

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

<b>1</b>	<b>Цель работы</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Исследование токового зеркала с компенсацией теплового дрейфа</b>	<b>2</b>
2.1	Расчет 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
<b>3</b>	<b>Исследование токового зеркала Уилсона</b>	<b>5</b>
3.1	Расчет 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

## Цель работы

Цель работы – исследование работы источников тока.

## Исследование токового зеркала с компенсацией теплового дрейфа

### Расчет схемы

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

$$I_H = 250 \text{ мА}$$

и следующие формулы

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

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 первый транзистор, то ток через нагрузку должен быть равен току на первом транзисторе

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

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 Т1 Т2 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

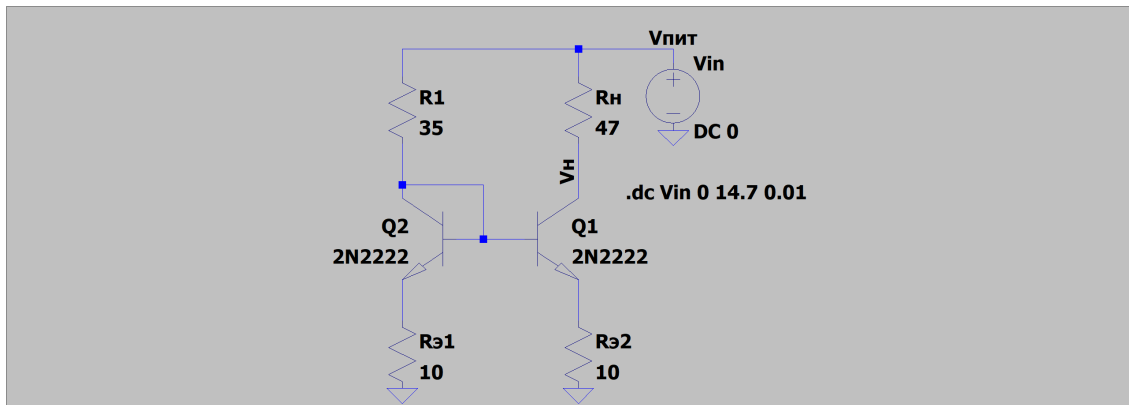


Рис. 1: Схема токового зеркала с компенсацией теплового дрейфа

## 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

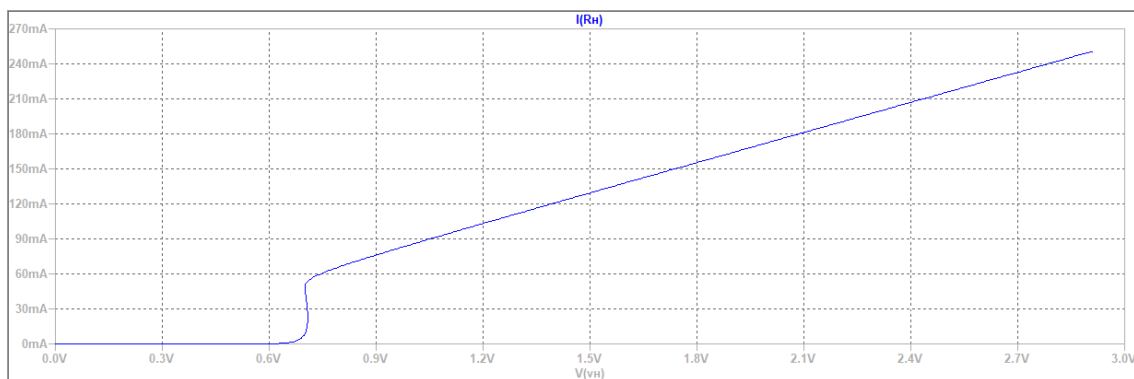


Рис. 2: Зависимость  $I_H$  от  $U_H$

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, красный – зависимость тока на токозадающем устройстве от напряжения питания

