

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный Исследовательский Университет ИТМО»



ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №6
ПРЕДМЕТ «ЭЛЕКТРОННЫЕ УСТРОЙСТВА СИСТЕМ
УПРАВЛЕНИЯ»
ТЕМА «ИСТОЧНИКИ ТОКА»

Преподаватель:
Жданов В. А.

Выполнил:
Румянцев А. А.

Факультет: СУиР
Группа: R3341
Поток: ЭлУСУ R22 бак 1.2

Санкт-Петербург
2025

Содержание

1	Цель работы	2
2	Исследование токового зеркала с компенсацией теплового дрейфа	2
2.1	Расчет параметров схемы	2
2.2	Схема токового зеркала с компенсацией теплового дрейфа	3
2.3	Зависимость тока через нагрузку от напряжения на нагрузке	3
2.4	Зависимость тока через нагрузку и тока на токозадающем устройстве от напряжения питания	3
2.5	Ток через нагрузку при различных сопротивлениях нагрузки	4
3	Исследование токового зеркала Уилсона	5
3.1	Расчет параметров схемы	5
3.2	Схема токового зеркала Уилсона	6
3.3	Зависимость тока через нагрузку от напряжения на нагрузке	6
3.4	Зависимость тока через нагрузку и тока на токозадающем устройстве от напряжения питания	7
3.5	Ток через нагрузку при различных сопротивлениях нагрузки	7
4	Исследование генератора тока на ОУ	9
4.1	Расчет параметров схемы	9
4.2	Схема генератора тока на ОУ	9
4.3	Зависимость тока через нагрузку от напряжения на нагрузке	9
4.4	Зависимость тока через нагрузку и тока на токозадающем устройстве от напряжения питания	10
4.5	Ток через нагрузку при различных сопротивлениях нагрузки	10
5	Вывод	12

Цель работы

Цель работы – исследование работы источников тока.

Исследование токового зеркала с компенсацией теплового дрейфа

Расчет параметров схемы

Рассчитаем схему токового зеркала с компенсацией теплового дрейфа. Дан ток нагрузки

$$I_H = 250 \text{ мА}$$

и следующие формулы

$$I_{k1} \approx \frac{E_{\Pi} - 0.7}{R_1 + R_{\text{э}1}}, \quad I_H \approx \frac{R_{\text{э}1} (E_{\Pi} - 0.7)}{R_1 R_{\text{э}2} + R_{\text{э}1} R_{\text{э}2}};$$

В данном случае $I_{k1} = I_{Q2}$, R_1 – токозадающее устройство. Зададим напряжение питания

$$E_{\Pi} = 12 \text{ В}$$

Кремниевые транзисторы обычно имеют напряжение между базой и эмиттером

$$U_{\text{БЭ}} = 0.7 \text{ В}$$

Так как токовое зеркало «копирует» ток через транзистор Q2, то ток через нагрузку должен быть равен эталонному току на транзисторе Q2

$$I_{k1} \approx I_H = 250 \text{ мА}$$

Найдем сумму сопротивлений $R_1 + R_{\text{э}1}$ через формулу для I_{k1}

$$250 \cdot 10^{-3} = \frac{12 - 0.7}{R_1 + R_{\text{э}1}} \Rightarrow R_1 + R_{\text{э}1} = \frac{11.3}{0.25} = 45.2 \text{ Ом}$$

Для уменьшения потерь мощности выберем первый эмиттерный резистор с небольшим номиналом в 10 Ом. Рассчитаем R_1

$$R_{\text{э}1} = 10 \text{ Ом} \Rightarrow R_1 = 45.2 - 10 = 35.2 \text{ Ом}$$

Ближайший стандартный номинал $R_1 \approx 35 \text{ Ом}$. Рассчитаем сопротивление второго эмиттерного резистора $R_{\text{э}2}$ через формулу для I_H

$$250 \cdot 10^{-3} = \frac{10(12 - 0.7)}{35R_{\text{э}2} + 10R_{\text{э}2}} \Rightarrow R_{\text{э}2} = \frac{113}{0.25 \cdot 45} \approx 10.04 \text{ Ом}$$

Возьмем ближайший стандартный номинал $R_{\text{э}2} \approx 10 \text{ Ом}$. Выберем в качестве T1 T2 транзисторов 2N2222 из библиотеки LTspice. Напряжение между коллектором и эмиттером этого транзистора, когда он находится в режиме насыщения, составляет

$$U_{\text{КЭ (нас)}} \approx 0.2 \text{ В}$$

Тогда, определим сопротивление нагрузочного резистора по формуле

$$R_H = \frac{E_{\Pi} - U_{\text{КЭ (нас)}}}{I_H} = \frac{12 - 0.2}{250 \cdot 10^{-3}} = \frac{11.8}{0.25} = 47.2 \text{ Ом}$$

Ближайший стандартный номинал $R_H \approx 47 \text{ Ом}$.

Схема токового зеркала с компенсацией теплового дрейфа

Построим в LTspice одноименную схему. R1 – токозадающее устройство. Транзистор Q1 зеркалит ток на Q2 и выдает его на нагрузку

