

**ĐẠI HỌC QUỐC GIA TP HỒ CHÍ MINH**  
**TRƯỜNG ĐẠI HỌC BÁCH KHOA**

-----oo-----

**KHOA ĐIỆN – ĐIỆN TỬ**



**BÀI TẬP LỚN 1**  
**Môn: Điện Tử Ứng Dụng**

**GVHD: ThS. Nguyễn Trung Hiếu**

**LỚP: L01 - NHÓM: 12 - HK: 251**

**Ngày nộp:** 30/11/2025

| Sinh viên thực hiện | Mã số sinh viên | Điểm số |
|---------------------|-----------------|---------|
| Lê Minh Quân        | 2312824         |         |
| Trương Tấn Đạt      | 2310713         |         |
| Nguyễn Xuân Đức     | 2310792         |         |

*Thành phố Hồ Chí Minh – 2025*

## LỜI NÓI ĐẦU

### 1. Giới thiệu đề tài.

Trong cuộc sống hiện nay, ánh sáng là một phần quan trọng được ứng dụng trong nhiều lĩnh vực, nhất là điện- điện tử. Ánh sáng được con người sử dụng trong năng lượng mặt trời, trong nhiều hệ thống đo lường và điều khiển hiện nay, việc theo dõi cường độ ánh sáng cũng là một yêu cầu quan trọng, xuất hiện trong các lĩnh vực như nông nghiệp thông minh, giám sát an toàn bức xạ, thiết bị y sinh, điều khiển chiếu sáng tự động và các ứng dụng quang học khác. Để thực hiện các phép đo chính xác ở mức cường độ cao cảm biến quang bán dẫn – đặc biệt là photodiode – là lựa chọn tối ưu nhờ độ tuyến tính cao, tốc độ đáp ứng nhanh và độ ổn định tốt. Việc sử dụng photodiode để đo cường độ ánh sáng  $10-100 \text{ mW/cm}^2$ , sau đó cho ra dòng điện, việc chuyển đổi tín hiệu quang thành dòng điện đầu ra chuẩn công nghiệp  $4-20 \text{ mA}$  đòi hỏi nghiên cứu và thiết kế một hệ mạch phù hợp, đảm bảo độ chính xác, nhiễu thấp và khả năng hoạt động ổn định trong môi trường thực tế. Vì vậy, đề tài “Thiết kế mạch đo ánh sáng sử dụng photodiode với tầm đo  $10-100 \text{ mW/cm}^2$ , độ phân giải  $5 \text{ mW/cm}^2$  và ngõ ra  $4-20 \text{ mA}$ ” mang tính thiết thực và quan trọng trong việc ứng dụng các cảm biến quang vào hệ thống đo lường hiện đại.

### 2. Phạm vi nghiên cứu.

Đề tài tập trung vào việc nghiên cứu và thiết kế hệ đo cường độ ánh sáng sử dụng photodiode loại 2 dây. Bao gồm: lựa chọn photodiode phù hợp với dải đo yêu cầu, phân tích các chế độ hoạt động của photodiode, thiết kế mạch khuếch đại chuyển đổi quang–điện dựa trên op-amp, mô phỏng toàn bộ mạch để đánh giá độ tuyến tính và sai số, thiết kế mạch xuất tín hiệu dòng  $4-20 \text{ mA}$  và mạch đọc dòng bằng ADC. Làm mạch in PCB thực tế để đánh giá độ chính xác của tính toán và mô phỏng.

### 3. Mục tiêu nghiên cứu.

Mục tiêu chính của đề tài là xây dựng và mô phỏng một hệ đo ánh sáng có khả năng hoạt động chính xác trong dải  $10-100 \text{ mW/cm}^2$  và cho tín hiệu đầu ra dạng dòng  $4-20 \text{ mA}$  theo chuẩn công nghiệp. Các mục tiêu cụ thể gồm:

- Lựa chọn photodiode 2 dây phù hợp với dải công suất quang cần đo.
- Xác định chế độ hoạt động tối ưu (photovoltaic hoặc photoconductive) nhằm giảm nhiễu và tăng độ tuyến tính.
- Lựa chọn và mô phỏng op-amp theo datasheet, đảm bảo đáp ứng dòng và độ ổn định cần thiết.
- Thiết kế mạch chuyển đổi quang–điện và hiệu chỉnh để đảm bảo sai số toàn hệ thống không vượt quá  $\pm 5\%$ .
- Thiết kế mạch đọc dòng  $4-20 \text{ mA}$  đưa vào ADC và lựa chọn độ phân giải ADC phù hợp với độ phân giải  $5 \text{ mW/cm}^2$ .
- Đánh giá hệ thống qua mô phỏng và làm mạch thực tế để đánh giá kết quả.

#### 4. Phương pháp nghiên cứu.

Đề tài sử dụng kết hợp phương pháp nghiên cứu lý thuyết, tính toán, mô phỏng và làm mạch thực tế.

- Nghiên cứu lý thuyết: tìm hiểu nguyên lý hoạt động của photodiode, các chế độ hoạt động, đặc tính I–V, đáp ứng phổ, độ nhạy quang (Responsivity), phân tích mạch chuyên đổi dòng quang–điện (Transimpedance Amplifier), và chuẩn dòng 4–20 mA. Cách hoạt động của LED và sự liên quan của LED phát tới photodiode để đánh giá sự chính xác của tính toán. Sử dụng các phương pháp để tuyển tính hóa các phương trình không tuyến tính: bình phương tối thiểu.
- Phân tích – tính toán: xác định thông số linh kiện cần thiết, tính toán độ khuếch đại, độ phân giải, sai số và mối quan hệ giữa công suất quang và dòng điện đầu ra.
- Mô phỏng: sử dụng phần mềm Multisim để mô phỏng đặc tính photodiode, mô phỏng op-amp theo datasheet, kiểm tra độ tuyến tính, nhiễu và sai số của mạch.
- Đánh giá và hiệu chỉnh: so sánh giá trị mô phỏng với lý thuyết để đảm bảo độ sai số trong giới hạn  $\pm 5\%$ , sau đó tối ưu hóa các thông số mạch.
- Làm mạch thực tế: làm mạch in thực tế bằng PCB và hiệu chỉnh chính xác để bảo đảm sai số trong giới hạn  $\pm 5\%$ .

. Kết cấu của đề tài

Đề tài gồm các phần chính sau:

- Ngoài mục lục, phần mở đầu, kết luận và tài liệu tham khảo, đề tài gồm phần nội dung bao gồm 5 chương.
- Chương 1: Tổng quan về lý thuyết photodiode, led, OPAMP, các mạch sử dụng OPAMP.
- Chương 2: Phân tích yêu cầu kỹ thuật, lựa chọn photodiode, chế độ hoạt động và op-amp.
- Chương 3: Thiết kế mạch đo ánh sáng và mạch xuất tín hiệu dòng 4–20 mA. Thiết kế nguồn phát ánh sáng LED đỏ trong dài 10–100mW/cm<sup>2</sup> với độ phân giải 5 mW/cm<sup>2</sup>.
- Chương 4: Thiết kế và mô phỏng mạch đọc dòng vào ADC, lựa chọn ADC và đánh giá độ phân giải

## Nội dung

|                                                                                                                                 |          |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|
| <b>Chương 1: Tổng quan về lý thuyết photodiode, led, OPAMP, các mạch sử dụng OPAMP và nguyên lý đo cường độ ánh sáng.</b> ..... | <b>6</b> |
| 1.1. Tổng quan về photodiode .....                                                                                              | 6        |
| 1.1.2. Nguyên lý hoạt động .....                                                                                                | 6        |
| 1.1.3. Chế độ Photoconductive (Reverse-bias Mode) .....                                                                         | 7        |
| 1.2. Tổng quan về LED .....                                                                                                     | 7        |
| 1.2.1. Các thông số quan trọng của LED.....                                                                                     | 7        |
| 1.3. Mạch khuếch đại vi sai (Differential Amplifier).....                                                                       | 9        |
| 1.3.1. Giới thiệu.....                                                                                                          | 9        |
| 1.3.2. Nguyên lý hoạt động .....                                                                                                | 9        |
| 1.3.3. Vai trò trong đo lường và xử lý tín hiệu.....                                                                            | 9        |
| 1.4. Mạch khuếch đại không đảo (Non-inverting Amplifier) .....                                                                  | 10       |
| 1.4.1. Khái quát .....                                                                                                          | 10       |
| 1.4.2. Nguyên tắc hoạt động.....                                                                                                | 10       |
| 1.4.3. Ưu điểm .....                                                                                                            | 10       |
| 1.5. Mạch Howland (Howland Current Pump) .....                                                                                  | 11       |
| 1.5.1. Tổng quan.....                                                                                                           | 11       |
| 1.5.2. Cấu trúc và điều kiện cân bằng.....                                                                                      | 11       |
| 1.5.3. Ý nghĩa trong đề tài .....                                                                                               | 12       |
| 1.6. Phương pháp bình phương tối thiểu (Least Squares Method) .....                                                             | 12       |
| 1.6.1. Bối cảnh.....                                                                                                            | 12       |
| 1.6.2. Mô hình hóa quan hệ .....                                                                                                | 12       |
| 1.6.3. Công thức tính toán .....                                                                                                | 12       |
| 1.6.4. Ý nghĩa thực tiễn .....                                                                                                  | 13       |