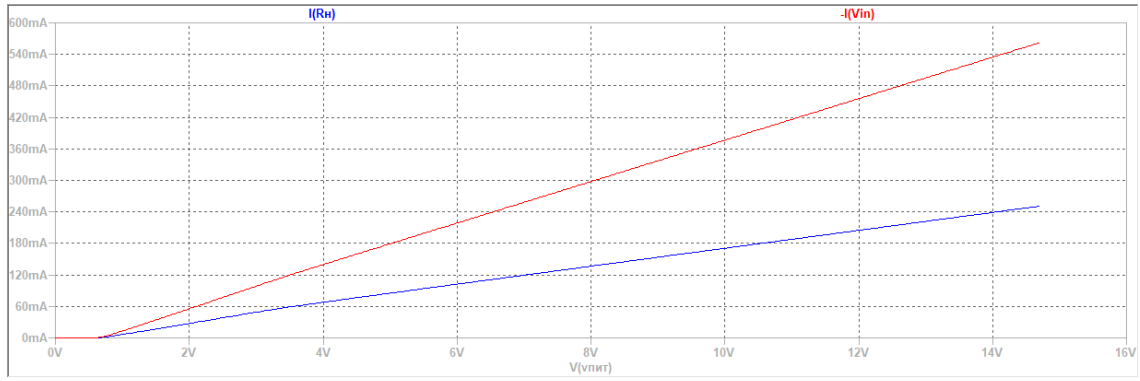


Рис. 3: Зависимости  $I_H(U_{\text{пит}})$ ,  $I_{\text{пит}}(U_{\text{пит}})$

Токи равны нулю до напряжения в 0.7 В. Ток питания больше, так как он включает в себя ток через нагрузку, ток через токозадающее плечо Q1 и базовые токи обоих транзисторов.