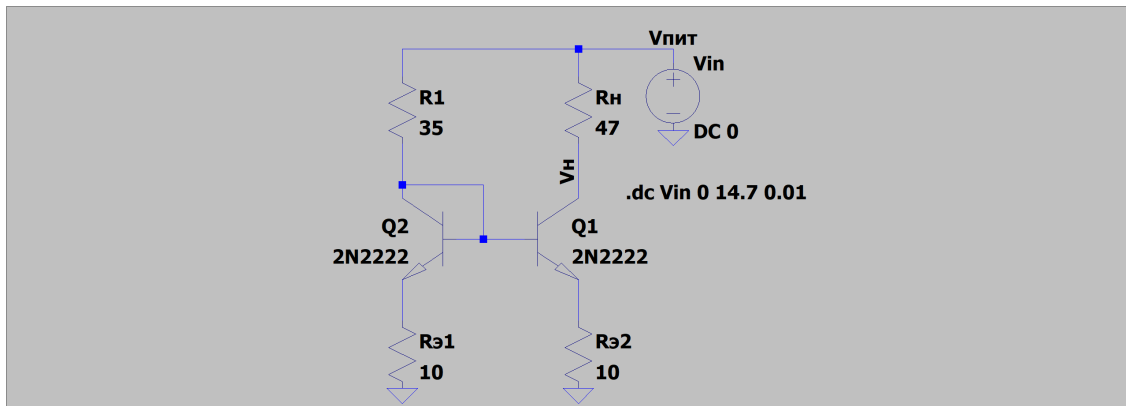


Рис. 1: Схема токового зеркала с компенсацией теплового дрейфа

Зависимость тока через нагрузку от напряжения на нагрузке

Построим график зависимости тока через нагрузку от напряжения на нагрузке. Зададим в источник питания DC 0, поставим на схему .dc Vin 0 14.7 0.01. С помощью net обозначим Vн

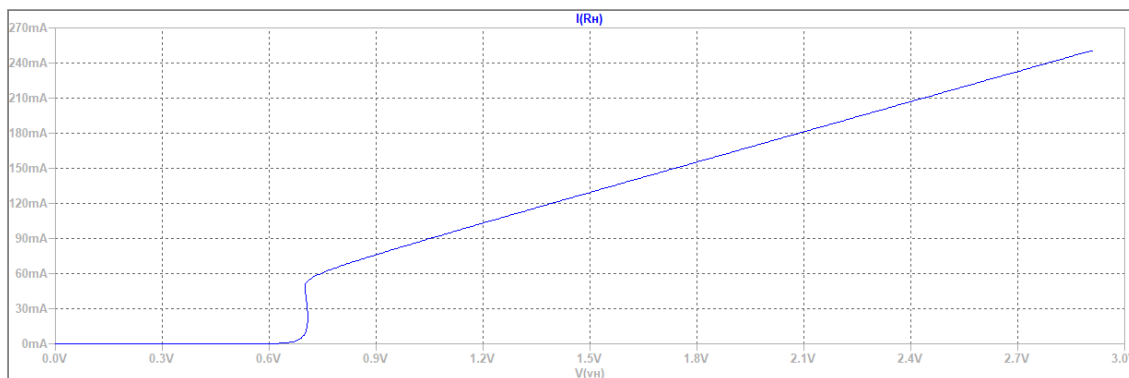


Рис. 2: Зависимость I_H от U_H

Биполярный транзистор начинает проводить только когда между базой и эмиттером набирается напряжение примерно в 0.6–0.7 В. До этого момента оба транзистора в зеркале закрыты – ток не течет.

Зависимость тока через нагрузку и тока на токозадающем устройстве от напряжения питания

Построим график зависимости тока через нагрузку и тока на токозадающем устройстве от напряжения питания. С помощью net обозначим Vпит. Синяя траектория – зависимость тока через нагрузку от напряжения питания, красная – зависимость тока на токозадающем устройстве от напряжения питания

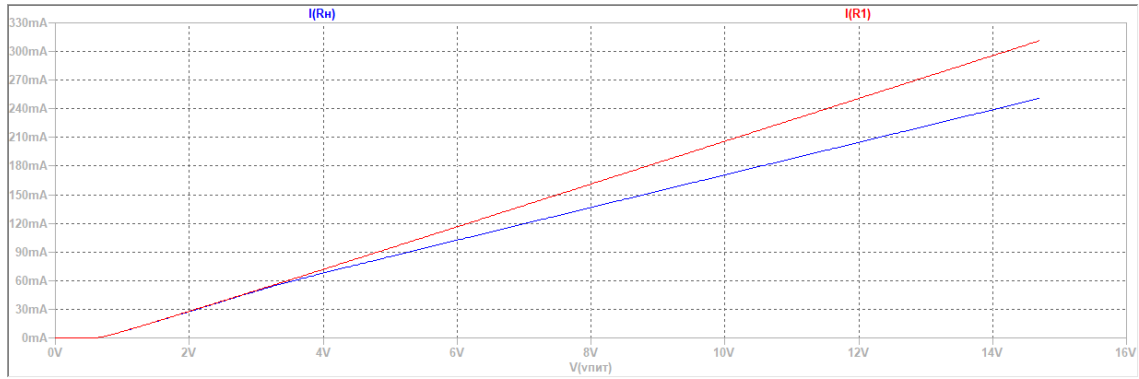


Рис. 3: Зависимости $I_H(U_{\text{пит}})$, $I_{T3}(U_{\text{пит}})$

Токи равны нулю до напряжения в 0.7 В. В идеале траектории должны были совпасть. $I_{T3 \text{ макс}} \approx 312 \text{ мА}$, $I_{H \text{ макс}} \approx 251 \text{ мА}$.

Ток через нагрузку при различных сопротивлениях нагрузки

Построим графики зависимости тока от напряжения питания при различных сопротивлениях нагрузки. Проверим $R_H = 10, 10^2, 10^3, 10^4 \text{ Ом}$. Красный график – подаваемое напряжение питания, синий – ток нагрузки