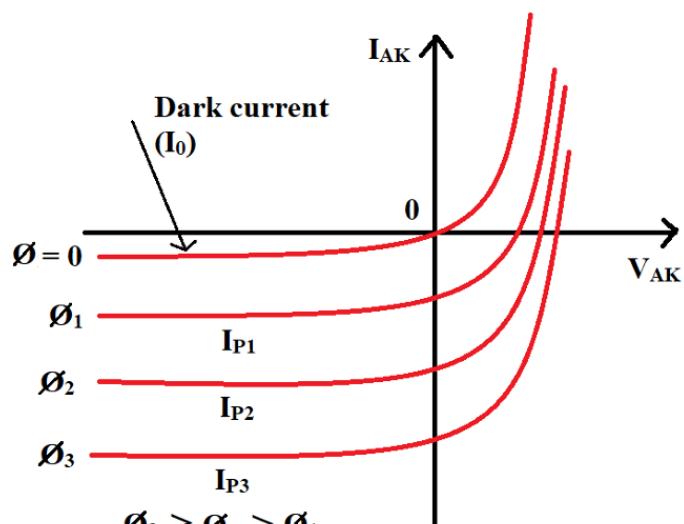
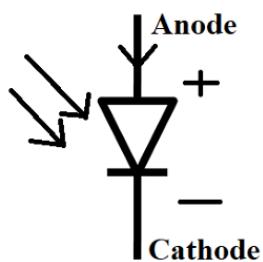
|                                                                                                         |           |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 1.6.5. Kết luận .....                                                                                   | 13        |
| <b>Chương 2: Phân tích yêu cầu kỹ thuật, lựa chọn photodiode, chế độ hoạt động và op-amp. ....</b>      | <b>14</b> |
| <b>2.1. Phân tích yêu cầu kỹ thuật của bài toán .....</b>                                               | <b>14</b> |
| <b>2.2. Chọn chế độ hoạt động của Photodiode .....</b>                                                  | <b>14</b> |
| 2.3 Thiết kế mạch đọc cảm biến và chuyển đổi thành nguồn dòng .....                                     | 15        |
| 2.3.1 Tính toán giá trị đầu vào từ photodiode và lựa chọn bước sóng .....                               | 15        |
| 2.3.2 Tính toán giá trị trong mạch theo yêu cầu .....                                                   | 16        |
| 2.3.3 Tính toán giá trị sai số khi thiết kế mạch.....                                                   | 16        |
| 2.3.4 Nhận xét kết quả thiết kế mạch và lựa chọn linh kiện.....                                         | 20        |
| <b>Chương 3: Thiết kế và mô phỏng mạch đọc dòng vào ADC, lựa chọn ADC và đánh giá độ phân giải.....</b> | <b>21</b> |
| 3.1 Thiết kế mạch đọc ADC từ nguồn dòng đã thiết kế.....                                                | 21        |
| 3.1.1 Thiết kế mạch đọc ADC theo yêu cầu đề bài .....                                                   | 21        |
| 3.1.2 Tính toán sai số của mạch .....                                                                   | 23        |
| 3.2. Nhận xét kết quả tính toán .....                                                                   | 26        |

# Chương 1: Tổng quan về lý thuyết photodiode, led, OPAMP, các mạch sử dụng OPAMP và nguyên lý đo cường độ ánh sáng.

## 1.1. Tổng quan về photodiode

Khái niệm: photodiode là một linh kiện bán dẫn được thiết kế để chuyển đổi năng lượng ánh sáng thành tín hiệu điện. Khác với diode thông thường, photodiode được tối ưu để có độ nhạy quang cao, tốc độ đáp ứng nhanh và khả năng hoạt động ổn định trong nhiều điều kiện chiếu sáng khác nhau. Khi ánh sáng có năng lượng photon đủ lớn chiếu vào lớp tiếp giáp p-n của photodiode, các cặp electron-hỗn sốt được tạo ra và tạo thành dòng điện tỉ lệ với cường độ ánh sáng. Nhờ đặc tính tuyến tính cao giữa công suất bức xạ và dòng điện, photodiode được ứng dụng rộng rãi trong các hệ thống đo lường quang.

### 1.1.2. Nguyên lý hoạt động



$\Phi$  is radiant flux (or luminous flux)

Khi ánh sáng có năng lượng chiếu vào photodiode, photodiode sẽ tạo dòng  $I_{AK}$  khi không có ánh sáng photodiode sẽ tạo dòng  $I_0$  hay còn gọi là (dark current) gây nhiễu.

$$\text{Biểu thức I-V: } I_{AK} = I_0 \left( e^{\frac{V_{AK}}{V_T}} - 1 \right) - I_p$$

Trong đó:  $I_0$  là dòng khi không có ánh sáng.

$I_p$  là dòng của photodiode.

Photodiode có hai chế độ hoạt động chính:

Chế độ Photovoltaic (Zero-bias Mode)

- Không cấp điện áp phân cực; photodiode tạo ra điện áp như một cell quang.
- Nhiễu thấp, dòng tối nhỏ.
- Tốc độ đáp ứng chậm hơn do điện dung lớp depletion lớn.
- Dòng điện nhỏ  $\Rightarrow$  khó sử dụng trong các mạch dải đo lớn.
- Phù hợp cho đo ánh sáng yếu, thiết bị đo chính xác cao.

### 1.1.3. Chế độ Photoconductive (Reverse-bias Mode)

- Photodiode được phân cực ngược.
- Điện trường mạnh làm giảm điện dung junction  $\Rightarrow$  tăng tốc độ đáp ứng.
- Dòng quang tăng tuyến tính và lớn hơn.
- Tuy nhiên dòng tối cũng tăng lên.
- Phù hợp cho đo ánh sáng cường độ trung bình đến cao, dải đo rộng.

## 1.2. Tổng quan về LED

LED (Light Emitting Diode) là một loại diode bán dẫn có khả năng phát ra ánh sáng khi được phân cực thuận. Ánh sáng phát ra có màu sắc và bước sóng phụ thuộc vào vật liệu bán dẫn và cấu trúc lớp tiếp giáp. Nhờ ưu điểm hiệu suất cao, tuổi thọ lớn và khả năng điều khiển linh hoạt, LED đã trở thành nguồn sáng chủ đạo trong nhiều lĩnh vực như chiếu sáng dân dụng, báo hiệu, hiển thị, cảm biến và truyền thông quang.

### 1.2.1. Các thông số quan trọng của LED

- Peak Wavelength ( $\lambda_P$ ) – Bước sóng đỉnh phát xạ

Peak wavelength ( $\lambda_P$ ) là bước sóng tại đó LED phát ra bức xạ mạnh nhất. Đây là giá trị đo trong miền quang học (optical), không phải giá trị cảm nhận màu của mắt.

Nó phụ thuộc trực tiếp vào năng lượng bandgap của vật liệu bán dẫn.

LED đỏ: ~630–660 nm

LED xanh lá: ~520–540 nm

LED xanh dương: ~450–470 nm

LED hồng ngoại (IR): ~850–950 nm

Spectral Bandwidth ( $\Delta\lambda$ ) – Độ rộng phổ

- Spectral Bandwidth ( $\Delta\lambda$ ) là độ rộng của phổ phát xạ, tính tại mức 50% cường độ cực đại (FWHM – Full Width at Half Maximum).

Nó cho biết phổ ánh sáng LED rộng hay hẹp.

LED thường có  $\Delta\lambda$  khoảng 20–50 nm.

LED IR có  $\Delta\lambda$  khoảng 40–60 nm

- View Angle ( $2\theta_{1/2}$ ) – Góc chiếu sáng và tính góc khối (Solid Angle)

Góc nhìn  $2\theta_{1/2}$  là góc tại đó cường độ sáng giảm còn 50% so với cường độ tại trục chính của LED.

- Continuous Forward Current (IF)

Đây là dòng điện phân cực thuận liên tục cho phép LED hoạt động mà không gây hư hỏng.

LED 5mm nhỏ: IF điển hình 20 mA

LED công suất: 350 mA, 700 mA, 1500 mA...

- Peak Forward Current (IFP)

Peak Forward Current (IFP) là dòng tối đa mà LED chịu được trong thời gian ngắn, khi được kích bằng xung (PULSE).

- Operating Temperature (Topr) – Nhiệt độ hoạt động

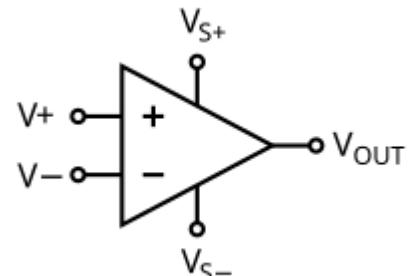
Đây là nhiệt độ môi trường mà LED có thể hoạt động an toàn, ví dụ:

$$T_{opr} = -40^{\circ}\text{C} \text{ to } +85^{\circ}\text{C}$$

### 1.3. Mạch khuếch đại vi sai (Differential Amplifier)

#### 1.3.1. Giới thiệu

Mạch khuếch đại vi sai là một trong những cấu trúc quan trọng nhất trong kỹ thuật điện tử tương tự, được sử dụng rộng rãi nhằm xử lý các tín hiệu có biên độ nhỏ trong môi trường nhiễu cao. Đặc trưng cơ bản của mạch vi sai là khả năng khuếch đại hiệu điện thế giữa hai ngõ vào, trong khi loại bỏ phần lớn các thành phần tín hiệu có tính chất chung (common-mode).



Tính năng này khiến mạch vi sai trở thành nền tảng của các hệ đo lường chính xác như: cảm biến cầu Wheatstone, đo điện áp shunt, cảm biến áp suất, điện trở biến thiên theo ánh sáng (LDR), hay trong khuếch đại sinh học (ECG, EMG).

#### 1.3.2. Nguyên lý hoạt động

Một mạch vi sai điển hình sử dụng op-amp với cấu trúc điện trở đối xứng. Trong trường hợp lý tưởng, điện áp đầu ra được mô tả bởi:

$$V_{out} = \left( \frac{R_2}{R_1} \right) (V_2 - V_1)$$

Điều kiện quan trọng để mạch đạt khả năng khử nhiễu tối ưu là:

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{R_4}{R_3}$$

Khi điều kiện này được thỏa mãn, độ lợi theo chế độ nhiễu chung (common-mode gain) gần như bằng không, tạo ra tỉ số CMRR rất cao – một yếu tố quan trọng trong các hệ đo lường nhiễu thấp.

#### 1.3.3. Vai trò trong đo lường và xử lý tín hiệu

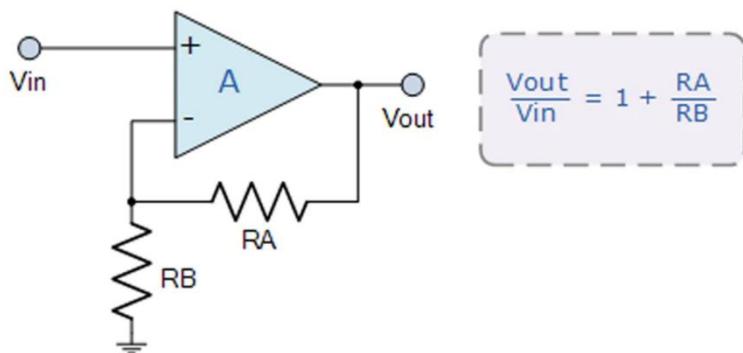
Nhờ khả năng loại bỏ nhiễu chung, mạch vi sai thường được dùng:

- Khi tín hiệu cảm biến có giá trị rất nhỏ so với nhiễu môi trường;
- Khi cần truyền tín hiệu xa;
- Trong bộ đọc tín hiệu cầu biến trở (strain gauge, LDR, thermistor);
- Trong khối tiền khuếch đại (pre-amplifier) của bộ ADC.