### 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

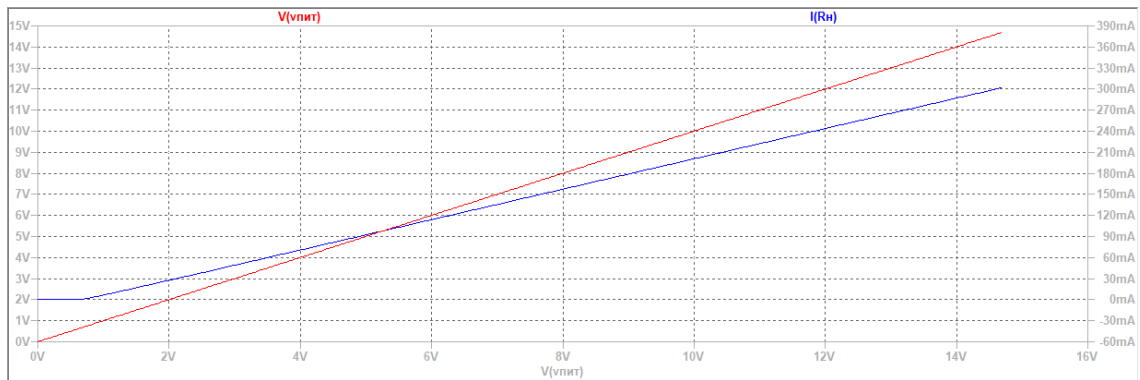


Рис. 4:  $I_H(U_{\text{пит}})$  при  $R_H = 10$  Ом

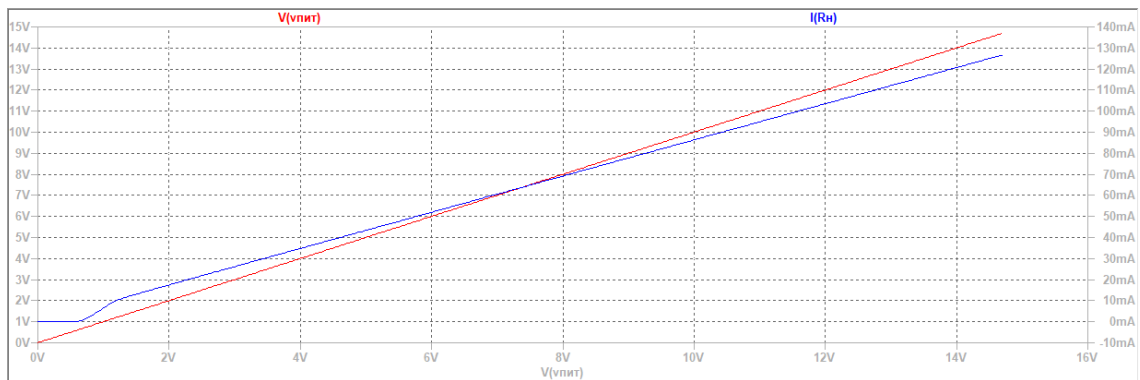


Рис. 5:  $I_H(U_{\text{пит}})$  при  $R_H = 100$  Ом

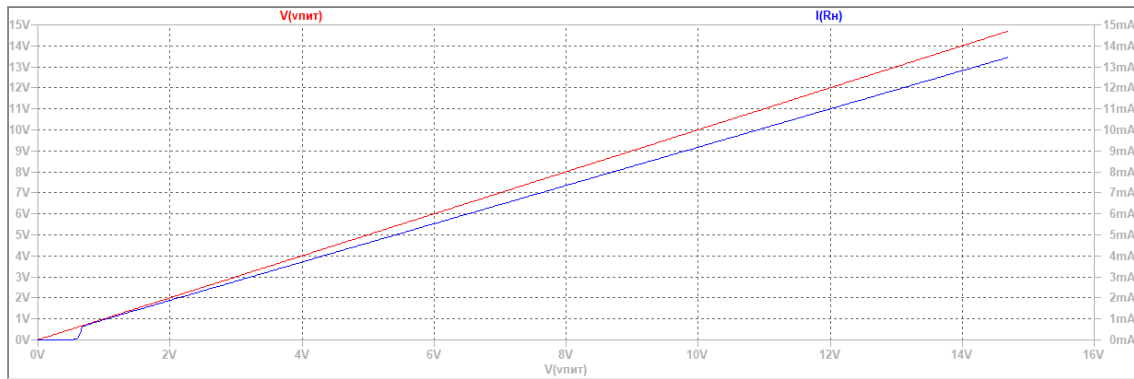


Рис. 6:  $I_H (U_{пит})$  при  $R_H = 1000 \text{ Ом}$

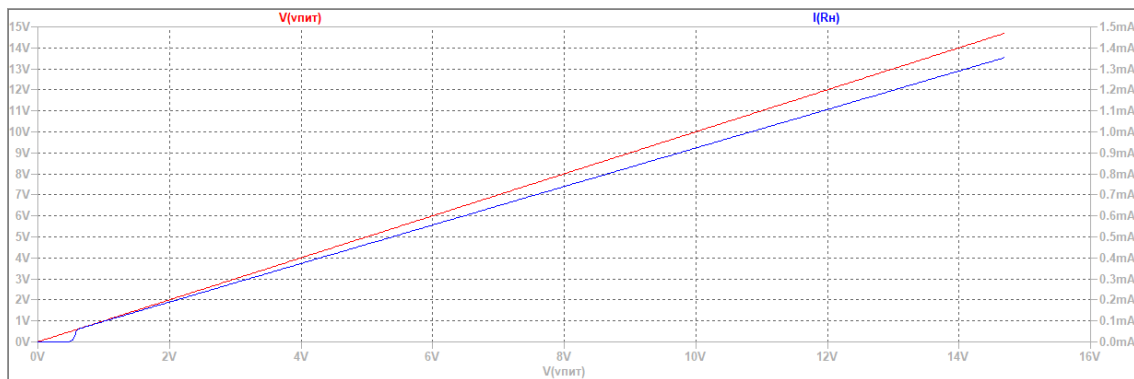


Рис. 7:  $I_H (U_{пит})$  при  $R_H = 10000 \text{ Ом}$

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

## Исследование токового зеркала Уилсона

### Расчет схемы

Рассчитаем схему токового зеркала Уилсона. Дан ток нагрузки

$$I_H = 250 \text{ мА}$$

и следующие формулы

$$I_{k1} \approx \frac{E_{\Pi} - 1.4}{R_1 + R_{\text{э}1}}, \quad I_H \approx \frac{R_{\text{э}1} (E_{\Pi} - 0.7)}{R_1 R_{\text{э}2} + R_{\text{э}1} R_{\text{э}2}};$$