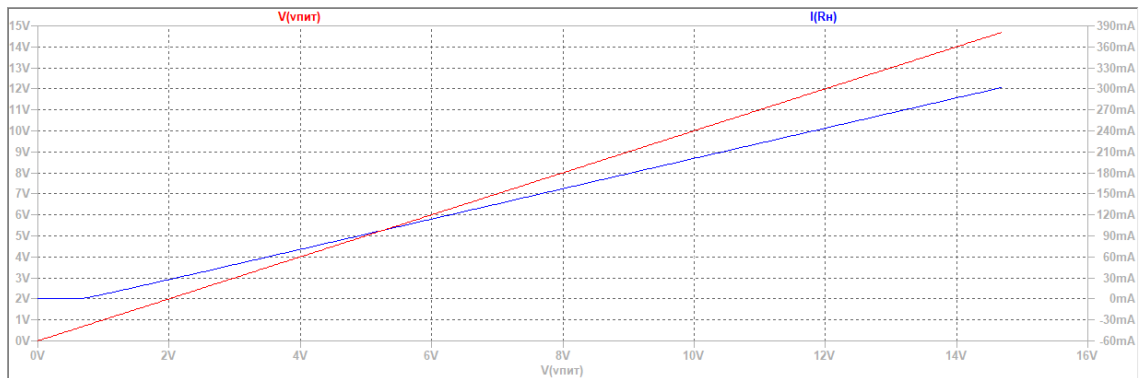


Рис. 4: $I_H(U_{\text{пит}})$ при $R_H = 10 \text{ Ом}$

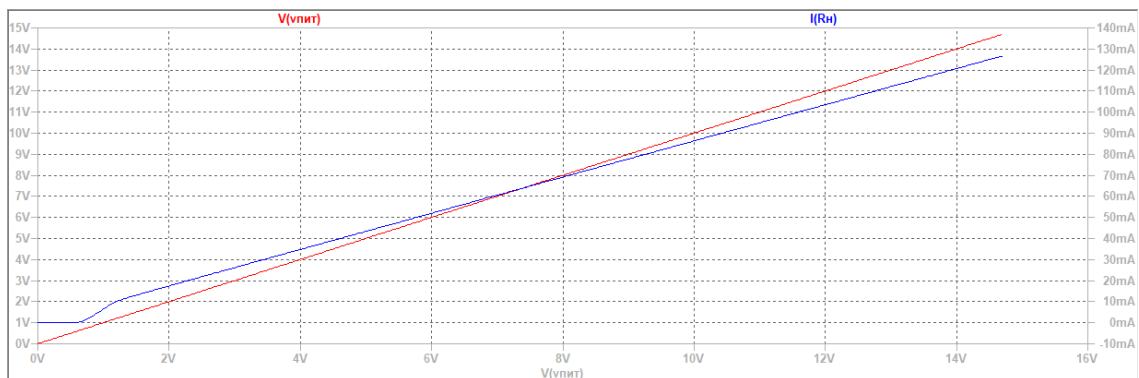


Рис. 5: $I_H(U_{\text{пит}})$ при $R_H = 100 \text{ Ом}$

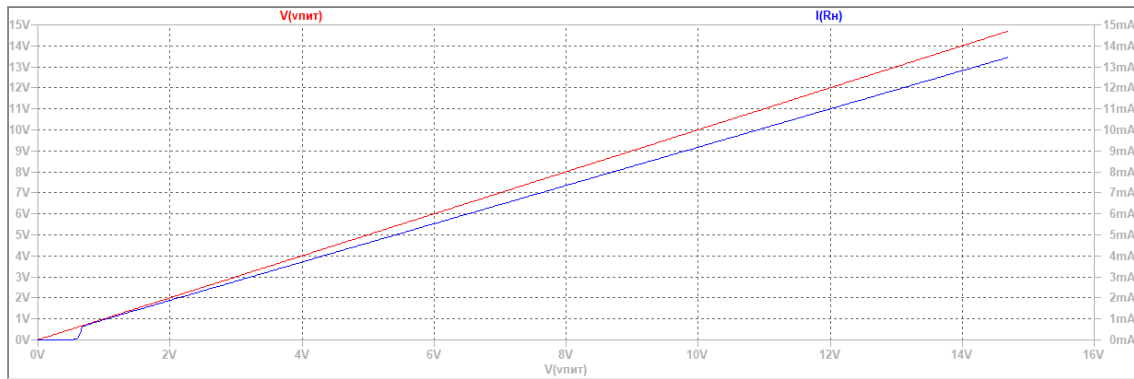


Рис. 6: $I_H(U_{\text{пит}})$ при $R_H = 1000 \text{ Ом}$

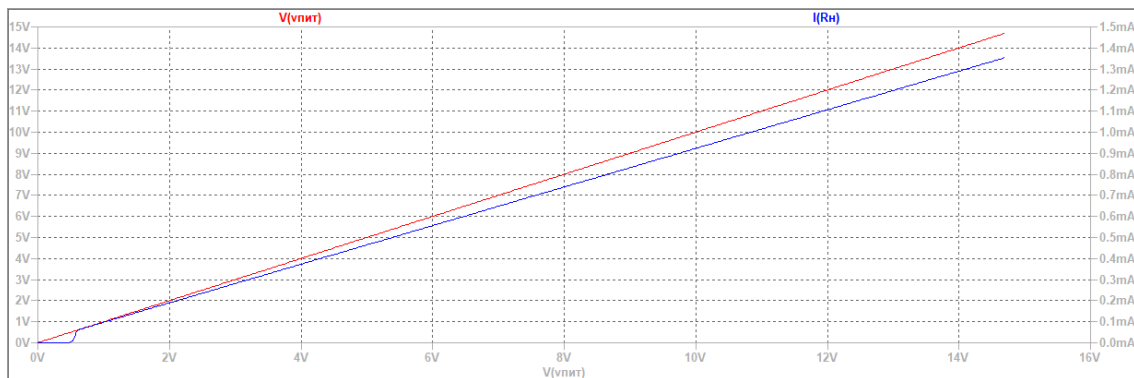


Рис. 7: $I_H(U_{\text{пит}})$ при $R_H = 10000 \text{ Ом}$

При увеличении сопротивления нагрузки ток нагрузки уменьшается – токовое зеркало не может создать нужный ток, не хватает напряжения питания.

