tầng điều chỉnh đã được cấu hình như bộ đệm tạo ra môi trường tương tự như đo không cắm mạch). Nguyên do nhóm vẫn chưa rõ.



Hình 51: Kết quả đo giá trị cảm biến ở vị trí 80cm khi cắm mạch (trái) và khi đo rời (phải)

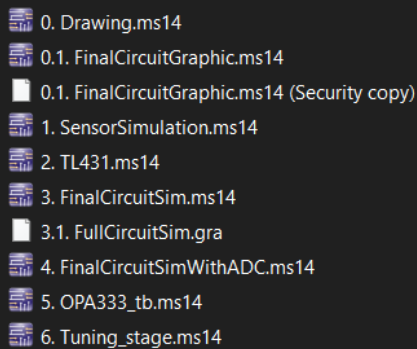
PHỤ LỤC

a. Tổ chức file



- 3D: chứa file Autocad để in testbench
- Datasheet: chứa các datasheet liên quan đến TLC431, OPA333, GP2Y0A21YK0F
- NiMultisim14.3: chứa các file mô phỏng mạch
- PCB_Project: chứa file vẽ PCB
- STM: chứa file code chương trình điều khiển relay
- Nhom6_L01_BTL_DTUD.xlsx: chứa các sheet excel dùng để tính toán và chọn linh kiện
- Sensor2nd: chứa file trích xuất dữ liệu từ cảm biến bằng trang [WebPlotDigitizer](https://www.webplotdigitizer.com/)

b. NiMultisim14.3



- 0. Drawing: dùng để vẽ hình trong bài này
- 0.1. FinalCircuitGraphic: toàn bộ mạch (dùng OPAMP thay vì vi điều khiển để switch relay, không thể mô phỏng được vì quá nặng)
- 1. SensorSimulation: mô phỏng cảm biến
- 2. TL431: mạch kiểm tra lại tạo điện áp Vref
- 3. FinalCircuitSim: mô phỏng toàn mạch (chưa có tầng điều chỉnh)
- 3.1. FullCircuitSim: hình ảnh đồ thị mô phỏng
- 4. FinalCircuitSimWithADC: mô phỏng kèm ADC (chưa có tầng điều chỉnh)
- 5. OPA333_tb: test bench kiểm tra đặc tính OPA333
- 6. Tuning_stage: kiểm tra hoạt động của mạch điều chỉnh

c. Nhom6_L01_BTL_DTUD.xlsx

- a. SensorSim: chọn bậc phương trình hồi quy tối ưu cho cảm biến (trong tầm bậc 6 đến 30)
- a. NiSimDat: dùng để trích xuất những điểm (1, 1.2, ..., 7.8, 8) trong mô phỏng DC sweep từ 1V-8V với bước nhảy là 1mV

- a. Linearization 2eq: tìm điểm tối ưu để chia đôi dữ liệu để thực hiện hồi quy 2 đoạn
- a. Linearization 4eq: tìm điểm tối trong 2 đoạn hồi quy trên để chia ra thực hiện hồi quy 4 đoạn
- c. R3, R4: chọn giá trị R3, R4 có trên thị trường sao cho sai số ít nhất
- c. R1, R2: tương tự cho R1, R2
- c. FullCircuit_NonAdj: kết quả tính toán khi chọn R1a là 6,8k
- c. FullCircuit_Adj: kết quả mô phỏng khi hiệu chỉnh R1a bằng trở 5.6k nối tiếp 1k
- c. NiSimDat: trích xuất dữ liệu từ mô phỏng
- d. ADC: tính toán giá trị ADC tương ứng
- Sensor: kết quả đo và phương trình hiệu chỉnh cho tầng điều chỉnh
- OPA333Meas: kết quả đo khảo sát OPA333
- STM_ADC: đo và hiệu chỉnh bộ ADC của STM
- FullCircuit: đo và đánh giá sai số toàn mạch