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 первый 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

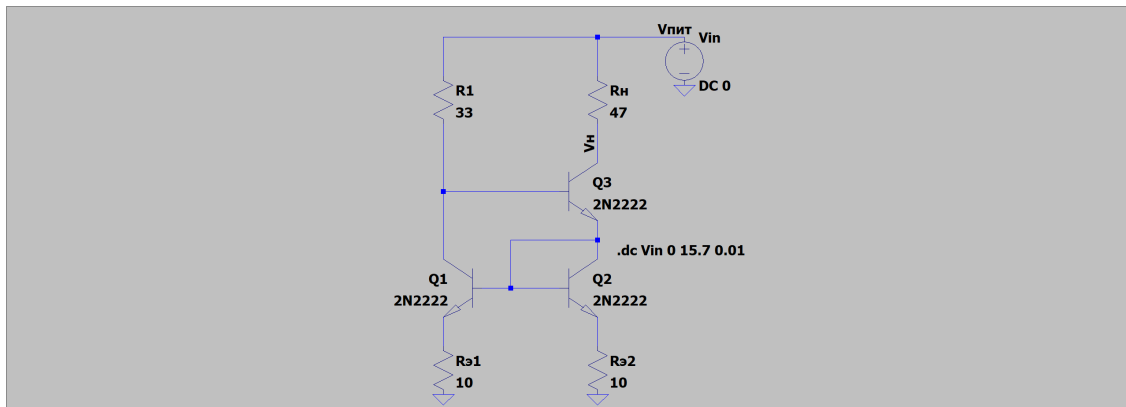


Рис. 8: Схема токового зеркала Уилсона

### 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 `VH`

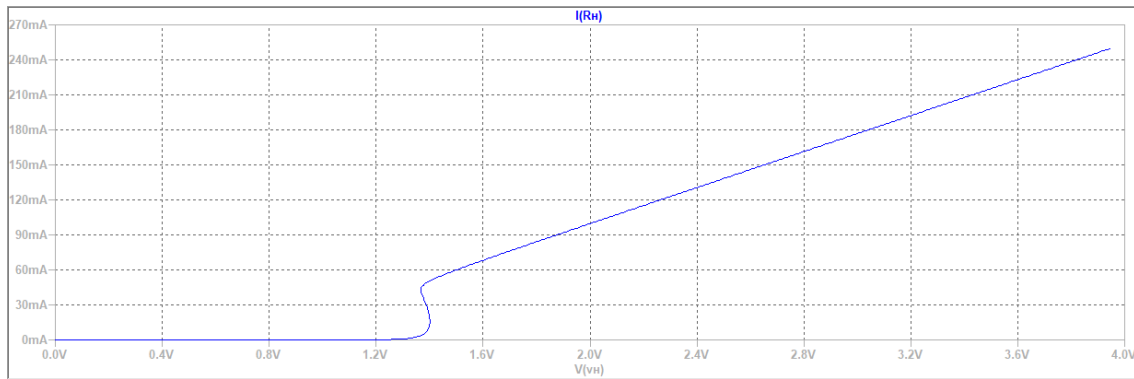


Рис. 9: Зависимость  $I_H$  от  $U_H$

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, красный – зависимость тока на токозадающем устройстве от напряжения питания