Исследование токового зеркала Уилсона

Расчет параметров схемы

Рассчитаем схему токового зеркала Уилсона. Дан ток нагрузки

$$I_H = 250 \text{ мА}$$

и следующие формулы

$$I_{k1} \approx \frac{E_{\Pi} - 1.4}{R_1 + R_{\text{э1}}}, \quad I_H \approx \frac{R_{\text{э1}}(E_{\Pi} - 0.7)}{R_1 R_{\text{э2}} + R_{\text{э1}} R_{\text{э2}}};$$

В данном случае $I_{k1} = I_{Q1}$, R_1 – токозадающее устройство. Зададим напряжение питания

$$E_{\Pi} = 12 \text{ В}$$

Эмиттерное напряжение для кремниевого транзистора

$$U_{\text{БЭ}} = 0.7 \text{ В}$$

Ток через нагрузку I_H должен быть равен I_{k1} , так как токовое зеркало копирует ток через транзистор Q1

$$I_{k1} \approx I_H = 250 \text{ мА}$$

Найдем сумму $R_1 + R_{э1}$ из формулы для I_{k1}

$$250 \cdot 10^{-3} = \frac{12 - 1.4}{R_1 + R_{э1}} \Rightarrow R_1 + R_{э1} = \frac{10.6}{0.25} = 42.4 \text{ Ом}$$

Пусть $R_{э1} = 10 \text{ Ом}$, тогда

$$R_1 = 42.4 - 10 = 32.4$$

Возьмем ближайший стандартный номинал $R_1 \approx 33 \text{ Ом}$. Используя формулу для I_H , определим $R_{э2}$

$$250 \cdot 10^{-3} = \frac{10(12 - 0.7)}{33R_{э2} + 10R_{э2}} \Rightarrow R_{э2} = \frac{113}{0.25 \cdot 43} \approx 10.51 \text{ Ом}$$

Возьмем ближайший стандартный номинал $R_{э2} \approx 10 \text{ Ом}$. В качестве транзисторов T1 T2 T3 выберем 2N2222 из библиотеки LTspice. Аналогично имеем

$$U_{КЭ (\text{нас})} \approx 0.2 \text{ В}$$

Тогда, сопротивление на нагрузке

$$R_H = \frac{E_{\Pi} - U_{КЭ (\text{нас})}}{I_H} = \frac{12 - 0.2}{250 \cdot 10^{-3}} = 47.2 \text{ Ом}$$

Ближайший стандартный номинал $R_H \approx 47 \text{ Ом}$.

Схема токового зеркала Уилсона

Построим в LTspice одноименную схему. R1 – токозадающее устройство, Q2 копирует ток Q1. Q3 «компенсирует» базовый ток Q2 и уменьшает ошибку копирования тока

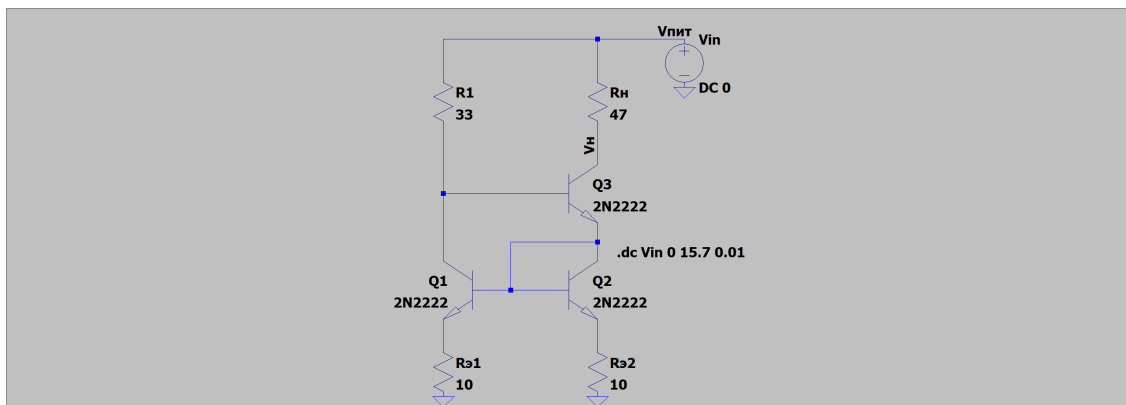


Рис. 8: Схема токового зеркала Уилсона

Зависимость тока через нагрузку от напряжения на нагрузке

Построим график зависимости тока через нагрузку от напряжения на нагрузке. Зададим в источник питания DC 0, поставим на схему `.dc Vin 0 15.7 0.01`. С помощью `net` обозначим V_H

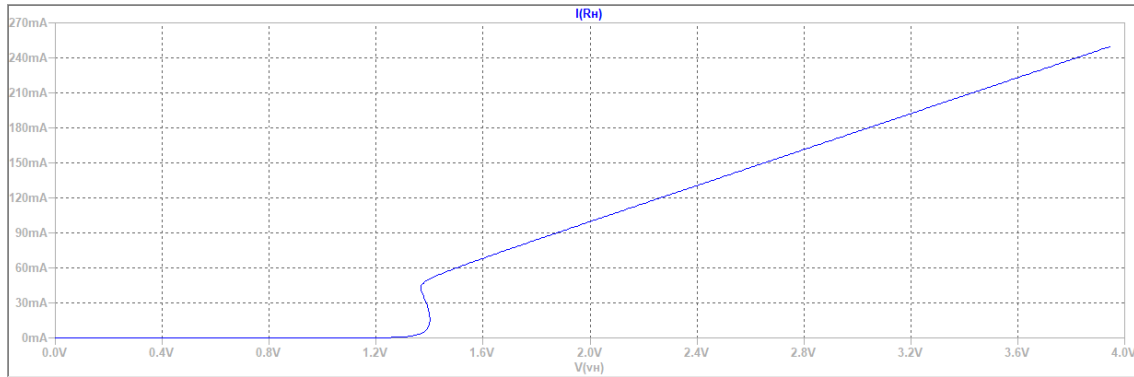


Рис. 9: Зависимость I_N от U_N

Имеем два последовательных перехода база-эмиттер, что дает в сумме падение напряжения на 1.4 В. На графике видим, что транзисторы открываются в районе 1.4 В, до этого момента ток нулевой.