## 1.4. Mạch khuếch đại không đảo (Non-inverting Amplifier)

### 1.4.1. Khái quát

Mạch khuếch đại không đảo là một cấu trúc cơ bản nhưng có ứng dụng cực kỳ rộng rãi nhờ đặc tính trở kháng đầu vào rất lớn, độ tuyến tính cao và khả năng khuếch đại tín hiệu với hệ số cố định, tránh méo dạng. Đây là một khối nền được sử dụng trong hầu hết các hệ thống đo lường, xử lý tín hiệu tương tự, và mạch phản hồi.



### 1.4.2. Nguyên tắc hoạt động

Trong cấu hình này, tín hiệu được đưa vào chân không đảo (+) của op-amp, trong khi chân đảo (-) được nối với mạng hồi tiếp âm. Độ lợi của mạch được xác định bởi tỉ lệ điện trở:

$$A_v = 1 + \frac{R_f}{R_g}$$

Tính chất không đảo pha giúp tín hiệu đầu ra duy trì dạng sóng và cực tính nguyên vẹn so với đầu vào.

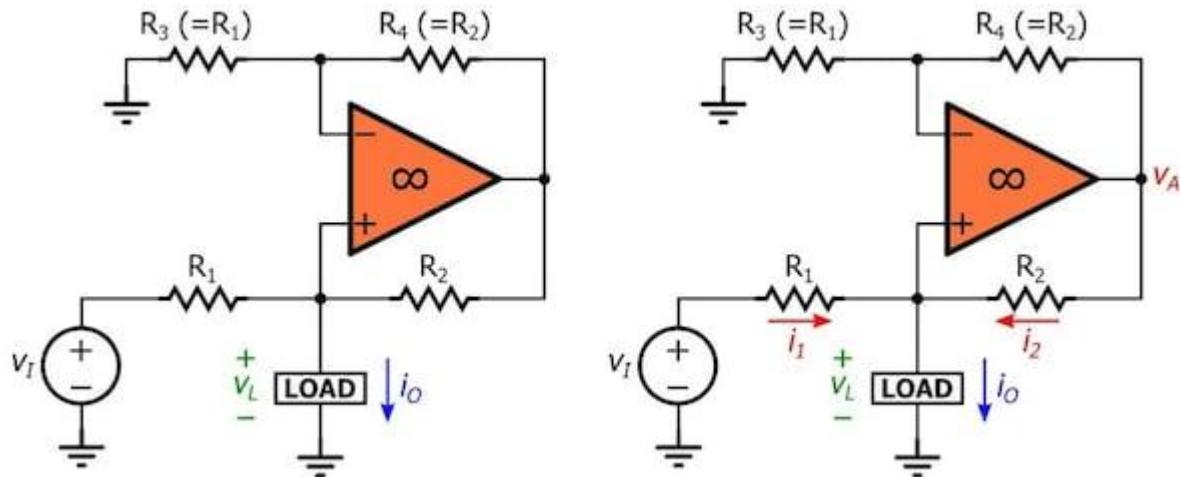
### 1.4.3. Ưu điểm

- Trở kháng vào cao → không gây ảnh hưởng lên nguồn tín hiệu.
- Điều khiển độ lợi dễ dàng và chính xác.
- Dải tuyến tính rộng, độ méo thấp.
- Là khối xây dựng chính trong các cấu trúc phức tạp hơn như Howland.

## 1.5. Mạch Howland (Howland Current Pump)

### 1.5.1. Tổng quan

Mạch bơm dòng Howland là một cấu trúc đặc biệt của op-amp được thiết kế để tạo ra nguồn dòng điều khiển bằng điện áp (Voltage-Controlled Current Source – VCCS). Đây là một trong số ít cấu hình có khả năng tạo ra dòng điện gần như độc lập với trở kháng tải, miễn là các điện trở được cân chỉnh chính xác.



Mạch Howland được ứng dụng trong các hệ thống yêu cầu dòng chính xác như:

- điều khiển LED công suất,
- kích thích cảm biến trở kháng,
- mạch đo trở suất,
- nguồn dòng trong hệ thống thí nghiệm.

### 1.5.2. Cấu trúc và điều kiện cân bằng

Mạch Howland kết hợp đồng thời hai thuộc tính:

- khuếch đại không đảo,
- khuếch đại vi sai,  
với mạng hồi tiếp đặc biệt.

Điều kiện cân bằng quan trọng:

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{R_4}{R_3}$$

Nếu sai số điện trở nhỏ (thường yêu cầu sai số 0.1% hoặc 1%), dòng ra đạt được tính độc lập tải, tức là:

$$I_{out} \approx \frac{V_{in}}{R_s}$$

trong đó  $R_s$  là điện trở giới hạn dòng.

### 1.5.3. Ý nghĩa trong đề tài

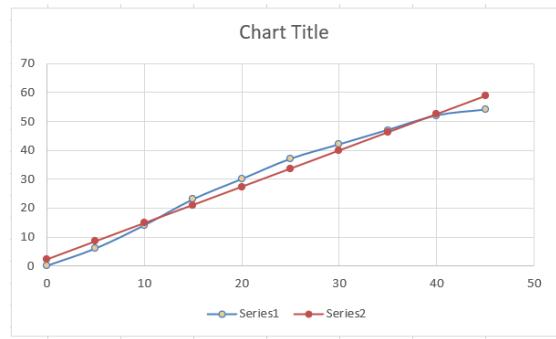
Trong nhiều ứng dụng LED, việc điều khiển dòng quan trọng hơn điều khiển điện áp, bởi độ sáng LED tỷ lệ trực tiếp với dòng forward. Mạch Howland cho phép xây dựng nguồn dòng chính xác, phù hợp cho:

- mô phỏng đặc tuyến LED,
- điều khiển độ sáng,
- tuyến tính hóa mạch cảm biến ánh sáng.

## 1.6. Phương pháp bình phương tối thiểu (Least Squares Method)

### 1.6.1. Bối cảnh

Trong nhiều thiết bị điện tử, đặc biệt là LED và cảm biến quang, mối quan hệ giữa kích thích (dòng điện) và đáp ứng (cường độ sáng) không hoàn toàn tuyến tính. Để thuận tiện trong mô phỏng và xử lý tín hiệu, ta cần xây dựng một mô hình tuyến tính xấp xỉ đặc tuyến của linh kiện.



Phương pháp bình phương tối thiểu là phương pháp toán học tối ưu hóa, được dùng để tìm đường thẳng phù hợp nhất với dữ liệu thực nghiệm.

### 1.6.2. Mô hình hóa quan hệ

Ta giả thiết quan hệ giữa cường độ sáng  $L$  và dòng điện  $I$  có dạng tuyến tính:

$$L = aI + b$$

Trong đó:

- $a$ : độ dốc – thể hiện tốc độ tăng độ sáng theo dòng,
- $b$ : hệ số lệch – thể hiện mức sáng tại dòng gần bằng 0 (trong thực tế thường do nhiễu, độ nhạy linh kiện hoặc sai số đọc dữ liệu).

### 1.6.3. Công thức tính toán

Cho tập dữ liệu gồm  $n$  cặp  $(I_i, L_i)$ , hệ số  $a$  và  $b$  được tính theo:

$$a = \frac{n \sum (I_i L_i) - (\sum I_i)(\sum L_i)}{n \sum I_i^2 - (\sum I_i)^2}$$

$$b = \frac{\sum L_i - a \sum I_i}{n}$$

Đây là kết quả thu được từ việc tối thiểu hóa tổng bình phương sai số:

$$S = \sum_{i=1}^n [L_i - (aI_i + b)]^2$$

và tìm giá trị  $a, b$  làm  $S$  đạt cực tiểu.

#### 1.6.4. Ý nghĩa thực tiễn

Phương trình tuyến tính thu được:

- dễ áp dụng trong mô phỏng NI Multisim MATLAB, Proteus hoặc LTSpice;
- phù hợp đưa vào mạch ADC/DAC hoặc vi điều khiển;
- giúp quy đổi giá trị dòng → độ sáng một cách chính xác;
- giảm sai số so với việc nội suy thủ công từ datasheet.

#### 1.6.5. Kết luận

Phương pháp bình phương tối thiểu không chỉ cung cấp mô hình tuyến tính hóa chính xác mà còn giúp hiểu sâu hơn về xu hướng hành vi của LED khi thay đổi dòng drive. Đây là phương pháp tiêu chuẩn trong kỹ thuật đo lường và xử lý dữ liệu thực nghiệm.

## **Chương 2: Phân tích yêu cầu kỹ thuật, lựa chọn photodiode, chế độ hoạt động và op-amp.**

### **2.1. Phân tích yêu cầu kỹ thuật của bài toán**

Hệ thống yêu cầu các đặc tính chính:

- Dải đo ánh sáng:  $10 - 100 \text{ mW/cm}^2$ .
- Độ phân giải:  $5 \text{ mW/cm}^2$ .
- Ngõ ra dòng chuẩn công nghiệp:  $4-20 \text{ mA}$ , nối đất (grounded current loop).
- Sai số tối đa:  $\pm 5\%$  trên toàn dải đo.
- Nhiệt độ hoạt động phù hợp mạch điện tử thông thường:  $0-50^\circ\text{C}$ .
- Yêu cầu tuyến tính giữa công suất bức xạ và tín hiệu đo (điện áp/dòng).
- Tốc độ đáp ứng không phải quá cao (ứng dụng đo ánh sáng tĩnh), nhưng cần độ ổn định tốt và nhiễu thấp.

### **2.2. Chọn chế độ hoạt động của Photodiode**

Hai chế độ hoạt động phổ biến:

#### (1) Photovoltaic Mode (Zero-bias)

- Nhiễu thấp, drift thấp.
- Tuy nhiên, độ tuyến tính kém hơn khi cường độ ánh sáng cao.
- Dòng ra nhỏ, không phù hợp cho dải đo đến  $100 \text{ mW/cm}^2$ .

→ Không phù hợp với bài toán.

#### (2) Photoconductive Mode (Reverse-bias)

- Độ tuyến tính cao, đáp ứng được dải công suất lớn.
- Tốc độ đáp ứng nhanh.
- Dòng quang tỉ lệ tuyến tính với công suất quang.

Với dải đo 10–100 mW/cm<sup>2</sup>, photodiode cần làm việc ở chế độ phân cực ngược 5–10 V.

→ Lựa chọn cuối cùng: Photoconductive mode.