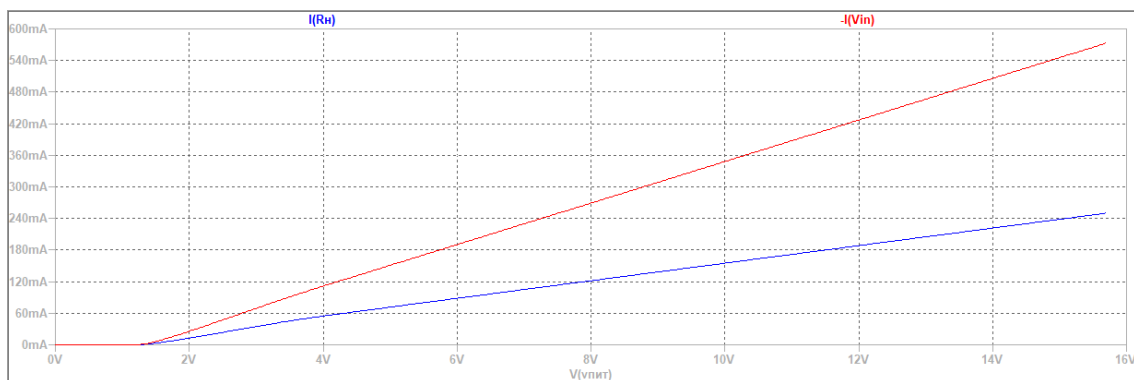


Рис. 10: Зависимости  $I_H(U_{пит})$ ,  $I_{пит}(U_{пит})$

До напряжения в 1.4 В транзисторы закрыты, ток нулевой. После они входят в активный режим, ток растет линейно. Максимумы  $I_H \approx 251$  мА,  $I_{пит} \approx 574$  мА. Ток на токозадающем устройстве больше, так как включает в себя оба токовых плеча и базовые токи транзисторов. Для достижения  $I_H = 250$  мА потребовалось подать напряжение на 1 В больше, чем в случае с токовым зеркалом с компенсацией теплового дрейфа.