Зависимость тока через нагрузку и тока на токозадающем устройстве от напряжения питания

Построим график зависимости тока через нагрузку и тока на токозадающем устройстве от напряжения питания. С помощью net обозначим $V_{пит}$. Синяя траектория – зависимость тока через нагрузку от напряжения питания, красная – зависимость тока на токозадающем устройстве от напряжения питания

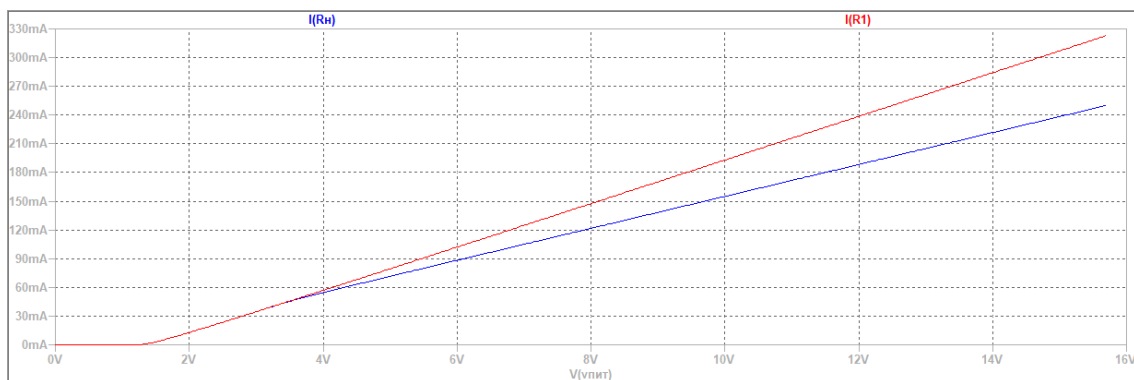


Рис. 10: Зависимости $I_N(U_{пит})$, $I_{T3}(U_{пит})$

До напряжения в 1.4 В транзисторы закрыты, ток нулевой. После они входят в активный режим, ток растет линейно. Максимумы $I_{N \text{ макс}} \approx 251 \text{ мА}$, $I_{T3 \text{ макс}} \approx 323 \text{ мА}$. Для достижения $I_N = 250 \text{ мА}$ потребовалось подать напряжение на 1 В больше, чем в случае с токовым зеркалом с компенсацией теплового дрейфа (больше падение напряжения в цепи).

Ток через нагрузку при различных сопротивлениях нагрузки

Построим графики зависимости тока от напряжения питания при различных сопротивлениях нагрузки. Проверим $R_N = 10, 10^2, 10^3, 10^4 \text{ Ом}$. Красный график – подаваемое напряжение питания, синий – ток нагрузки