### 2.3 Thiết kế mạch đọc cảm biến và chuyển đổi thành nguồn dòng

#### 2.3.1 Tính toán giá trị đầu vào từ photodiode và lựa chọn bước sóng

Ta lựa chọn BPW34 làm photodiode:

$$\text{Ta có: } R(\lambda) = \frac{I_P}{\Phi_E} \rightarrow \frac{I_P}{\frac{\Phi_E \cdot 683 \cdot V(\lambda)}{A}} = \frac{R(\lambda) \cdot A}{683 \cdot V(\lambda)} \rightarrow \frac{I_P}{\frac{\Phi_V}{A}} = R_{\lambda E} = \frac{R(\lambda) \cdot A}{683 \cdot V(\lambda)}$$

$$R_{\lambda E} = \frac{R(\lambda) \cdot A}{683 \cdot V(\lambda)}$$

Theo datasheet:  $\log I_P = a \log E_A + b$

Ta có:

$$\log(9 \cdot 10^{-6}) = a \log(100) + b$$

$$\log(90 \cdot 10^{-6}) = a \log(1000) + b$$

$$\rightarrow a = 1; b = \log\left(\frac{9 \cdot 10^{-6}}{100}\right)$$

$$\log I_P = \log E_A + \log\left(\frac{9 \cdot 10^{-6}}{100}\right) = \log\left(\frac{9 \cdot 10^{-6} E_A}{100}\right) \rightarrow I_P = \frac{9 \cdot 10^{-6} E_A}{100} = 9 \cdot 10^{-8} E_A$$

$$\rightarrow R_{\lambda E} = 9 \cdot 10^{-8} \left( \frac{A}{\text{lux}} \right) = 9 \cdot 10^{-8} \left( \frac{\text{A} \cdot \text{m}^2}{\text{lm}} \right)$$

$$\text{Với } A = 7.5 \text{ mm}^2 \rightarrow R(\lambda) = R_{\lambda E} \cdot \frac{683 \cdot V(\lambda)}{A} \left( \frac{\text{A}}{\text{W}} \right)$$

Suy ra được:

$$\text{Chọn } \lambda = 645 \text{ nm} \rightarrow R(\lambda) = 1.094 \text{ (mA/mW)}$$

Chọn photodiode hoạt động ở chế độ quang dẫn.

Trong điều kiện chiếu sáng mạnh:  $I_{KA} = I_P$

$$\text{Ta có } E_e = \frac{\Phi_E}{A} = [10; 100] \text{ mW/cm}^2$$

$$\rightarrow I_P = E_e \cdot A \cdot R(\lambda) = [0.82; 8.2] \text{ mA}$$

Để ra được 4-20mA thì ta tuyến tính hóa theo dạng:  $y = ax + b$

$$x = 0.82 \text{ mA}, y = 4 \text{ mA} \rightarrow 4 = 0.82a + b;$$

$$x = 8.2 \text{ mA}, y = 20 \text{ mA} \rightarrow 20 = 8.2a + b$$

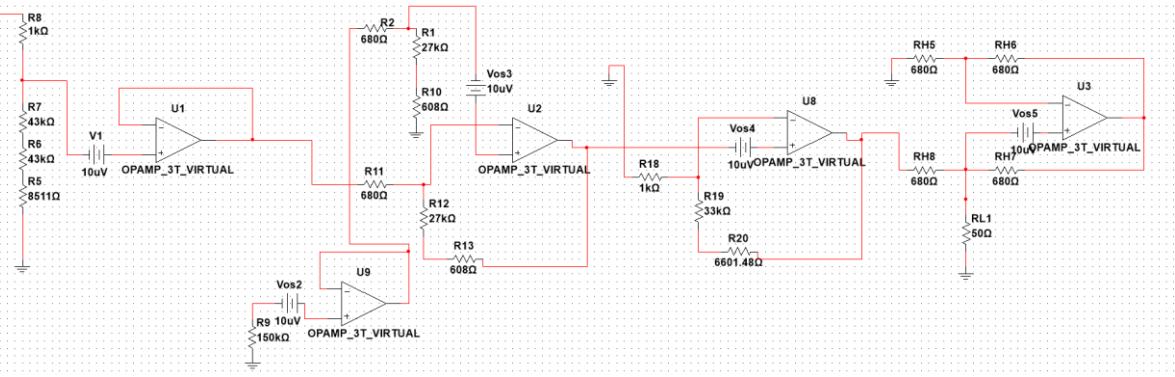
$$\text{Từ đó ta có được } a = 2.168; b = \frac{20}{9}$$

$$I_{\text{output}} = 2.168I_P + \frac{20}{9} = 2.168(I_P + 1) \text{ (mA)}$$

Ta có độ phân giải  $5 \text{ mW/cm}^2$  ứng với  $\Delta I_P = 0.41 \text{ mA} \rightarrow \Delta I_{\text{output}} = 0.89 \text{ mA}$

Vậy khi độ phân giải tăng giảm  $5 \text{ mW/cm}^2$  ứng với  $I_{\text{output}}$  thay đổi  $0.89 \text{ mA}$

### **2.3.2 Tính toán giá trị trong mạch theo yêu cầu**



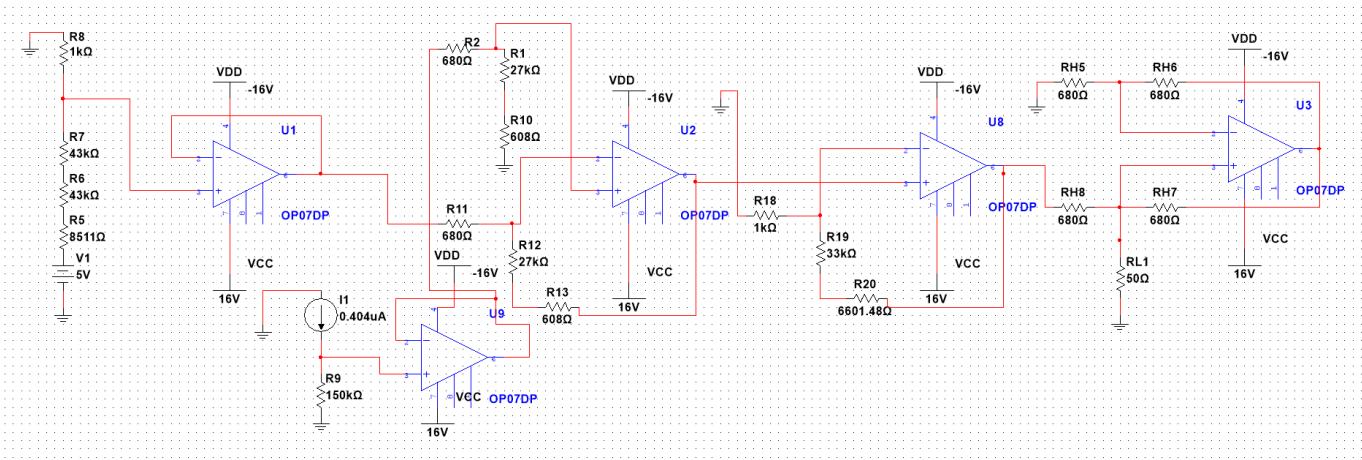
Thiết kế nguồn 1mA: Ta cần  $I = \frac{V_1}{R_{H1}}$ , Chọn  $V_1 = 5V$ .

$$\text{Ta có } V_{o2} = R_M \left( 1 + \frac{R_2}{R_1} \right) \cdot (I_P + 1)$$

$$I_{\text{output}} = \frac{R_M \left( 1 + \frac{R_2}{R_1} \right)}{R_{H5}} (I_P + 1)$$

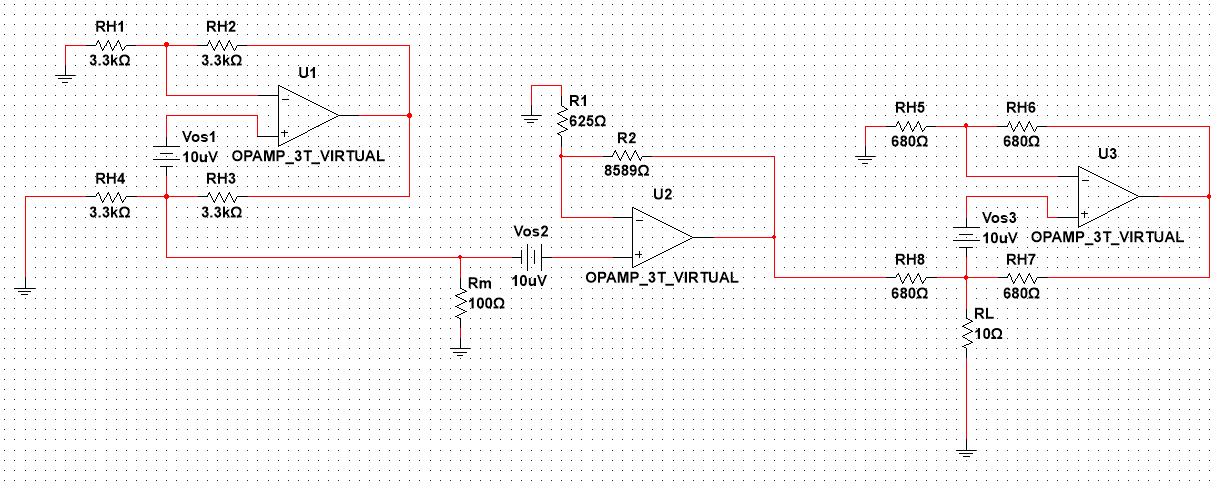
$$\frac{R_M \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)}{R_{H5}} = 2.168$$

$$\rightarrow R_{H5} = R_{H6} = R_{H7} = R_{H8} = 680\Omega; R_1 = R_{12} = 27k\Omega; R_2 = R_{11} = R_{13} = 680\Omega$$



### 2.3.3 Tính toán giá trị sai số khi thiết kế mạch

Xét ảnh hưởng của sai số  $V_{os}$  trong Opamp:



$$\text{Ta có: } \frac{-V^-}{R_{H1}} = \frac{V^- - V_{O1}}{R_{H2}} \rightarrow V_{O1} = R_{H2} \cdot \left( \frac{1}{R_{H1}} + \frac{1}{R_{H2}} \right) \cdot V^- = 2V^-$$

$$\text{Hơn nữa: } \frac{-V_{RM}}{R_{H4}} = \frac{V_{RM} - V_{O1}}{R_{H3}} + \frac{V_{RM}}{R_M} \rightarrow V_{O1} = R_{H3} \cdot \left( \frac{1}{R_{H3}} + \frac{1}{R_{H4}} + \frac{1}{R_M} \right) \cdot V_{RM} = 35V_{RM}$$

$$\rightarrow V^- = \frac{35}{2} V_{RM}$$

$$\text{Với: } V^+ - V_{RM} = V_{os1}$$

$$\rightarrow V_{RM} = \frac{2}{33} V_{os1}$$

$$\rightarrow V^+ = \frac{2}{33} V_{os1} + V_{os2}$$

$$\text{Ta có: } \frac{-V^-}{R_1} = \frac{V^- - V_{O2}}{R_2} \rightarrow V_{O2} = R_2 \cdot \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \cdot V^- = \frac{9214}{625} \left( \frac{2}{33} V_{os1} + V_{os2} \right)$$