### 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



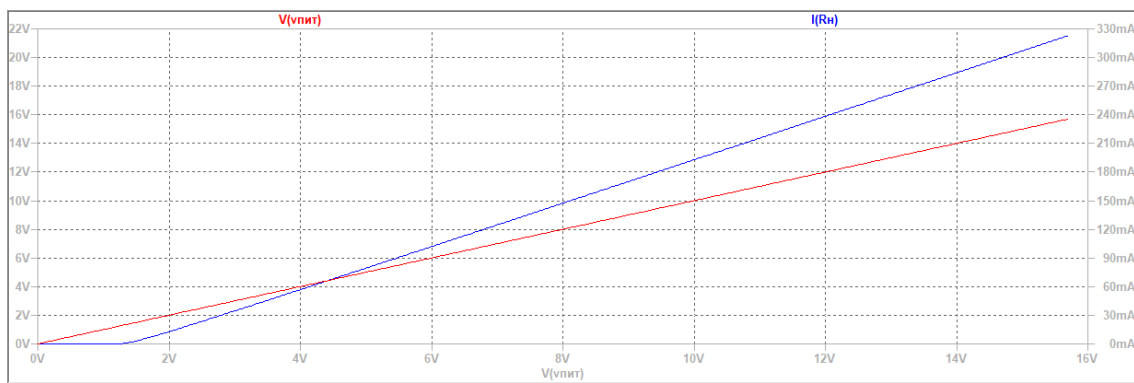


Рис. 11:  $I_H(U_{\text{пит}})$  при  $R_H = 10 \text{ Ом}$

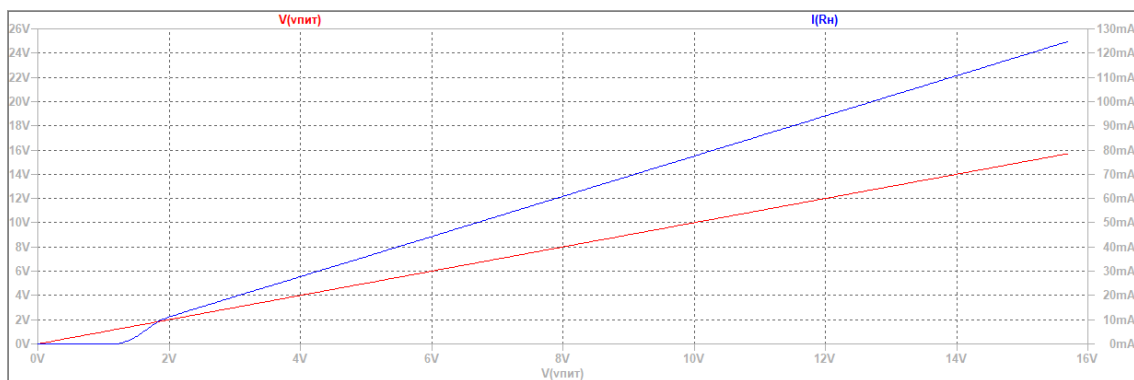


Рис. 12:  $I_H(U_{\text{пит}})$  при  $R_H = 100 \text{ Ом}$

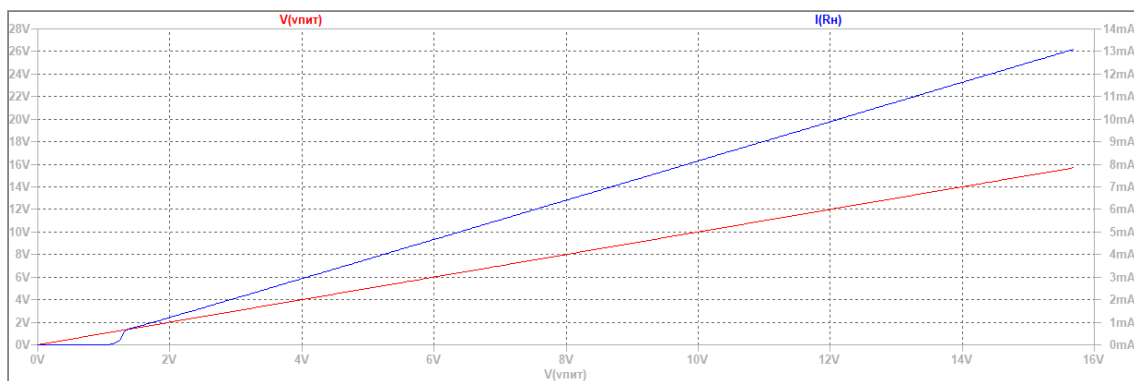


Рис. 13:  $I_H(U_{\text{пит}})$  при  $R_H = 1000 \text{ Ом}$

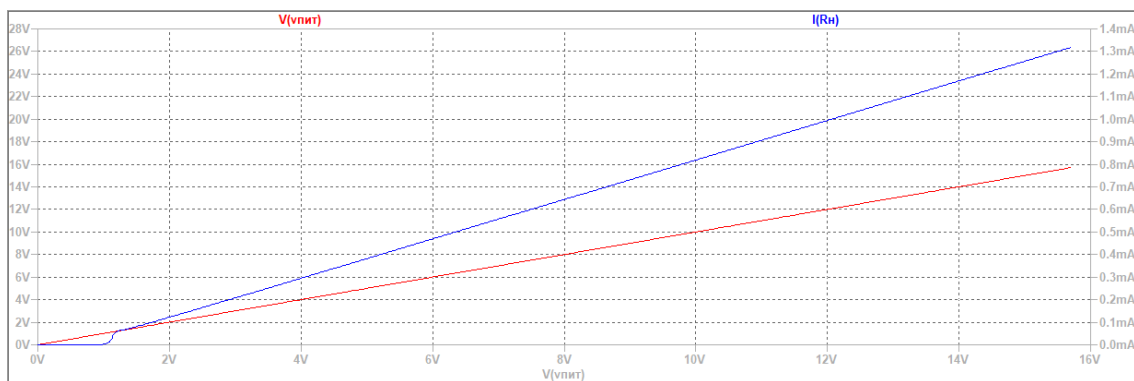


Рис. 14:  $I_H(U_{\text{пит}})$  при  $R_H = 10000 \text{ Ом}$

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.