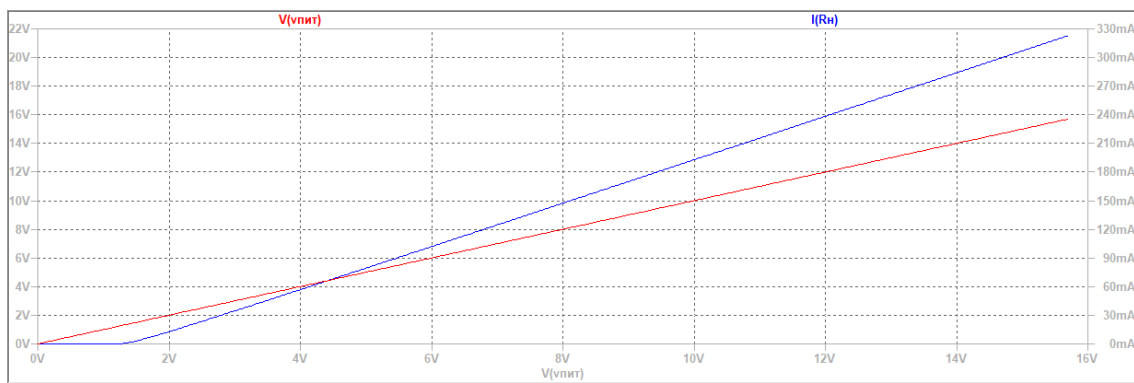


Рис. 11: $I_H(U_{\text{пит}})$ при $R_H = 10 \text{ Ohm}$

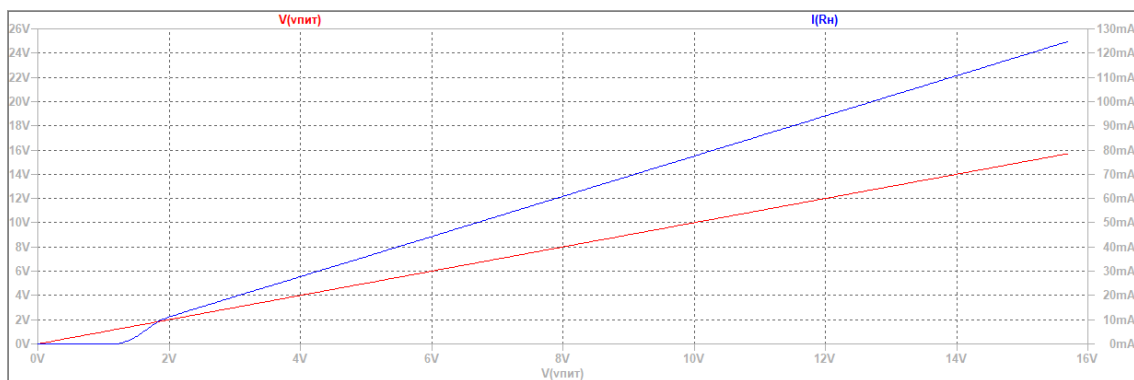


Рис. 12: $I_H(U_{\text{пит}})$ при $R_H = 100 \text{ Ohm}$

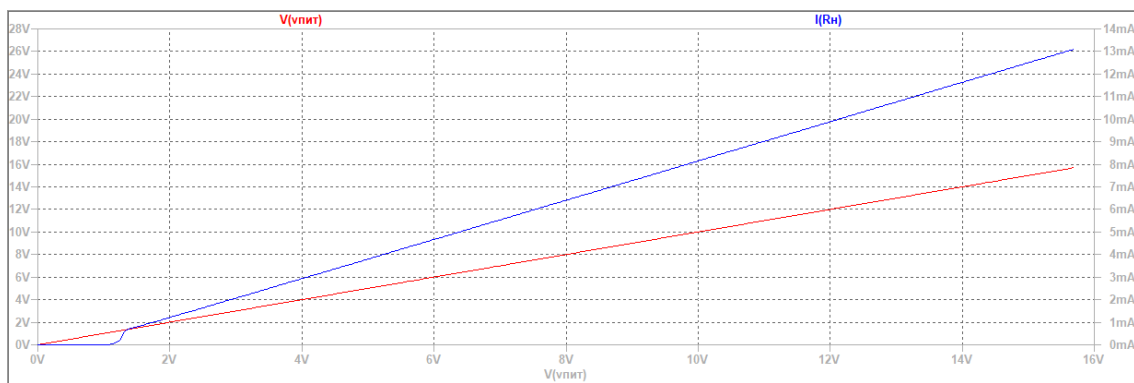


Рис. 13: $I_H(U_{\text{пит}})$ при $R_H = 1000 \text{ Ohm}$

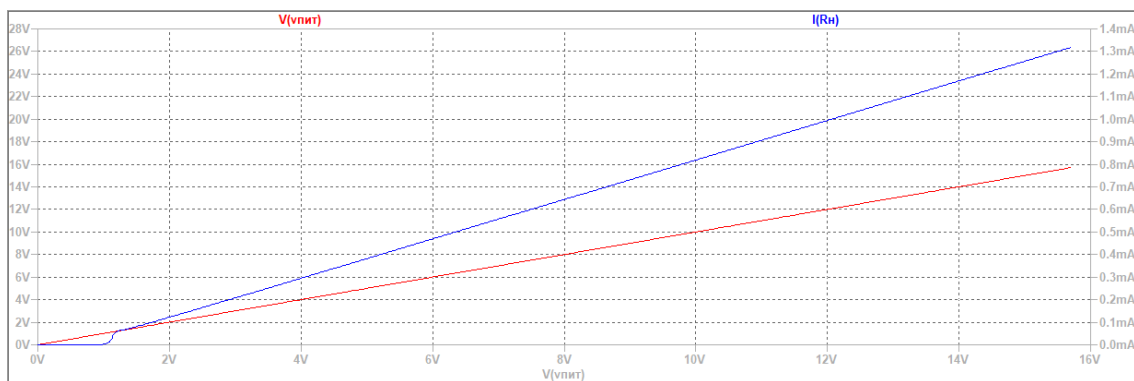


Рис. 14: $I_H(U_{\text{пит}})$ при $R_H = 10000 \text{ Ohm}$

При увеличении сопротивления нагрузки ток нагрузки уменьшается. В сравнении с токовым зеркалом с компенсацией теплового дрейфа падение тока более заметно. Транзистор быстрее уходит в насыщение и не может поддерживать заданный ток – не хватает напряжения.

Исследование генератора тока на ОУ

Расчет параметров схемы

Дано

$$I_H = 250 \text{ мА}, \quad I_H \approx \frac{U_{\text{ВХ}}}{R_1};$$

$U_{\text{ВХ}}$ можно рассматривать как опорное напряжение $U_{\text{ОП}}$ для эмиттера. Зададим

$$U_{\text{ОП}} = 0.7 \text{ В}$$

Тогда, сопротивление R_1

$$R_1 = \frac{U_{\text{ОП}}}{I_H} = \frac{0.7}{0.25} = 2.8 \text{ Ом}$$

Определим сопротивление нагрузки при $E_{\text{П}} = 12 \text{ В}$, $U_{\text{КЭ (нас)}} \approx 0.2 \text{ В}$ (транзистор 2N2222)

$$R_H = \frac{E_{\text{П}} - U_{\text{КЭ (нас)}}}{I_H} = \frac{12 - 0.2}{250 \cdot 10^{-3}} = 47.2 \text{ Ом}$$

Возьмем ближайший стандартный номинал $R_H = 47 \text{ Ом}$.

Схема генератора тока на ОУ

Построим в LTspice одноименную схему. R1 – токозадающее устройство. ОУ задает на R1 нужное напряжение. Через R1 протекает ток, который через эмиттер транзистора превращается в ток через нагрузку R_H

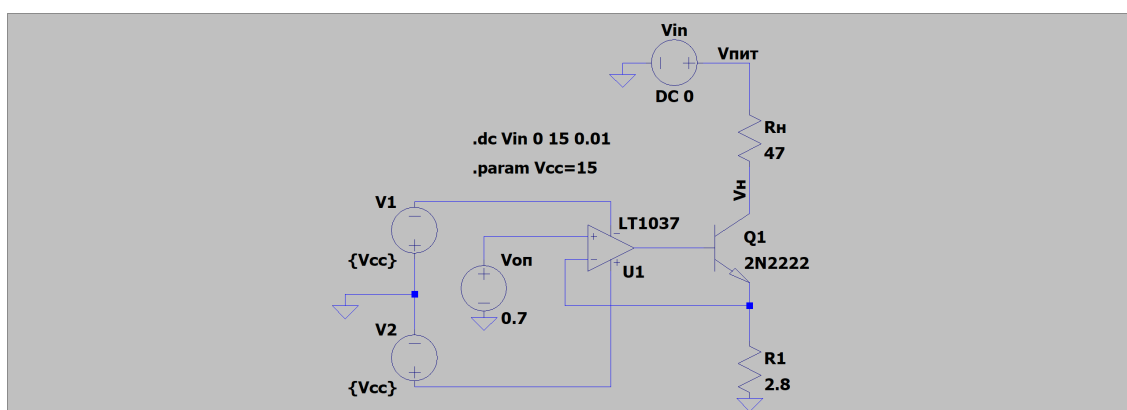


Рис. 15: Схема генератора тока на ОУ

Зависимость тока через нагрузку от напряжения на нагрузке

Построим график зависимости тока через нагрузку от напряжения на нагрузке. Зададим в источник питания DC 0, поставим на схему `.dc Vin 0 15 0.01`. С помощью `net` обозначим V_H