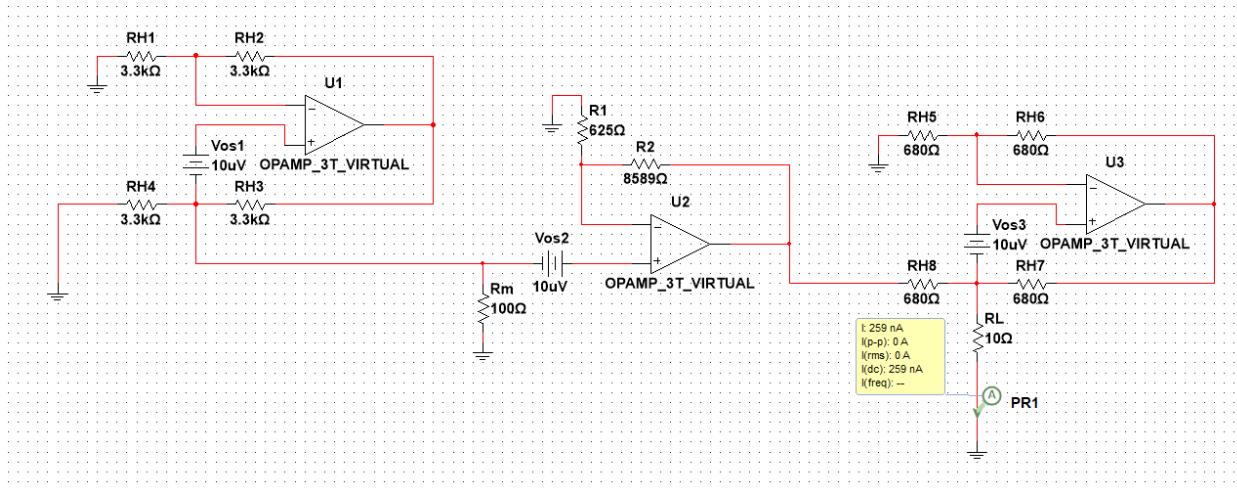
$$\text{Ta có: } \frac{-V^-}{R_{H5}} = \frac{V^- - V_{O3}}{R_{H6}} \rightarrow V_{O3} = R_{H6} \cdot \left( \frac{1}{R_{H6}} + \frac{1}{R_{H5}} \right) \cdot V^- = 2V^- = 2(V_{os3} + V_{RL})$$

$$\text{Hơn nữa: } \frac{V_{O2} - V_{RL}}{R_{H8}} = \frac{V_{RL} - 2(V_{os3} + V_{RL})}{R_{H7}} + \frac{V_{RL}}{R_L}$$

$$\rightarrow I_{output} = \frac{V_{RL}}{R_L} = \frac{V_{O2}}{R_{H8}} + 2 \cdot \frac{V_{os3}}{R_{H7}} = \frac{271}{12500} \left( \frac{2}{33} V_{os1} + V_{os2} \right) + \frac{1}{340} V_{os3}$$

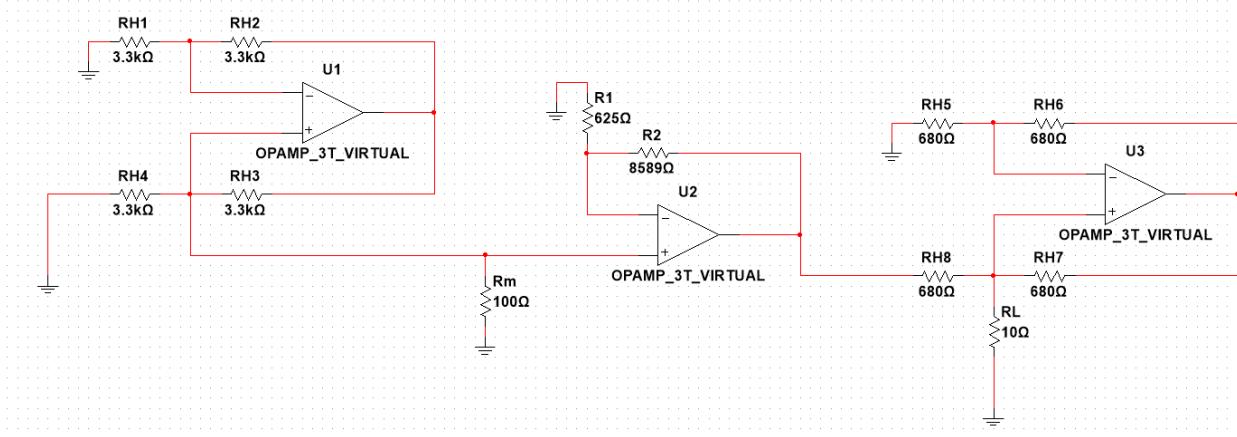
$$\text{Ảnh hưởng của } V_{os} \text{ ta có: } I_{output} = \frac{271}{12500} \left( \frac{2}{33} V_{os1} + V_{os2} \right) + \frac{1}{340} V_{os3}$$

Kiểm chứng mô phỏng: giả định  $V_{os} = V_{os1} = V_{os2} = V_{os3} = 10\mu V \rightarrow I_{output} = 259.35nA$



Nhận xét: Kết quả tính toán giống với mô phỏng

Xét ảnh hưởng của sai số  $I_{os}$ ,  $I_{ib}$  trong Opamp:



$$\text{Ta có: } \frac{-V^-}{R_{H1}} = \frac{V^- - V_{O1}}{R_{H2}} + I_1^-(1)$$

$$\frac{-V^+}{R_{H4}} = \frac{V^+ - V_{O1}}{R_{H3}} + I_1^+ + \frac{V_{RM}}{R_M} + I_2^+ \quad (2)$$

$$\text{Lấy (2) - (1) ta có: } V_{RM} = (I_1^- - I_1^+ - I_2^+) \cdot R_M$$

$$\text{Ta có: } \frac{-V^-}{R_1} = \frac{V^- - V_{O2}}{R_2} + I_2^- \rightarrow V_{O2} = R_2 \cdot I_2^- + R_2 \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) R_M (I_1^- - I_1^+ - I_2^+)$$

$$\text{Ta có: } \frac{-V^-}{R_{H5}} = \frac{V^- - V_{O1}}{R_{H6}} + I_3^- \quad (3)$$

$$\frac{V_{O2} - V^+}{R_{H8}} = \frac{V^+ - V_{O1}}{R_{H7}} + I_3^+ + \frac{V_{RL}}{R_L} \quad (4)$$

Lấy (4) - (3) ta có:

$$I_{\text{output}} = \frac{V_{O2}}{R_{H8}} + I_3^- - I_3^+ = \frac{R_2 \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) R_M}{R_{H8}} \cdot (I_1^- - I_1^+) + \frac{R_2 \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) R_M}{R_{H8}} \cdot (-I_2^+) + \frac{R_2}{R_{H8}} I_2^- + I_3^- - I_3^+$$

Ảnh hưởng của  $I_{os}$ ,  $I_{ib}$  ta có:

$$I_{\text{output}} = \frac{271}{125}(I_1^- - I_1^+) + \frac{271}{125}(-I_2^+) + \frac{8589}{680}I_2^- + I_3^- - I_3^+$$

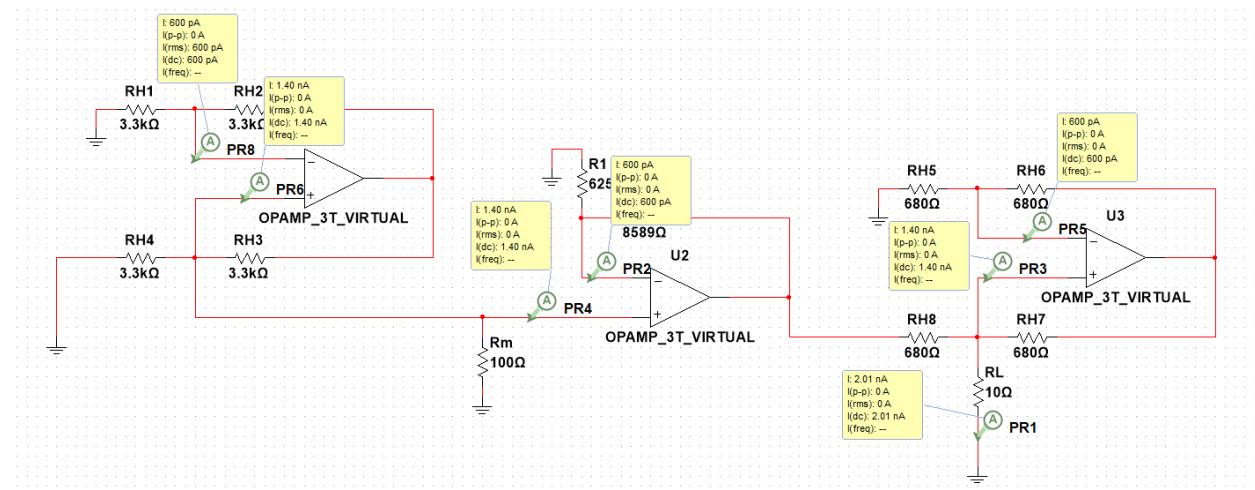
Kiểm tra với phần mềm mô phỏng, do phần mềm mô phỏng luôn chọn giá trị sao cho ảnh hưởng là bé nhất nên ta sẽ coi dòng nhỏ nhất theo mô phỏng rồi kiểm tra xem giống không.