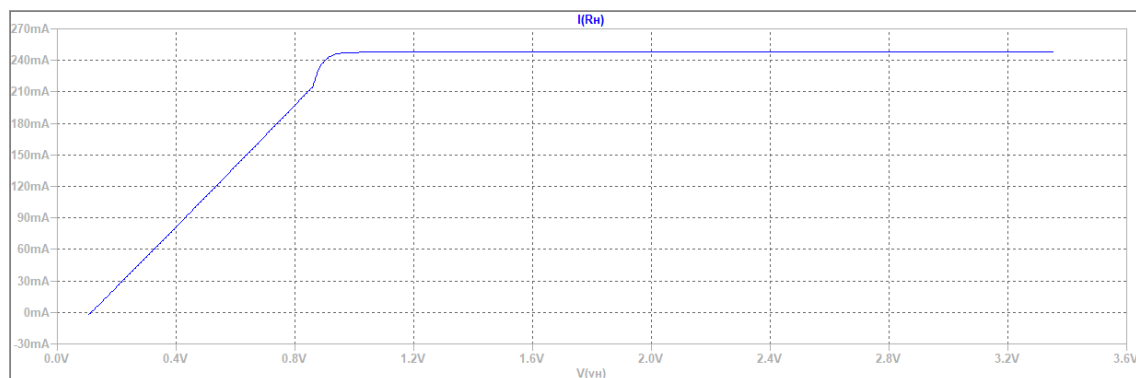


Рис. 16: Зависимость I_H от U_H

Наблюдаем линейный рост тока до ≈ 0.85 В (транзистору не хватает напряжения насыщения). Далее нелинейный рост до ≈ 1 В (транзистор плавно переходит из активного режима в насыщенный). После 1 В ток фиксируется на значении в ≈ 248 мА.

Зависимость тока через нагрузку и тока на токозадающем устройстве от напряжения питания

Построим график зависимости тока через нагрузку и тока на токозадающем устройстве от напряжения питания. С помощью net обозначим $V_{пит}$. Синяя траектория – зависимость тока через нагрузку от напряжения питания, красная – зависимость тока на токозадающем устройстве от напряжения питания

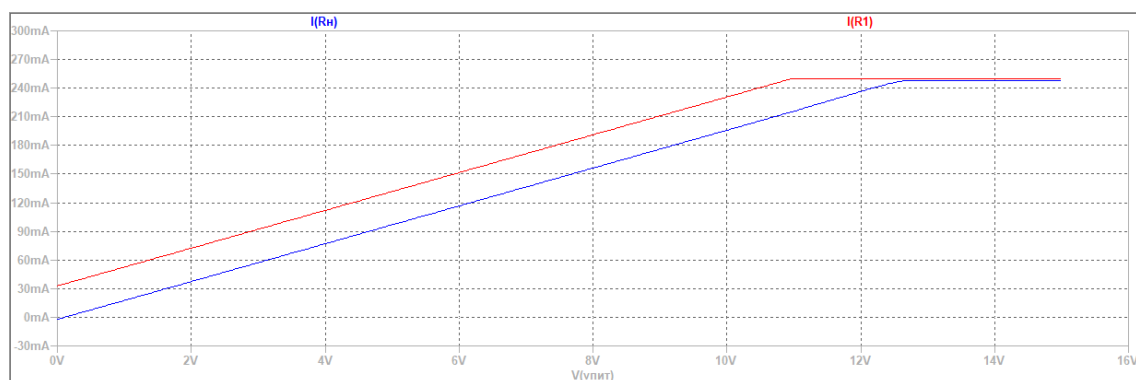


Рис. 17: Зависимости $I_H(U_{пит})$, $I_{ТЗ}(U_{пит})$

Ток на R1 растёт не с нуля быстрее тока на Rн, на ≈ 11 В достигает максимума $I_{ТЗ \text{ макс}} \approx 250$ мА. На Rн ток достигает максимума $I_{H \text{ макс}} \approx 248$ мА после ≈ 12.6 В.

Ток через нагрузку при различных сопротивлениях нагрузки

Построим графики зависимости тока от напряжения питания при различных сопротивлениях нагрузки. Проверим $R_H = 10, 10^2, 10^3, 10^4$ Ом. Красный график – подаваемое напряжение питания, синий – ток нагрузки

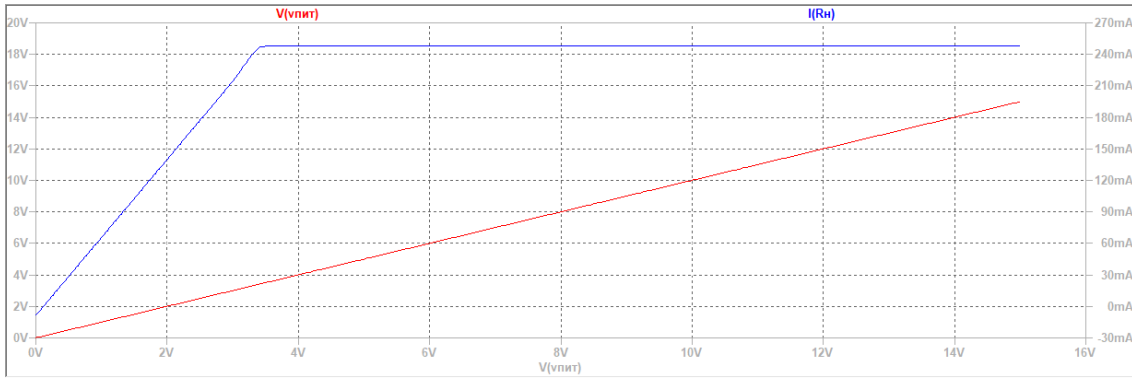


Рис. 18: $I_H(U_{\text{пит}})$ при $R_H = 10 \text{ Ohm}$

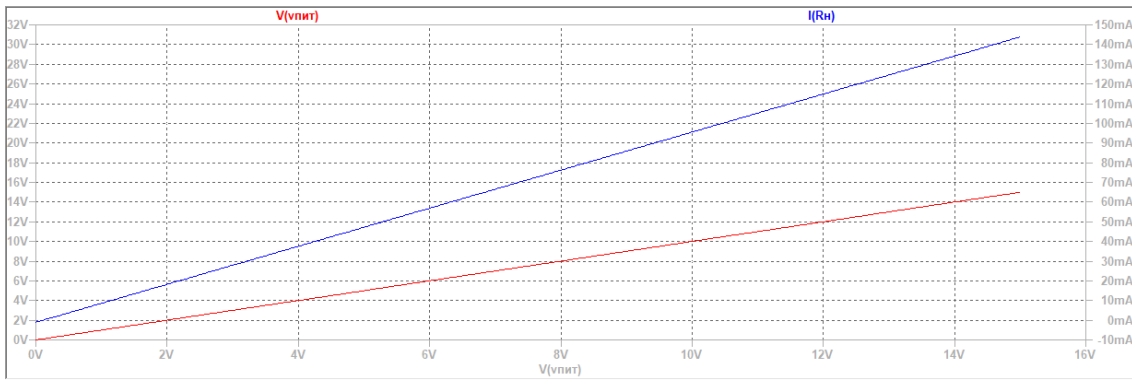


Рис. 19: $I_H(U_{\text{пит}})$ при $R_H = 100 \text{ Ohm}$

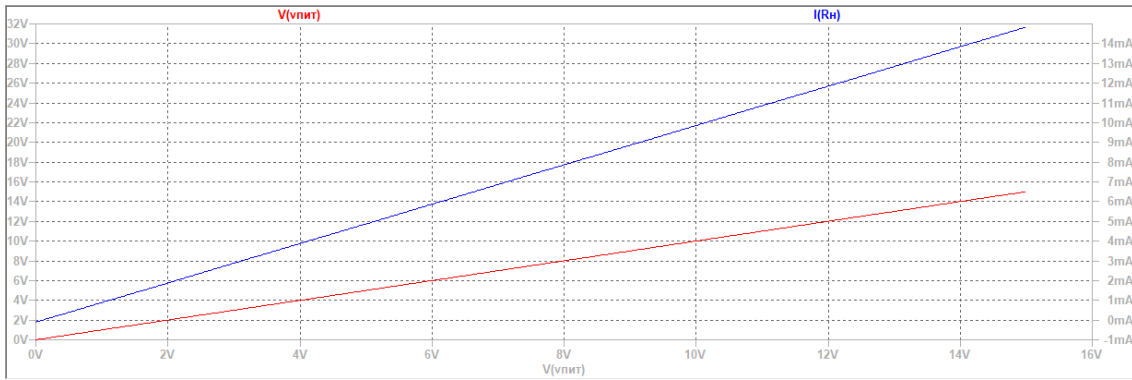


Рис. 20: $I_H(U_{\text{пит}})$ при $R_H = 1000 \text{ Ohm}$

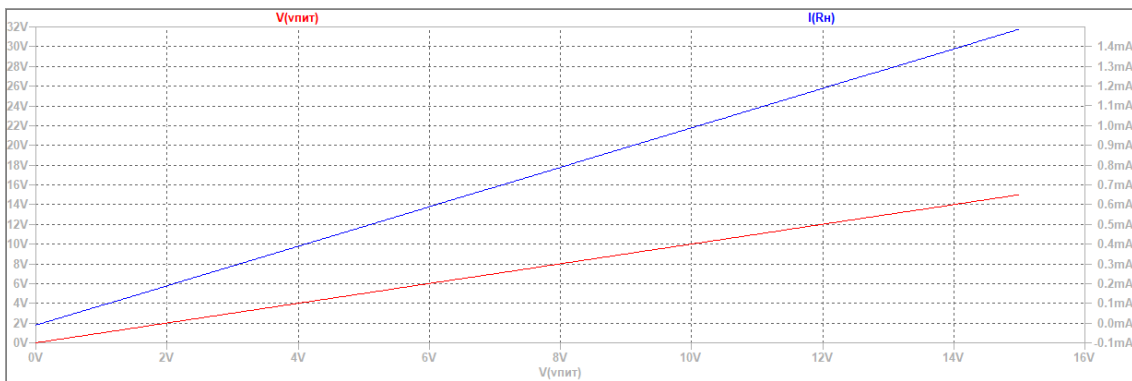


Рис. 21: $I_H(U_{\text{пит}})$ при $R_H = 10000 \text{ Ohm}$

При увеличении сопротивления R_H ток I_H уменьшается – не хватает напряжения. Необходимое напряжение для поддержания 250 мА можно рассчитать следующим образом

$$U_H = R_H \times I_H,$$

$$U_{H, 10 \text{ Ом}} = 10 \times 0.25 = 2.5 \text{ В},$$

$$U_{H, 100 \text{ Ом}} = 100 \times 0.25 = 25 \text{ В},$$

$$U_{H, 1000 \text{ Ом}} = 1000 \times 0.25 = 250 \text{ В},$$

$$U_{H, 10000 \text{ Ом}} = 10000 \times 0.25 = 2500 \text{ В};$$

Подаваемое напряжение ограничено 15 В, поэтому уже при $R_H \geq 100 \text{ Ом}$ тока в 250 мА достичь не удастся. При $R_H = 10 \text{ Ом}$ ток фиксируется на 250 мА (см. рис. [18](#)).

Вывод

В ходе выполнения лабораторной работы были рассмотрены различные схемы с транзисторами: токовые зеркала и генератор тока на ОУ. В каждом случае были рассчитаны параметры схемы и промоделированы необходимые графики. Результаты подтверждают корректность расчетов и рассуждений.