Với  $I_{\text{os}} = 0.8\text{nA}$ ,  $I_{\text{ib}} = 1\text{nA}$

Với  $I_{\text{ib}} = \frac{I^+ + I^-}{2} = 1\text{nA}$  và  $I_{\text{io}} = |I^+ - I^-| = 0.8\text{nA}$

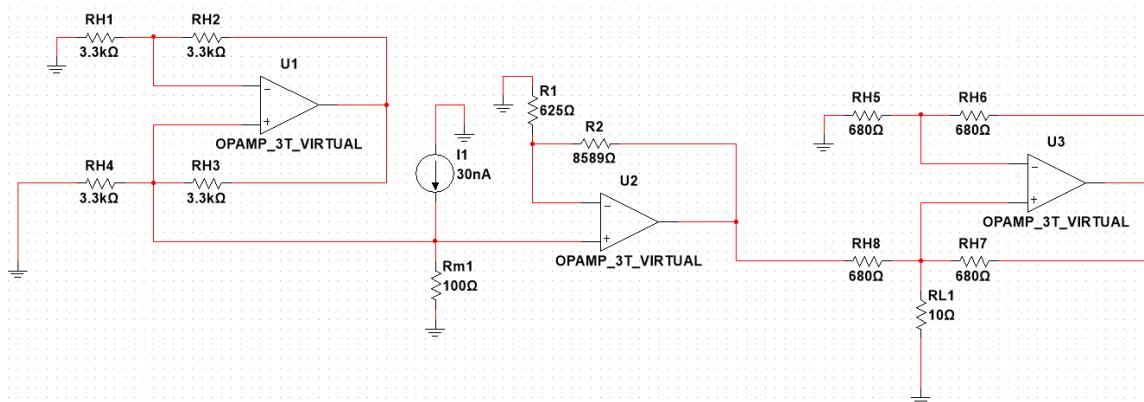
$\rightarrow I^+ = 1.4\text{nA}$ ;  $I^- = 0.6\text{nA}$  hoặc  $I^+ = 0.6\text{nA}$ ;  $I^- = 1.4\text{nA}$

Với  $I_1^+ = I_2^+ = I_3^+ = 1.4\text{nA}$  và  $I_1^- = I_2^- = I_3^- = 0.6\text{nA} \rightarrow I_{\text{output}} = 2.0089\text{nA}$



Nhận xét: Kết quả tính toán giống với mô phỏng

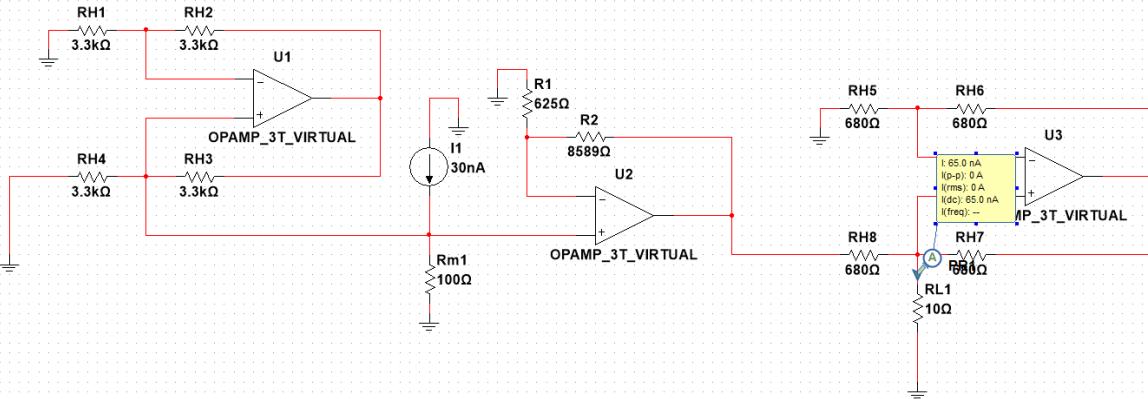
Ta xét ảnh hưởng của dark current khi ánh sáng không đủ mạnh:



Theo datasheet: reverse dark current là 30nA:

Xét  $I_{\text{dark}} = 30\text{nA}$

$$I_{\text{output,dark}} = 2.168I_{\text{dark}} = 65.09\text{nA}$$



Nhận xét: Kết quả tính toán giống với mô phỏng

### 2.3.4 Nhận xét kết quả thiết kế mạch và lựa chọn linh kiện

Tổng ảnh hưởng của sai số là:

$$\frac{271}{12500} \left( \frac{2}{33} V_{os1} + V_{os2} \right) + \frac{1}{340} V_{os3} + \frac{271}{125} (I_1^- - I_1^+) + \frac{271}{125} (-I_2^+) + \frac{8589}{680} I_2^- + I_3^- - I_3^+ +$$

$I_{output,dark}$

(đạt giá trị lớn nhất khi  $V_{os1}, V_{os2}, V_{os3} > 0$ ;  $I_1^- > I_1^+ > 0$ ;  $I_2^- > I_2^+ > 0$ ;  $I_3^- > I_3^+ > 0$ )

Sai số không được vượt quá  $\pm 5\%$  → Tối đa là 0.2mA

Ta chọn Opamp OP07DP vì giá rẻ, input voltage đầu vào lớn  $\pm 14V$  là lựa chọn tốt hơn vì mạch có ngõ ra khuếch đại khá lớn và mạch V-I có giới hạn về tải.

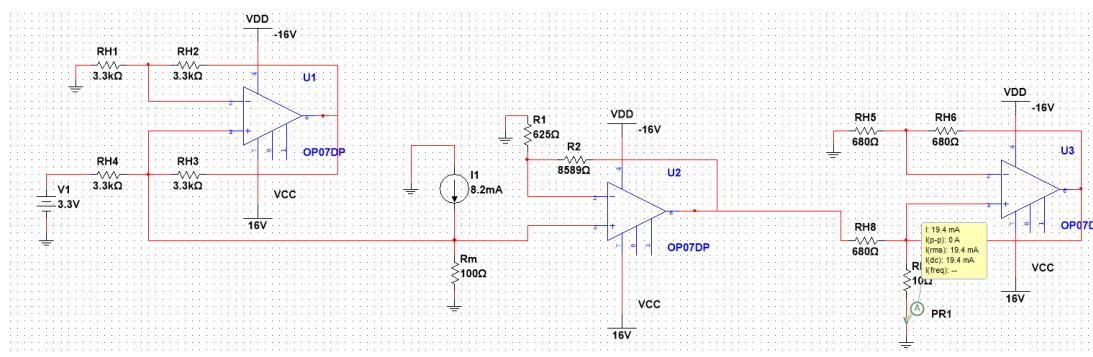
OP07DP có  $V_{os} = 150\mu V$ ;  $I_{os} = 8nA$ ;  $I_{ib} = 14nA$

$\rightarrow I^+ = 18nA$ ;  $I^- = 10nA$  hoặc  $I^+ = 10nA$ ;  $I^- = 18nA$

$\rightarrow I_{output} = 0.0042mA$  (thỏa)

Ta cấp nguồn  $\pm 16V$  cho OPAMP tức ta có:  $-8V < V_L < 8V$

Ở mạch Howland Current Source đầu ra:  $0 < R_L < 400\Omega$



Nhận xét: Kết quả tính toán mạch khi áp dụng OPAMP của phần mềm có sai lệch số giá trị sai lệch này bé hơn mức 5% và nhận định của nhóm sai số này xảy ra do thiết kế của linh kiện trong phần mềm khác với datasheet.

## Chương 3: Thiết kế và mô phỏng mạch đọc dòng vào ADC, lựa chọn ADC và đánh giá độ phân giải

### 3.1 Thiết kế mạch đọc ADC từ nguồn dòng đã thiết kế

#### 3.1.1 Thiết kế mạch đọc ADC theo yêu cầu đề bài

Ta có độ phân giải  $5 \text{ mW/cm}^2$  ứng với  $\Delta I_P = 0.41 \text{ mA} \rightarrow \Delta I_{\text{output}} = 0.89 \text{ mA}$

Vậy khi độ phân giải tăng giảm  $5 \text{ mW/cm}^2$  ứng với  $I_{\text{output}}$  tăng giảm tương ứng  $0.89 \text{ mA}$

Ta chọn bộ ADC với khoảng  $0 - 5V$

Ta muốn sao cho ta dùng hết khoảng  $0 - 5V$  tức  $0V$  sẽ ứng với  $4mA$  và  $5V$  ứng với  $20mA$

Ta có:  $\frac{R_{S2} \cdot R_L}{R_{S1}} \cdot (0.02 - 0.004) = 5 \rightarrow \frac{R_{S2} \cdot R_L}{R_{S1}} = \frac{625}{2}$  (Ta dùng bộ trừ để đưa  $4mA$  ứng với  $0V$ )

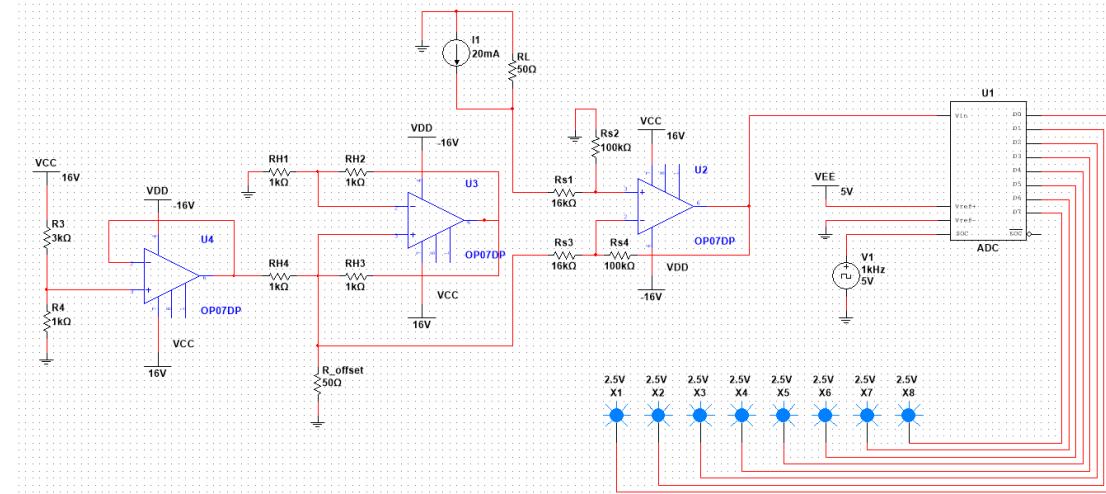
Ta có:  $\Delta \text{diff} = \frac{5}{2^b} - \frac{625}{2} \cdot \Delta I_{\text{output}}$

| Số bit | $\Delta \text{diff}$ |
|--------|----------------------|
| 2      | 0.97                 |
| 3      | 0.35                 |
| 4      | 0.03                 |
| 5      | -0.12                |
| 6      | -0.2                 |

Ta cần chọn tối thiểu 5 bit, nhưng ta xài mạch ADC 8 bit sẵn có:

Chọn  $R_L = 50\Omega$ ;  $R_{S2} = 100k\Omega$ ;  $R_{S1} = 16k\Omega$

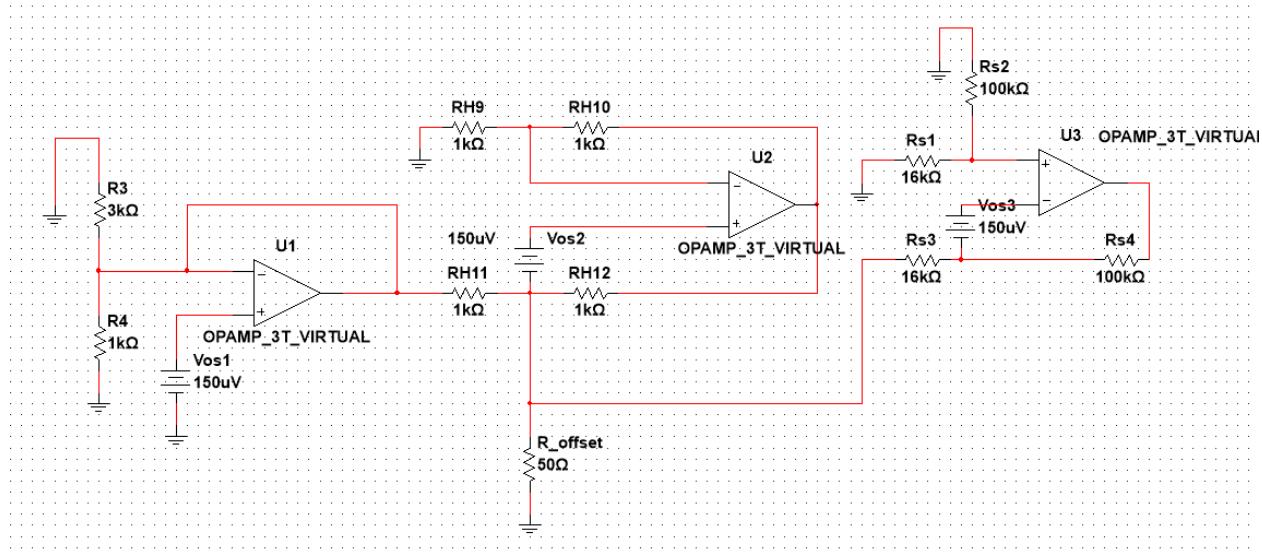
Để thiết kế ra một bộ  $4mA$  để bù trừ phần offset cho  $4mA$  gốc thì ta dùng mạch Howland dùng 4 trở  $1k\Omega$ . Trong thực tế sẽ không kiểm được một nguồn  $4V$  vì thế ta dùng chia áp kết hợp với một mạch buffer. Ta lựa chọn  $R_3 = 3k\Omega$ ;  $R_4 = 1k\Omega$



|    | Ee(Wm/cm2) | I(mA)   | V_IN   | ADC(8bit,Decimal) |
|----|------------|---------|--------|-------------------|
| 0  | 10         | 4.0000  | 0.0000 | 0                 |
| 1  | 15         | 4.8888  | 0.2778 | 14                |
| 2  | 20         | 5.7776  | 0.5555 | 28                |
| 3  | 25         | 6.6664  | 0.8333 | 42                |
| 4  | 30         | 7.5552  | 1.1110 | 56                |
| 5  | 35         | 8.4440  | 1.3888 | 70                |
| 6  | 40         | 9.3328  | 1.6665 | 84                |
| 7  | 45         | 10.2216 | 1.9443 | 99                |
| 8  | 50         | 11.1104 | 2.2220 | 113               |
| 9  | 55         | 11.9992 | 2.4998 | 127               |
| 10 | 60         | 12.8880 | 2.7775 | 141               |
| 11 | 65         | 13.7768 | 3.0553 | 155               |
| 12 | 70         | 14.6656 | 3.3330 | 169               |
| 13 | 75         | 15.5544 | 3.6108 | 184               |
| 14 | 80         | 16.4432 | 3.8885 | 198               |
| 15 | 85         | 17.3320 | 4.1663 | 212               |
| 16 | 90         | 18.2208 | 4.4440 | 226               |
| 17 | 95         | 19.1096 | 4.7218 | 240               |
| 18 | 100        | 19.9984 | 4.9995 | 254               |

### 3.1.2 Tính toán sai số của mạch

Xét ảnh hưởng sai số bởi  $V_{OS}$

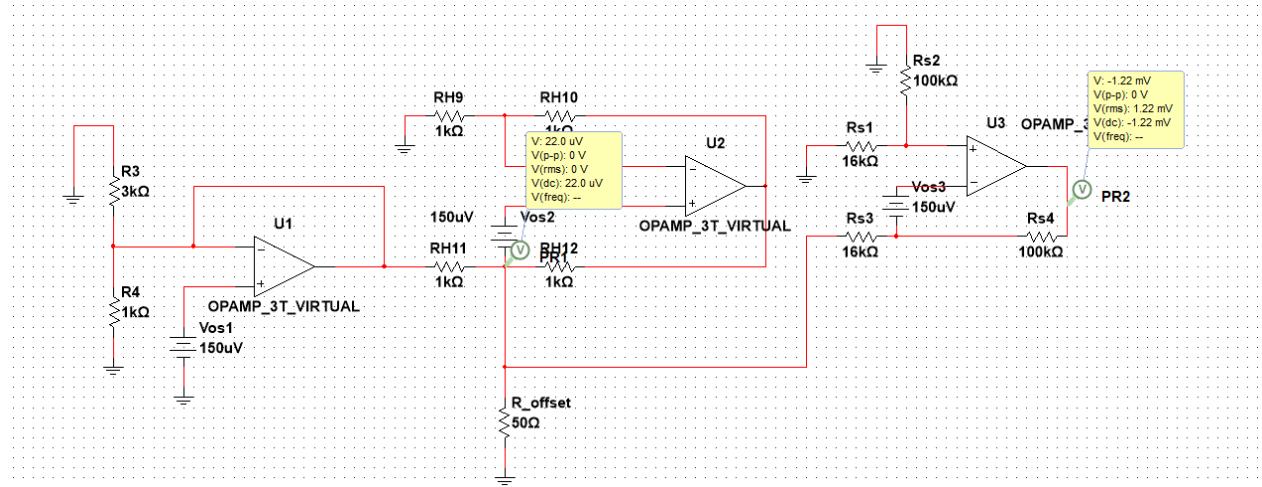


Ta có  $V^- = V_{os1}$

$$\text{Lại có: } \frac{-V^-}{R_{H9}} = \frac{V^- - V_{O2}}{R_{H10}} \rightarrow V_{O2} = R_{H10} \cdot \left( \frac{1}{R_{H9}} + \frac{1}{R_{H10}} \right) \cdot V^- = 2V^- = 2 \cdot (V_{os2} + V_{R\_offset})$$

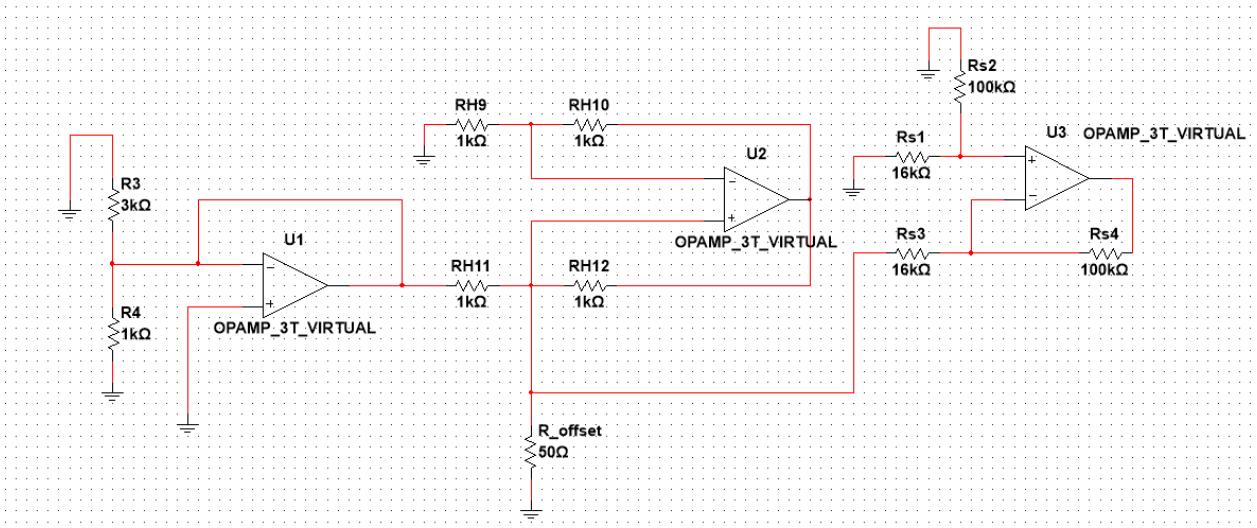
$$\text{Hơn nữa: } \frac{V_{os1} - V_{R\_offset}}{R_{H11}} = \frac{V_{R\_offset} - 2(V_{os2} + V_{R\_offset})}{R_{H12}} + \frac{V_{R\_offset}}{R_{offset}} + \frac{V_{R\_offset} + 150\mu V}{R_{S3} + R_{S4}} \rightarrow V_{R\_offset} = 22\mu V$$

$$\text{Ta có: } \frac{V_{R\_offset} - V_{O3}}{R_{S3} + R_{S4}} = \frac{-V_{os3} - V_{O3}}{R_{S4}} \rightarrow V_{O3} = -1.22\text{mV}$$



Nhận xét: Kết quả tính toán giống với mô phỏng

Xét ảnh hưởng sai số bởi  $I_{os}, I_{ib}$ :



$$\text{Ta có: } \frac{-V^-}{R_{H9}} = \frac{V^- - V_{O2}}{R_{H10}} + I_2^-(1)$$

$$\frac{-V^+}{R_{H11}} = \frac{V^+ - V_{O2}}{R_{H12}} + I_2^+ + \frac{V_{R_{\text{offset}}} + I_3^+ \cdot \frac{R_{S1} \cdot R_{S2}}{R_{S1} + R_{S2}}}{R_{S3}} \quad (2)$$

$$\text{Lấy (2) - (1), suy ra: } I_2^+ + \frac{V_{R_{\text{offset}}}}{R_{\text{offset}}} + \frac{V_{R_{\text{offset}}} + I_3^+ \cdot \frac{R_{S1} \cdot R_{S2}}{R_{S1} + R_{S2}}}{R_{S3}} - I_2^- = 0$$

$$\rightarrow V_{R_{\text{offset}}} = \frac{-I_3^+ \cdot \frac{R_{S1} \cdot R_{S2}}{R_{S1} + R_{S2}}}{\left( \frac{1}{R_{\text{offset}}} + \frac{1}{R_{S3}} \right)} = -42.97I_3^+ + 49.84(-I_2^+ + I_2^-)$$

$$\text{Ta có: } \frac{-I_3^+ \cdot \frac{R_{S1} \cdot R_{S2}}{R_{S1} + R_{S2}} - V_{O3}}{R_{S4}} + I_3^- = \frac{V_{R_{\text{offset}}} + I_3^+ \cdot \frac{R_{S1} \cdot R_{S2}}{R_{S1} + R_{S2}}}{R_{S3}}$$

$$\rightarrow I_2^+ + \frac{42.97I_3^+ + 49.84(-I_2^+ + I_2^-)}{R_{\text{offset}}} + \frac{-I_3^+ \cdot \frac{R_{S1} \cdot R_{S2}}{R_{S1} + R_{S2}} - V_{O3}}{R_{S4}} + I_3^- - I_2^- = 0$$

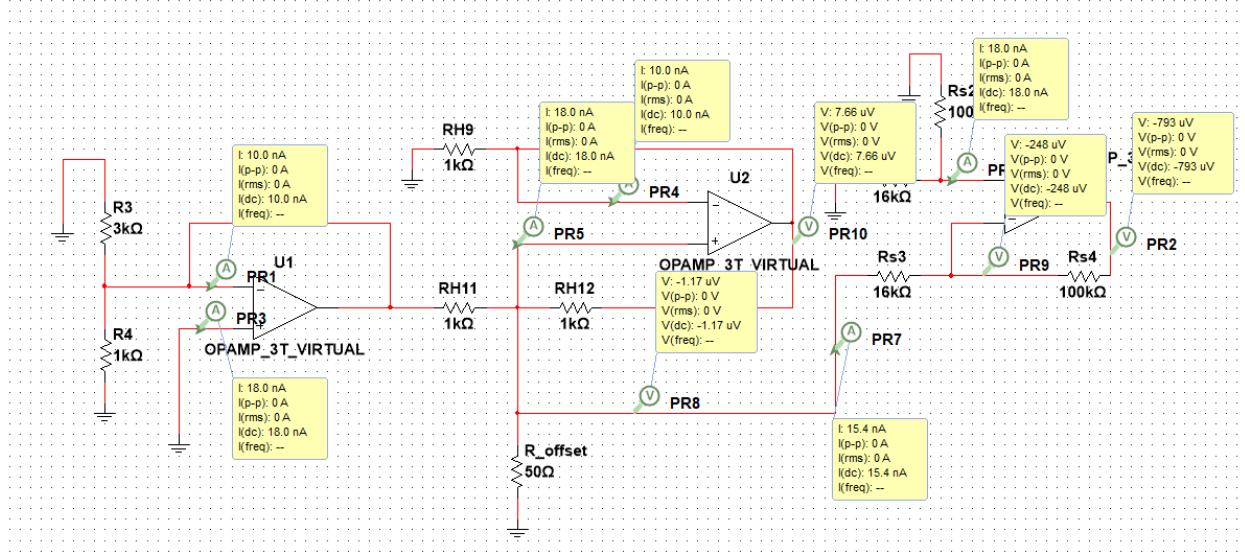
$$V_{O3} = R_{S4} \cdot \left( I_2^+ + \frac{-42.97I_3^+ + 49.84(-I_2^+ + I_2^-)}{R_{\text{offset}}} + \frac{-I_3^+ \cdot \frac{R_{S1} \cdot R_{S2}}{R_{S1} + R_{S2}} + I_3^- - I_2^-}{R_{S4}} \right)$$

$$V_{O3} = R_{S4} \cdot \left( I_2^+ + \frac{\frac{2}{625}(I_2^+ - I_2^-) + I_3^-}{R_{\text{offset}}} + \frac{-I_3^+ \cdot \frac{R_{S1} \cdot R_{S2}}{R_{S1} + R_{S2}} + I_3^- - I_2^-}{R_{S4}} \right) = R_{S4} \cdot \left( -0.997I_3^+ + \frac{\frac{2}{625}(I_2^+ - I_2^-) + I_3^-}{R_{\text{offset}}} + \frac{-I_3^+ \cdot \frac{R_{S1} \cdot R_{S2}}{R_{S1} + R_{S2}} + I_3^- - I_2^-}{R_{S4}} \right)$$

Do mô phỏng lựa chọn trường hợp khác với tính toán nên ta sẽ lấy giá trị dòng theo mô phỏng để kiểm chứng:

$$V_{O3} = R_{S4} \cdot \left( -0.997I_3^+ + \frac{\frac{2}{625}(I_2^+ - I_2^-) + I_3^-}{R_{\text{offset}}} + \frac{-I_3^+ \cdot \frac{R_{S1} \cdot R_{S2}}{R_{S1} + R_{S2}} + I_3^- - I_2^-}{R_{S4}} \right) = -792.04 \mu V$$

Nhận xét: Kết quả tính toán giống với mô phỏng



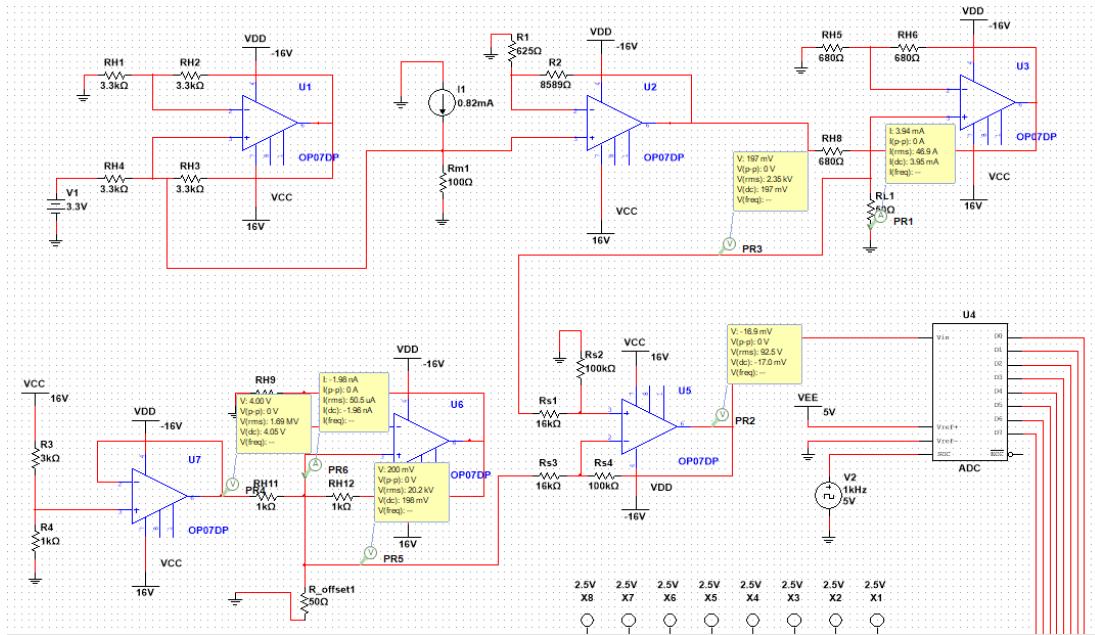
Nhận xét: Kết quả tính toán giống với mô phỏng

Tính theo trường hợp sai số lớn nhất sẽ là:  $V_{O3} = R_{S4} \cdot \left( -0.997I_3^+ + \frac{2}{625}(I_2^+ - I_2^-) + I_3^- \right) = 0.81mV$

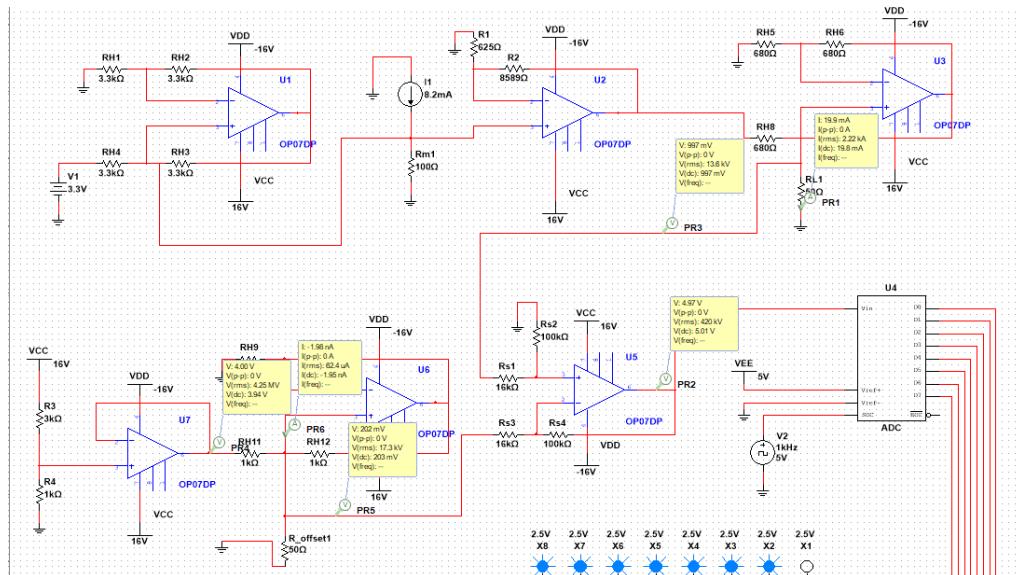
Tổng sai số ảnh hưởng khi xét  $I_{os}$ ,  $I_{ib}$  và  $V_{OS}$  là  $2.03mV \rightarrow Q = \frac{5}{2^8} = 19mV$ .

Suy ra ảnh hưởng sai số này không đủ để làm thay đổi sang mức khác

### 3.2. Nhận xét kết quả tính toán



Có thể thấy ở dòng 4mA mức điện áp lúc này không hoàn toàn gần 0 mà có một khoảng offset nhất định là 16.9mV theo ảnh hưởng đã nói ở trước do mô hình của OPAMP trong phần mềm. Nhưng lúc này vẫn chưa vượt qua mức để chuyển lên nên trường hợp này chưa sai.



Có thể thấy ở dòng 20mA mức điện áp lúc này đã ảnh hưởng đến mạch khi đầu ra lúc này không được là 5V nên ứng với bảng số liệu giá trị lúc này là 1111 1110.

## **TÀI LIỆU THAM KHẢO**

[1] Vishay Semiconductors, BPW34 Silicon PIN Photodiode Datasheet, Available:  
<https://www.vishay.com/docs/81521/bpw34.pdf>

[2] Nguyễn Trung Hiếu, tài liệu nội bộ, hệ thống LMS, Trường Đại học Bách Khoa  
TP.HCM, 2025.